

ANALES

ISSN 2451-8182



TOMO 52

BUENOS AIRES

2000

Esta publicación es propiedad de la
Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Director

Comisión de Publicaciones de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas
y Naturales: Dr. Enrique J. Baran, Dr. Norberto A. Fava e Ing. Eduardo Nuñez.

Lugar y fecha de edición

Buenos Aires, Argentina, noviembre de 2001.

Toda la correspondencia referente a estos "Anales" debe dirigirse a:
All enquires regarding this publication should be addressed to:

Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Avda. Alvear 1711, 4° piso
(1014) Buenos Aires
Argentina

Tel.: (54-11) 4811-2998 / (54-11) 4815-9451

Fax: (54-11) 4811-6951

E-mail Secretaría: acad@ancefn.org.ar

E-mail Biblioteca: biblio@ancefn.org.ar

Sitio Web: www.ancefn.org.ar

SUMARIO

I. INCORPORACIONES DE ACADÉMICOS

- Presentación del Dr. Roberto L.O. Cignoli como Académico Titular, por *A.R. Larotonda*7
- Verdad y consecuencia en el segmento unitario real: Una formalización de la lógica borrosa, por *R.L.O. Cignoli*9
- Presentación del Ing. Eduardo Nuñez como Académico Titular, por *A.J.L. Bolognesi*25
- Investigación aplicada en la ingeniería geotécnica, por *E. Nuñez*29
- Presentación de la Dra. Angela F. Danil de Namor como Académica Correspondiente en Guildford, Surrey, Reino Unido, por *P.J. Aymonino*67
- Supramolecular chemistry: Thermodynamic aspects, por *A.F. Danil de Namor*69
- Presentación del Dr. Francisco E. Baralle como Académico Correspondiente en Trieste, Italia, por *E.G. Gros*85
- De la química de los productos naturales a la medicina molecular: ¿Un trayecto atípico?, por *F.E. Baralle*87

II. ENTREGA DE LOS PREMIOS "ACADEMIA NACIONAL DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES" Y "ERNESTO E. GALLONI" - AÑO 1999 -

- Apertura del acto de entrega de premios, por *E.G. Gros*107
- Redes de estaciones de trabajo en computación paralela. Trabajo presentado por el Ing. *Antonio A. Quijano* con motivo de recibir el premio *Juan Manuel Barcala* en Ingeniería Electrónica111
- Fundaciones en roca. Trabajo presentado por el Ing. *Jorge A. Suárez* con motivo de recibir el premio *Oreste Moretto* en Ingeniería Geotécnica135
- Cellular basis of steroid neuroprotection in the Wobbler mouse, a genetic model of motoneuron disease. Trabajo presentado por el Dr. *Alejandro F. De Nicola* con motivo de recibir el premio *Ranwel Caputto* en Neuroquímica147
- Actividad biológica de metabolitos secundarios de plantas frente a *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera: Tenebrionidae). Trabajo presentado por el Dr. *Oscar S. Giordano* con motivo de recibir el premio *Venancio Deulofeu* en Química de Productos Naturales163
- Controles estructurales del Lineamiento Tucumán sobre el magmatismo neógeno y sus mineralizaciones asociadas del distrito Farallón Negro (Catamarca, Argentina): Una revisión. Trabajo presentado por el Dr. *Eduardo A. Rossello* con motivo de recibir el premio *Horacio J. Harrington* en Geología Estructural183
- Estudio analítico de cuencas dinámicas de Hopf en flujos bifásicos en canales. Trabajo presentado por el Dr. *Darío F. Delmastro* con motivo de recibir el premio *Ernesto E. Galloni* en Ingeniería Nuclear209

III. COMUNICACIONES CIENTÍFICAS

- Bernardo A. Houssay, su tiempo, por *A.O.M. Stoppani*225
- Región Minera Traslasierra, provincia de Córdoba, por *H.G.L. Bassi*239

I

INCORPORACIONES DE ACADÉMICOS

PRESENTACIÓN DEL DR. ROBERTO L. O. CIGNOLI COMO ACADÉMICO TITULAR

Angel R. Larotonda

Académico Titular de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Representa para mi un gran placer y una distinción el realizar la presentación del Dr. Roberto Cignoli como nuevo Miembro Titular de esta Academia.

Cignoli posee antecedentes impecables como investigador: más de 40 trabajos publicados en revistas de difusión internacional, un sinfín de conferencias y participaciones activas en reuniones científicas en el país y en el exterior, además de realizar una intensa labor docente de grado y posgrado. Todo ello lo define como un miembro destacado y reconocido internacionalmente de la comunidad científica argentina.

Empero, yo quisiera referirme a otras facetas de su actividad, que no son explicitadas en su curriculum vitae y a las que he llegado a conocer a través de compartir el quehacer cotidiano.

En primer lugar es imprescindible mencionar que si su especialidad, la denominada Lógica Matemática, ocupa hoy una posición respetada dentro de la comunidad científica argentina, ello se debe fundamentalmente a su esfuerzo y empeño puestos desde su regreso al país en 1983. Desde ese entonces, y gracias a él, una especialidad que en general estaba en manos de aficionados, cuenta hoy con un conjunto de buenos investigadores, con adecuados estándares de calidad en su producción.

Pero su actividad científica no se agota con su especialidad. Su cultura matemática es amplia, como lo prueban algunos de sus trabajos en los que ha incursionado en áreas del Análisis Funcional y un hermoso texto sobre este tema, escrito en colaboración con Mischa Cotlar, Miembro Correspondiente de esta Academia.

También deseo destacar su permanente e invaluable espíritu de colaboración con toda forma concebible de actividad académica: en el ámbito universitario, en diversos organismos de planeamiento científico, como miembro de comisiones asesoras del CONICET, como consejero directivo de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires o actualmente como director del Departamento de Matemática de esta casa de altos estudios. Pero lo que es más importante, lo cual me consta: en todos los casos aportando no solamente su experiencia y su saber, sino también un proceder claro y transparente que lo define como un miembro valioso de la comunidad científica nacional.

Bien, a pesar de que sería agradable continuar enumerando los méritos de nuestro nuevo colega académico, creo que convendría dejarle a él el uso de este ámbito para que pueda ilustrarnos con su exposición.

Muchas gracias.

VERDAD Y CONSECUENCIA EN EL SEGMENTO UNITARIO REAL: UNA FORMALIZACIÓN DE LA LÓGICA BORROSA

Roberto L. O. Cignoli

UBA y CONICET. Departamento de Matemática, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,
Ciudad Universitaria. (1428) Buenos Aires, Argentina.

Resumen

Se presenta un panorama, no demasiado técnico, de una reciente formalización de la lógica borrosa basada en las t-normas continuas y de las estructuras algebraicas asociadas.

Palabras clave: lógica borrosa, lógicas polivalentes, t-normas, BL-álgebras, sistemas formales.

Abstract

This is an overview, avoiding technicalities, of a recent formalization of fuzzy logic based on continuous t-norms and of the associated algebraic structures.

Key words: fuzzy logic, many-valued logics, t-norms, BL-algebras, formal systems.

La *lógica borrosa*, también conocida como *lógica difusa* (fuzzy logic en inglés), tiene su origen en un trabajo de L. A. Zadeh publicado en 1965 [44] y desde entonces se ha desarrollado vertiginosamente, habiendo sido aplicada con éxito en problemas de control, diagnóstico, cálculo de estructuras, etc. Incluso es ahora común encontrar electrodomésticos regulados por lógica borrosa.

A pesar de este desarrollo, la lógica borrosa aparece más como un conjunto de

recetas empíricas que como una teoría formalizada. Su formalización matemática es importante tanto del punto de vista conceptual como del de su potencial para aplicaciones más sofisticadas. Un notable intento de formalizar ciertos sistemas de lógica borrosa es el reciente libro de P. Hájek [25], que utiliza la bien desarrollada teoría de las lógicas multivaluadas.

Nos proponemos describir brevemente la formalización de Hájek y nuestras contribuciones a la misma, basadas en nuestra experiencia previa en el tratamiento algebraico de lógicas multivaluadas (ver, por ejemplo, [5, 17, 18]).

Conferencia pronunciada en su incorporación como Académico Titular, el 30 de abril de 1999.

La idea básica es obtener un cálculo proposicional preciso partiendo de enunciados imprecisos.

En el tratamiento clásico de la lógica, las proposiciones son enunciados que pueden ser verdaderos o falsos. Esta "bivalencia" de la lógica clásica se funda en los principios de *contradicción* (un enunciado no puede ser a la vez verdadero y falso) y del *tercero excluido* (todo enunciado o es verdadero o es falso). Estos principios fueron formulados por Aristóteles, quien les dio un carácter ontológico: nada puede ser y no ser al mismo tiempo; algo es o no es.

Este carácter ontológico de los principios básicos hace que la lógica clásica no sea la más adecuada para tratar ciertos enunciados del lenguaje corriente, que por su naturaleza son imprecisos o vagos, como por ejemplo "Juan es alto". Seguramente consideraremos este enunciado verdadero si Juan mide 1,86 m, y falso si Juan mide 1,55 m. Pero ¿qué valor de verdad le asignaremos si Juan mide, por ejemplo, 1,70 m?

Tradicionalmente, en lógica simbólica la verdad se representa por el número 1 y la falsedad por el 0. La idea de Zadeh es que a los enunciados imprecisos se les pueda asignar como valor de verdad cualquier número real entre 0 y 1. Conviene observar que ya en los comienzos de la década del 20, el lógico polaco J. Łukasiewicz había establecido un sistema de lógica coherente en el que a los enunciados se le asignan como valores de verdad números reales entre 0 y 1.

Para ilustrar estas ideas, representemos con P_n el enunciado "n es un número grande". Uno podría decir que $P_{1.000.000}$ es verdadero y que P_2 es falso. Pero ¿cuál es el límite? Veamos.

El enunciado condicional "si n es un número grande, también lo es n - 1", que simbolizaremos $P_n \Rightarrow P_{n-1}$, parece ser verdadero.

Una conocida regla de inferencia, la regla del *modus ponens*, afirma que si P y Q representan enunciados tales que los enunciados P y el condicional "Si P entonces Q" son ambos verdaderos, también debe ser verdadero el enunciado Q.

Por lo tanto, de la verdad de $P_{1.000.000}$ y de $P_{1.000.000} \Rightarrow P_{999.999}$ se concluye la verdad de $P_{999.999}$, esto es que 999.999 es un número grande. Ahora de la verdad de $P_{999.999}$ y $P_{999.999} \Rightarrow P_{999.998}$ también se concluye la verdad de $P_{999.998}$. Continuando de esta manera se concluye que P_3, P_2, P_1 deben ser verdaderos, esto es, que también 3, 2, 1 son números grandes.

En otras palabras, vimos que si n es un número grande, entonces todos los números menores también deben ser grandes. (Paradoja *sorites*).

La paradoja resulta de considerar como una regla válida de razonamiento el *modus ponens* y de suponer que el enunciado "Si le quitamos una unidad a un número grande, entonces el número que resulta sigue siendo grande" es siempre verdadero. En realidad este es un enunciado impreciso, debido a la imprecisión del término "grande", y es sólo parcialmente verdadero: será "más verdadero" cuanto "mayor" sea el número que disminuimos en uno. Veremos que el admitir más valores de verdad que los tradicionales "verdadero" y "falso" nos permite construir sistemas formales donde la regla del *modus ponens* continúa valiendo pero no se infieren resultados paradójales del tipo anterior.

Antes de proseguir, conviene decir algunas generalidades sobre sistemas formales.

En los sistemas formales las proposiciones se representan por *fórmulas proposicionales*, que son expresiones que se obtienen combinando *variables proposicionales* $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$ por medio de los conectivos lógicos & (conjunción), \Rightarrow (implicación) y \neg (negación) y los paréntesis. Por ejemplo $(X_1 \Rightarrow X_2) \& \neg X_1, \neg X_1 \Rightarrow (\neg X_1 \& X_2)$ son fórmulas proposicionales.

En un sistema formal de lógica proposicional \mathcal{F} hay que distinguir entre la semántica y la sintaxis.

La semántica consiste en un método para asignar valores de verdad a las proposiciones representadas en el sistema. A partir de esta noción de verdad, se define el concepto semántico de *consecuencia*: Una proposición P es una consecuencia de un

conjunto \mathcal{H} de proposiciones, en símbolos $\mathcal{H} \vdash_{\mathcal{F}} P$, si y sólo si toda asignación de valores de verdad en \mathcal{F} que haga verdaderas a todas las proposiciones de \mathcal{H} también hace verdadera a P . Las consecuencias del conjunto vacío, esto es, las proposiciones que para cualquier asignación de valores de verdad en \mathcal{F} resultan verdaderas, son llamadas *tautologías de \mathcal{F}* .

La sintaxis está ligada a la idea de *demostración*. En los sistemas formales de tipo Hilbert, se elige un conjunto de formas proposicionales, que se denominan *axiomas* y ciertas *reglas de inferencia*. Para fijar ideas, consideraremos como única regla de inferencia el modus ponens. Una *demostración a partir de un conjunto de proposiciones \mathcal{H}* (la hipótesis) consiste en una lista finita de proposiciones Q_1, Q_2, \dots, Q_n tal que para todo i con $1 \leq i \leq n$, se tiene que o bien Q_i es de la forma de uno de los axiomas, o bien $Q_i \in \mathcal{H}$, o bien existen índices j, k tales que $1 \leq j, k < i$ de modo que Q_i se infiere por modus ponens de Q_j y Q_k . Una proposición P se dice *demostrable a partir de un conjunto de proposiciones \mathcal{H}* , y escribiremos $\mathcal{H} \vdash_{\mathcal{F}} P$, si existe una demostración Q_1, \dots, Q_r a partir de \mathcal{H} tal que $Q_r = P$. Una proposición P se dice *demostrable en \mathcal{F}* si y sólo si $\emptyset \vdash_{\mathcal{F}} P$, esto es, si y sólo si es demostrable a partir de los axiomas, sin hipótesis adicionales.

Naturalmente, interesan las conexiones entre la semántica y la sintaxis de un sistema formal.

El sistema \mathcal{F} se dice *correcto o adecuado* si y sólo si para todo conjunto \mathcal{H} de proposiciones de \mathcal{F} y toda proposición P en \mathcal{F} , $\mathcal{H} \vdash_{\mathcal{F}} P$ implica que $\mathcal{H} \models_{\mathcal{F}} P$. En otras palabras, \mathcal{F} es *correcto* si a partir de hipótesis verdaderas se demuestran proposiciones verdaderas. Es fácil convencerse de que para garantizar la corrección, basta pedir que los axiomas sean tautologías y que las reglas de inferencia preserven la noción de verdad en \mathcal{F} . En el caso del modus ponens, esto último significa que el método de asignación de valores de verdad en \mathcal{F} debe ser tal que siempre que las premisas P y $P \Rightarrow Q$ resulten verdaderas, también debe ser verdadera la conclusión Q .

El sistema \mathcal{F} se dice *completo* si y sólo si para toda proposición P , $\emptyset \models_{\mathcal{F}} P$ implica que $\emptyset \vdash_{\mathcal{F}} P$. Esto es, \mathcal{F} es *completo* si y sólo si todas las tautologías son demostrables.

En la literatura también se consideran sistemas *fuertemente completos*, en los que todas las consecuencias de un conjunto de proposiciones \mathcal{H} son demostrables a partir de \mathcal{H} . Como los sistemas que consideraremos no son fuertemente completos, no insistiremos con esta noción (ver [18, §4.6]).

En su tratado [25], Hájek propone una formalización de los sistemas de lógica borrosa en los que los valores de verdad de las proposiciones se asignan mediante t-normas continuas. Estos sistemas contienen como casos particulares a las lógicas multivaluadas de Łukasiewicz, a la parte lineal del cálculo proposicional intuicionista y, naturalmente, también al cálculo proposicional clásico.

En lo que sigue resumiremos algunas propiedades de estos sistemas formales, especialmente en lo que se refiere a la completitud. Comenzaremos por definir las t-normas continuas.

1. t-normas continuas

Una *t-norma* es una operación binaria $*$ definida sobre el segmento unitario real $[0, 1]$ con las siguientes propiedades:

N_1 Asociativa: $x * (y * z) = (x * y) * z$.

N_2 Conmutativa: $x * y = y * x$.

N_3 Preservación del orden en ambas variables:

$x_1 \leq x_2$ implica $x_1 * y \leq x_2 * y$,

$y_1 \leq y_2$ implica $x * y_1 \leq x * y_2$.

N_4 Elemento neutro: $x * 1 = x$.

N_5 Elemento absorbente: $x * 0 = 0$.

Consideraremos únicamente t-normas *continuas*.

Con cada t-norma continua $*$ podemos asociar otra operación binaria, \rightarrow , definida sobre el segmento $[0, 1]$ del siguiente modo:

$x \rightarrow y := \max \{z \in [0, 1] \mid z * x \leq y\}$.
Esta operación \rightarrow se conoce como *el residuo* o *la operación adjunta* de $*$.

La relación básica entre una t-norma y su adjunta es la siguiente:

$$z * x \leq y \quad \text{si y sólo si} \quad z \leq x \rightarrow y. \quad (1)$$

También definimos una operación unaria \neg por la fórmula:

$$\neg x := x \rightarrow 0. \quad (2)$$

Los siguientes son ejemplos de t-normas continuas y sus respectivos adjuntos:

Ejemplo 1

$$x *_H y = x \wedge y = \min(x, y)$$

$$x \rightarrow_H y = \begin{cases} 1 & \text{si } x \leq y \\ y & \text{si } x > y \end{cases}$$

$$\neg_H x = \begin{cases} 1 & \text{si } x = 0 \\ 0 & \text{si } x > 0 \end{cases}$$

Ejemplo 2

$$x *_P y = xy \text{ (producto ordinario)}$$

$$x \rightarrow_P y = \begin{cases} 1 & \text{si } x \leq y \\ y/x & \text{si } x > y \end{cases}$$

$$\neg_P x = \begin{cases} 1 & \text{si } x = 0 \\ 0 & \text{si } x > 0 \end{cases}$$

Ejemplo 3

$$x *_L y = \max(x + y - 1, 0)$$

$$x \rightarrow_L y = \min(1, 1 - x + y)$$

$$\neg_L x = 1 - x$$

El primer ejemplo es un caso particular de lógica intuicionista formalizada por Heyting. El tercero corresponde a la lógica infinito-valente de Łukasiewicz. Estos tres ejemplos son básicos, pues en cierto sentido generan todas las posibles t-normas continuas:

Sea $*$ una t-norma continua. Un elemento $x \in [0, 1]$ es *idempotente* si $x^2 = x * x = x$, y es *nilpotente* si existe un número natural n tal que $x^n = 0$.

La continuidad de $*$ implica que el conjunto I de todos los elementos idempotentes es cerrado. Luego:

$$[0, 1] \setminus I = \bigcup_{\lambda \in \Lambda} (a_\lambda, b_\lambda),$$

donde $0 \leq a_\lambda \leq b_\lambda$ para cada $\lambda \in \Lambda$ y $\# \Lambda \leq \aleph_0$.

La restricción de $*$ a cada uno de los intervalos cerrados $[a_\lambda, b_\lambda]$ coincide o bien con $*_P$ o bien con $*_L$. La restricción a I coincide con $*_H$ (ver [25]).

Observación 1.1. Menu y Pavelka [33] probaron que $*_L$ es la única t-norma con la propiedad que ella y su adjunta son ambas continuas como funciones de $[0, 1] \times [0, 1]$ en $[0, 1]$.

No es difícil verificar las siguientes propiedades de las t-normas continuas y sus respectivos adjuntos:

$$x \leq y \quad \text{si y sólo si} \quad x \rightarrow y = 1. \quad (3)$$

$$x \wedge y = \min(x, y) = x * (x \rightarrow y). \quad (4)$$

$$x \vee y = \max(x, y) = ((x \rightarrow y) \rightarrow y) \wedge ((y \rightarrow x) \rightarrow x). \quad (5)$$

$$(x \rightarrow y) \vee (y \rightarrow x) = 1. \quad (6)$$

Con cada t-norma continua $*$ podemos asociar un sistema formal $\mathcal{R}(*)$. La semántica para estos cálculos puede ser definida en general. La sintaxis depende de cada t-norma, y será considerada posteriormente.

A las proposiciones se les asignan valores de verdad en el segmento $[0, 1]$, considerando que el 1 representa la verdad absoluta y el 0 la falsedad absoluta e interpretando la conjunción $\&$ por $*$, la implicación \Rightarrow por el residuo \rightarrow y la negación \neg por la operación \neg .

Esto es, si a las proposiciones P y Q les asignamos como valores de verdad los números reales $v(P)$ y $v(Q)$, respectivamente, tendremos que los valores de verdad de las proposiciones compuestas $P \& Q$, $P \Rightarrow Q$ y $\neg P$ están definidos del modo siguiente:

$$v(P \& Q) = v(P) * v(Q),$$

$$v(P \Rightarrow Q) = v(P) \rightarrow v(Q),$$

$$v(\neg P) = \neg v(P).$$

Resulta de estas definiciones que si una proposición P está representada por una fórmula proposicional que es combinación de variables proposicionales X_1, X_2, \dots, X_n por medio de los conectivos lógicos de conjunción, implicación y negación, entonces el valor de verdad $v(P)$ está determinado por los valores de verdad $v(X_1), v(X_2), \dots, v(X_n)$.

Si se tiene que $v(P) = 1$ para todos los posibles valores $v(X_1), v(X_2), \dots, v(X_n)$, entonces P es una tautología de $\mathcal{F}(*)$. Denotaremos con $Taut$, al conjunto de todas las tautologías de $\mathcal{F}(*)$.

Por ejemplo,

$$P = X_1 \Rightarrow \sim \sim X_1 \in Taut.$$

cuando $*$ es una cualquiera de las tres t-normas básicas

Pero

$$P = \sim \sim X_1 \Rightarrow X_1$$

es una tautología para $*_L$, que no lo es ni para $*_H$ ni para $*_P$.

En general, se tiene que $\mathcal{H} \models P$, si siempre que $v(Q) = 1$ para toda proposición Q en \mathcal{H} , entonces también $v(P) = 1$.

Es fácil verificar que la regla del modus ponens preserva la verdad en todos los sistemas $\mathcal{F}(*)$.

Para ilustrar estas ideas, volvamos al ejemplo en que P_n representa el enunciado " n es un número grande". Parece razonable considerar que

$$v(P_n) \leq v(P_{n+1}).$$

Pongamos, para todo n ,

$$v(P_n \Rightarrow P_{n-1}) = \frac{n-1}{n}$$

y supongamos que $*$ = $*_P$, el producto ordinario.

Si $P_{1.000.000}$ es verdadero, esto es, $v(P_{1.000.000}) = 1$, teniendo en cuenta (4) tendremos que:

$$v(P_{999.999}) = \min(v(P_{1.000.000}), v(P_{999.999})) = \\ v(P_{1.000.000}) * v(P_{1.000.000} \Rightarrow P_{999.999}) = \frac{999.999}{1000.000}$$

en general, tendremos que

$$v(P_{n-k}) = \frac{n-k}{n}$$

Luego

$$v(P_1) = \frac{1}{n}, \quad v(P_0) = 0.$$

resultados que están acordes con la intuición.

2. La lógica borrosa básica de Hájek

La lógica borrosa básica fue introducida por Hájek [25] con la intención de obtener un sistema formal que capture la noción de verdad y consecuencia relativas a todas las t-normas continuas.

Esto es, si indicamos con \models_b la relación de consecuencia en esta lógica, se tiene que, para todo conjunto \mathcal{H} de proposiciones y toda proposición P :

$$\mathcal{H} \models_b P \text{ si y sólo si } \mathcal{H} \models P \\ \text{para toda t-norma continua } *.$$

En particular, las tautologías de esta lógica son aquellas proposiciones que son tautologías para todas las t-normas continuas. Esto es, si $Taut_b$ denota el conjunto de las tautologías de la lógica básica, entonces:

$$Taut_b = \bigcap \{Taut, : * \text{ es t-norma continua}\}.$$

Hájek [25] definió la sintaxis de la lógica borrosa básica tomando como axiomas las proposiciones que se pueden escribir en una de las siguientes formas:

$$T_1 (P \Rightarrow Q) \Rightarrow ((Q \Rightarrow R) \Rightarrow (P \Rightarrow R)) \\ T_2 (P \& Q) \Rightarrow P \\ T_3 (P \& Q) \Rightarrow (Q \& P) \\ T_4 (P \& (P \Rightarrow Q)) \Rightarrow (Q \& (Q \Rightarrow P)) \\ T_5 (P \Rightarrow (Q \Rightarrow R)) \Rightarrow ((P \& Q) \Rightarrow R) \\ T_6 ((P \& Q) \Rightarrow R) \Rightarrow (P \Rightarrow (Q \Rightarrow R)) \\ T_7 ((P \Rightarrow Q) \Rightarrow R) \Rightarrow (((Q \Rightarrow P) \Rightarrow R) \Rightarrow R) \\ T_8 \sim (Q \Rightarrow Q) \Rightarrow P$$

y como regla de deducción el modus ponens.

Es fácil verificar que las proposiciones de la forma de alguno de los axiomas

están en $Taut_0$, y que la regla del modus ponens preserva la verdad. Por lo tanto la sintaxis de la lógica borrosa básica es adecuada a la semántica. Su completitud fue conjeturada por Hájek, y demostrada en [21]. Para indicar la demostración, necesitaremos la teoría de las BL-álgebras, que consideraremos en la próxima sección.

3. BL-álgebras

Motivado por las propiedades (3) - (6) de las t-normas continuas, Hájek introdujo la siguiente clase de álgebras, que juegan para la lógica básica un papel análogo al de las álgebras de Boole para la lógica clásica (ver [25]).

Definición 3.1. Una BL-álgebra es un sistema $\langle A, *, \rightarrow, \perp \rangle$ donde A es un conjunto no vacío, $*$ y \rightarrow son operaciones binarias sobre A , \perp es un elemento fijo de A , y que, con el elemento \top definido por:

$$\top := \perp \rightarrow \perp,$$

y con las operaciones \neg, \wedge y \vee definidas por:

$$\neg x := x \rightarrow \perp,$$

$$x \wedge y := x * (x \rightarrow y),$$

$$x \vee y := ((x \rightarrow y) \rightarrow y) \wedge ((y \rightarrow x) \rightarrow x),$$

satisface los siguiente axiomas:

A_1 $\langle A, *, \top \rangle$ es un monoide abeliano (esto es, $*$ es asociativa, conmutativa y $x * \top = x$),

A_2 $L(A) := \langle A, \vee, \wedge, \perp, \top \rangle$ es un retículo con elemento mínimo \perp y elemento máximo \top (esto es, las operaciones \vee y \wedge son ambas conmutativas y asociativas; $x \vee x = x = x \wedge x$, $x \wedge (x \vee y) = x = x \vee (x \wedge y)$, $x \wedge \perp = \perp$, $x \wedge \top = x$),

A_3 $x * (y \vee z) = (x * y) \vee (x * z)$,

$x * (y \wedge z) = (x * y) \wedge (x * z)$,

A_4 $(x * y) \rightarrow z = x \rightarrow (y \rightarrow z)$,

A_5 $(x \rightarrow y) \vee (y \rightarrow x) = \top$,

A_6 $x \rightarrow x = \top$.

Es claro que el segmento unitario real $[0, 1]$ equipado con una t-norma conti-

nua $*$ y su adjunta \rightarrow , y con $\perp = 0$, es un ejemplo de BL-álgebra.

Sea A una BL-álgebra. Denotaremos con \leq el orden (parcial) definido por A por la estructura de retículo dada por (A, \leq) , esto es,

$x \leq y$ si y sólo si $x = x \wedge y$ si y sólo si $y = x \vee y$.

Este orden se llama el *orden natural* de la BL-álgebra A .

Cuando el orden natural de la BL-álgebra A es total (o sea, para todo x, y en A , $x \leq y$ ó $y \leq x$), decimos que A es una *BL-cadena*.

Una ecuación en el lenguaje $\langle *, \rightarrow, \perp \rangle$ es una expresión de la forma

$$\varphi(X_1, \dots, X_n) = \psi(X_1, \dots, X_n)$$

donde φ, ψ son fórmulas proposicionales obtenidas a partir de las variables proposicionales X_1, \dots, X_n .

Una BL-álgebra A *satisface* la ecuación $\varphi(X_1, \dots, X_n) = \psi(X_1, \dots, X_n)$ si y sólo si para toda n -upla (a_1, \dots, a_n) de elementos de A se tiene que

$$\varphi(a_1, \dots, a_n) = \psi(a_1, \dots, a_n).$$

La importancia de las BL-cadenas está dado por el siguiente resultado, debido a Hájek [25].

Teorema 3.2. Una ecuación $\varphi(X_1, \dots, X_n) = \psi(X_1, \dots, X_n)$ es satisfecha por toda BL-álgebra si y sólo si es satisfecha por todas las BL-cadenas.

Veamos el significado de este resultado para la lógica básica.

Denotaremos con *Form* al conjunto de todas las fórmulas proposicionales.

Diremos que las fórmulas proposicionales φ y ψ son *LB-equivalentes*, y escribiremos $\varphi =_{LB} \psi$, si y sólo si $\varphi \Rightarrow \psi$ y $\psi \Rightarrow \varphi$ son ambas demostrables en lógica básica.

Se demuestra que $=_{LB}$ es una relación de equivalencia, y si indicamos con $|\varphi|$ la clase de equivalencia de la fórmula proposicional φ , esto es:

$$|\varphi| := \{ \psi \in \text{Form} \mid \psi =_{LB} \varphi \}$$

y si definimos en el conjunto cociente $Form/ \equiv LB$ formado por las clases de equivalencia de fórmulas proposicionales las operaciones $*$, \rightarrow y la constante \perp del siguiente modo:

$$\begin{aligned} |\varphi| * |\psi| &:= |\varphi \& \psi| \\ |\varphi| \rightarrow |\psi| &:= |\varphi \Rightarrow \psi| \\ \perp &:= |-(X_1 \Rightarrow X_1)| \end{aligned}$$

entonces se puede demostrar el siguiente resultado:

Teorema 3.3. $\mathcal{L} := \langle Form/ \equiv LB, *, \neg, \perp \rangle$ es una BL-álgebra, llamada el álgebra de Lindenbaum de la lógica básica. Además, φ es demostrable en lógica básica si y sólo si $|\varphi| = \perp$.

Sea φ una fórmula proposicional obtenida a partir de las variables proposicionales X_1, \dots, X_n . Se tiene que

$$|\varphi| = \varphi(|X_1|, \dots, |X_n|)$$

Luego si $|\varphi|$ no es demostrable en lógica básica, entonces la ecuación

$$\varphi(X_1, \dots, X_n) = \neg \perp$$

no es satisfecha por \mathcal{L} , y por el Teorema 3.3, existe una BL-cadena C y una n -upla (c_1, \dots, c_n) de elementos de C tales que $\varphi(c_1, \dots, c_n) \neq \top$.

Por lo tanto tenemos:

Teorema 3.4 (Hájek) φ es demostrable en lógica básica si y sólo si para toda BL-cadena C y para toda n -upla (c_1, \dots, c_n) de elementos de C , se tiene que $\varphi(c_1, \dots, c_n) = \top$.

Para demostrar el teorema de completitud debemos refinar el teorema anterior, mostrando que como BL-cadena se puede tomar el segmento unitario real equipado con una t -norma continua.

Del Teorema 3.2 resulta que si una ecuación $\varphi(X_1, \dots, X_n) = \psi(X_1, \dots, X_n)$ no es satisfecha por alguna BL-álgebra, entonces debe existir una BL-cadena C y un número finito de elementos de C , digamos $\perp \leq a_1 < \dots < a_n \leq \top$ tal que $\varphi(a_1, \dots, a_n) \neq \psi(a_1, \dots, a_n)$. Esta observación sugiere la siguiente definición.

Definición 3.5. Sean A, B BL-cadenas, y sea S un subconjunto finito de A tal que $\{\perp, \top\} \subseteq S$. Una inmersión parcial de A en B con dominio S es una función $f: S \rightarrow B$ que satisface las condiciones siguientes, donde x, y, z denotan elementos de S :

$$\begin{aligned} PE_1 \quad &x \leq y \text{ si y sólo si } f(x) \leq f(y), \\ PE_2 \quad &x * y = z \text{ implica } f(x) * f(y) = f(z), \\ PE_3 \quad &x \rightarrow y = z \text{ implica } f(x) \rightarrow f(y) = f(z), \\ PE_4 \quad &f(\perp) = \perp, f(\top) = \top. \end{aligned}$$

Diremos que una BL-cadena A es parcialmente inmersible en una BL-cadena B si y sólo si cada subconjunto finito de A que contenga a \perp y a \top es el dominio de una inmersión parcial de A en B .

Ahora no es difícil probar el resultado siguiente, que jugará un papel central en lo que sigue:

Lema 3.6. Sea A una BL-cadena parcialmente inmersible en la BL-cadena B . Si A no satisface una ecuación, entonces tampoco la satisface B .

Para probar el teorema de completitud necesitamos extender el resultado sobre descomposición de las t -normas continuas en términos de las tres t -normas básicas a BL-cadenas. Pero primero debemos estudiar las subclases de BL-álgebras determinadas por estas tres t -normas.

4. Álgebras de Heyting lineales

Si a los axiomas que definen las BL-álgebras le agregamos el axioma:

$$(H) \quad x * y = x \wedge y = x * (x \rightarrow y),$$

se obtienen las álgebras de Heyting lineales, que fueron introducidas en la década del 60 independientemente por A. Monteiro [37, 38] en la Argentina y por A. Horn [28, 29] en los Estados Unidos. Estas álgebras están relacionadas con ciertos sistemas de lógica intuicionista que fueron considerados, entre otros, por Gödel y Dummett.

Toda cadena (esto es, conjunto totalmente ordenado) C con elemento mínimo \perp y elemento máximo \top admite una única estructura de álgebra de Heyting, en la que

las operaciones están definidas del modo siguiente, para todo x, y en C :

$$x * y = \min(x, y), \quad x \rightarrow y = \begin{cases} \top & \text{si } x \leq y \\ y & \text{si } x > y. \end{cases}$$

En particular, resulta que $(\{0, 1\}, *_H, \rightarrow_H, 0)$ es un álgebra de Heyting lineal.

Es obvio que cualquier cadena finita puede ser inmersa, preservando la estructura de Heyting, en cualquier cadena infinita. Más formalmente:

Lema 4.1. *Toda álgebra de Heyting lineal totalmente ordenada es parcialmente inmersible en cualquier álgebra de Heyting totalmente ordenada infinita*

Corolario 4.2. *Una ecuación se satisface en toda álgebra de Heyting lineal si y sólo si se satisface en el álgebra $(\{0, 1\}, *_H, \rightarrow_H, 0)$.*

5. MV-álgebras

A comienzos de la década del 20, J. Łukasiewicz introdujo sistemas de lógica en los que las proposiciones admiten como valores de verdad números reales entre 0 y 1.

En realidad no consideró la t -norma $*_L$ del Ejemplo 3, sino que tomó como conectivos básicos la implicación y la negación, evaluados en $[0, 1]$ por las funciones \rightarrow_L y \neg_L , respectivamente.

Además conjeturó que todas las tautologías de este sistema podrían derivarse de los siguientes axiomas mediante la regla del modus ponens:

$$\begin{aligned} L_1 & \alpha \Rightarrow (\beta \Rightarrow \alpha), \\ L_2 & (\alpha \Rightarrow \beta) \Rightarrow ((\beta \Rightarrow \gamma) \Rightarrow (\alpha \Rightarrow \gamma)), \\ L_3 & (\neg \alpha \Rightarrow \neg \beta) \Rightarrow (\beta \Rightarrow \alpha), \\ L_4 & ((\alpha \Rightarrow \beta) \Rightarrow (\beta \Rightarrow \alpha)) \Rightarrow (\beta \Rightarrow \alpha). \end{aligned}$$

El lógico polaco M. Wajsberg afirmó haber probado esta conjetura de Łukasiewicz, pero no llegó a publicar su demostración. En 1958, A. Rose y B. Rosser [42] publicaron una demostración de la conjetura de Łukasiewicz, utilizando métodos sintácticos. En 1959, C. C. Chang [4] dio otra de-

mostración, basada en la teoría de las MV-álgebras, que había introducido el año anterior en [3]. La demostración de Chang utiliza la teoría de primer orden de los grupos abelianos ordenados. En 1993 [10] obtuvo una demostración basada en la teoría algebraica de los grupos abelianos reticulados. En 1995, G. Panti [40] publicó una demostración basada en métodos de geometría algebraica. Finalmente, en 1997 junto con D. Mundici [11] (ver también [18]) encontramos una demostración elemental y autocontenida de la conjetura de Łukasiewicz.

Observemos que para todo número natural $n \geq 2$, el conjunto de número racionales

$$L_n = \left\{ 0, \frac{1}{n-1}, \dots, \frac{n-2}{n-1}, 1 \right\}$$

es cerrado por las operaciones \rightarrow_L, \neg_L . Esto permite evaluar también los conectivos \Rightarrow y \neg en L_n , obteniendo así el cálculo proposicional n -valente de Łukasiewicz. Para $n = 2$, se obtiene el cálculo proposicional clásico.

El estudio algebraico de los sistemas finito-valentes de Łukasiewicz fue iniciado a comienzos de la década del 40 por G. Moisil [34, 35], quien introdujo las álgebras de Łukasiewicz n -valentes, que son retículos distributivos munidos con ciertas operaciones unarias (negación y modalidades).

Estas álgebras fueron estudiadas en detalle en mi tesis doctoral, presentada en la Universidad Nacional del Sur en 1969, bajo la dirección de A. Monteiro (ver [5, 6]). Si bien dan origen a una interesante teoría algebraica y Moisil las aplicó a la síntesis de circuitos, estas álgebras no se corresponden con la lógica n -valente de Łukasiewicz para $n > 4$. Las estructuras adecuadas son las álgebras de Łukasiewicz propias, que introduje a comienzos de los 80 [7, 8, 9]. Se obtienen agregando nuevas operaciones binarias de las álgebras de Łukasiewicz n -valentes. El interés de esta algebrización de los cálculos finito-valentes de Łukasiewicz es que permite presentarlos como extensiones del cálculo intuicionista. Moisil introdu-

jo también cálculos infinito-valentes, que aplicó a la formalización de la lógica borrosa (ver [36]). Una muy completa exposición de la teoría de las álgebras de Łukasiewicz, tanto finito como infinito valentes, se encuentra en [2].

En el segmento unitario real $[0, 1]$ podemos considerar una operación binaria \oplus_L , llamada *suma truncada*, definida por:

$$x \oplus_L y := \min(1, x + y). \quad (7)$$

Observemos que la operaciones \oplus_L y $*_L$ están relacionadas del modo siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Para } x, y \in [0, 1], \quad x \oplus_L y &= \neg(\neg x *_L \neg y) \\ y \quad x *_L y &= \neg(\neg x \oplus_L \neg y) \end{aligned} \quad (8)$$

Además, se tiene que:

$$x \rightarrow_L y = \neg x \oplus_L y \quad (9)$$

Estas observaciones motivan la siguiente definición de MV-álgebras:

Definición 5.1. Una *MV-álgebra* es un sistema $\langle A, \oplus, \neg, \perp \rangle$ tal que A es un conjunto no vacío, \oplus es una operación binaria sobre A , \neg es una operación unaria y \perp es un elemento de A , que satisfacen las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} MV_1 \quad x \oplus (y \oplus z) &= (x \oplus y) \oplus z \\ MV_2 \quad x \oplus y &= y \oplus x \\ MV_3 \quad x \oplus \perp &= x \\ MV_4 \quad \neg\neg x &= x \\ MV_5 \quad x \oplus \neg\perp &= \neg\perp \\ MV_6 \quad \neg(\neg x \oplus y) \oplus y &= \neg(\neg y \oplus x) \oplus x. \end{aligned}$$

En toda MV-álgebra A definimos el elemento \top y las operaciones binarias \odot , \ominus y \rightarrow como sigue:

$$\top := \neg\perp, \quad (10)$$

$$x \odot y := \neg(\neg x \oplus \neg y), \quad (11)$$

$$x \ominus y := x \odot \neg y. \quad (12)$$

$$x \rightarrow y := \neg x \oplus y. \quad (13)$$

Las relaciones dadas por (8) y (9) en el segmento $[0, 1]$ se pueden generalizar, como lo muestra el siguiente teorema, cuya demostración puede verse en [25, 43].

Teorema 5.2. Sea $A = \langle A, *, \rightarrow, \perp \rangle$ una BL-álgebra que satisface la ecuación

$$\neg\neg x = x. \quad (14)$$

Si para cada $x, y \in A$ definimos $x \oplus y := \neg(\neg x * \neg y)$, entonces $\langle A, \oplus, \neg, \perp \rangle$ es una MV-álgebra, y se tiene que $x \rightarrow y = \neg x \oplus y$.

Recíprocamente, si $\langle A, \oplus, \neg, \perp \rangle$ es una MV-álgebra y si definimos las operaciones binarias \odot y \rightarrow por las ecuaciones (11) y (13), respectivamente, entonces $\langle A, \odot, \rightarrow, \perp \rangle$ es una BL-álgebra que satisface la ecuación (14).

La importancia de las MV-álgebras va más allá de sus vinculaciones con la lógica borrosa. Esto se debe, principalmente, a que están fuertemente relacionadas con los grupos abelianos reticulados.

Recordemos que un *grupo abeliano reticulado*, o abreviadamente, *ℓ-grupo*, es un grupo conmutativo equipado con una estructura de retículo de modo que se satisfagan las siguientes condiciones de compatibilidad:

$$\begin{aligned} x + (y \vee z) &= (x \vee z) + (x \vee z) \quad y \\ x + (y \wedge z) &= (x + y) \wedge (x + z). \end{aligned} \quad (15)$$

Dado un ℓ-grupo G , indicaremos con \leq el orden derivado de la estructura reticular: $x \leq y$ si y sólo si $x = x \wedge y$. Denotaremos con G^+ y G^- al *cono positivo* y al *cono negativo* de G , respectivamente. Esto es $G^+ = \{x \in G : x \geq 0\}$, $G^- = \{x \in G : x \leq 0\}$. G es totalmente ordenado si y sólo si $G = G^+ \cup G^-$.

Diemos que $u \in G$ es una *unidad fuerte* si para todo $x \in G$ tal que $x > 0$, existe un número natural n tal que $x \leq nu$.

La teoría de los ℓ-grupos con unidad fuerte está estrechamente vinculada al estudio de las magnitudes. Un ejemplo importante está dado por el grupo aditivo de los números reales con su orden natural, que denotaremos por \mathbf{R} . La propiedad arquimediana de los reales nos dice que todo número real $u > 0$ es una unidad fuerte de \mathbf{R} . Denotaremos con \mathbf{Q} y \mathbf{Z} a los subgrupos

de \mathbf{R} formados por los números racionales y los números enteros, respectivamente. La teoría de los grupos reticulados (no necesariamente abelianos) está ampliamente desarrollada en las monografías [1, 22].

Dado un ℓ -grupo G y una unidad fuerte $u \in G$, con $[0, u]$ denotaremos al conjunto de los elementos que están entre 0 y u , esto es:

$$[0, u] = \{x \in G : 0 \leq x \leq u\}.$$

Si definimos las operaciones \oplus y \neg en $[0, 1]$ por las fórmulas:

$$x \oplus y = u \wedge (x + y)$$

y

$$\neg x = u - x,$$

entonces el sistema $\Gamma(G, u) = \langle [0, u], \oplus, \neg, 0 \rangle$ es una MV-álgebra.

Observemos que $\langle [0, 1], \oplus_L, \neg_L, 0 \rangle = \Gamma(\mathbf{R}, 1)$.

El resultado fundamental de la teoría de las MV-álgebras es que toda MV-álgebra es de la forma $\Gamma(G, u)$. Esto fue probado por Chang [4] para el caso de MV-álgebras totalmente ordenadas, y por Lacava [30] para el caso general. Mundici (a quién se debe la notación Γ) dio un resultado mucho más preciso en [39] (ver también [11, 13, 18]):

Teorema 5.3 Γ establece una equivalencia funtorial entre la categoría \mathcal{G} , cuyos objetos son los ℓ -grupos con una unidad fuerte destacada y cuyos morfismos son los homomorfismos de ℓ -grupos que preservan las unidades, y la categoría \mathcal{M} , formada por las MV-álgebras y los correspondientes homomorfismos.

A la luz del resultado anterior, las MV-álgebras pueden ser consideradas como una presentación ecuacional de los ℓ -grupos con unidad fuerte.

Sea G un ℓ -grupo totalmente ordenado. Un teorema de Gurevich y Kokorin [24] afirma que todo subconjunto finito $S \subset G$ es el dominio de un isomorfismo parcial de G en \mathbf{R} (para una demostración elemen-

tal y autocontenida de un resultado algo más general ver [14]). De este resultado, vía el funtor Γ , se obtiene que:

Lema 5.4. Toda MV-álgebra totalmente ordenada es parcialmente inmersible en $\langle [0, 1], *_L, \neg_L, 0 \rangle$.

Corolario 5.5 (Chang [4]) Una ecuación se satisface en toda MV-álgebra si y sólo si se satisface en el álgebra $\langle [0, 1], *_L, \rightarrow_L, 0 \rangle$.

Cabe señalar que Mundici descubrió otras aplicaciones de las MV-álgebras, al probar que están naturalmente relacionadas con el orden de Murray - von Neumann para las proyecciones en álgebras de operadores en el espacio de Hilbert [39, 19, 18], con la teoría de códigos a través de los juegos de Ulam [18, Chapter 5] y también con la teoría de desingularización de variedades tóricas [18, §9.2].

Utilizando resultados de MV-álgebras se caracterizó el espectro primo de los ℓ -grupos con unidad fuerte [15] (ver también [20]). En la tesis doctoral de N. G. Martínez se desarrolló una dualidad topológica para las MV-álgebras [31] y en la de D. Glushankof [23] se caracterizaron las MV-álgebras inyectivas.

6. PL-álgebras

Una PL-álgebra es una BL-álgebra A que satisface los dos axiomas siguientes:

$$A_7 \quad (\neg \neg z * ((x * z) \rightarrow (y * z))) \rightarrow (x \rightarrow y) = \top,$$

$$A_8 \quad x \wedge \neg x = \perp.$$

Estas álgebras fueron definidas por Hájek, Godo y Esteva en [27]. Es fácil verificar que $\langle [0, 1], *_P, \rightarrow_P, 0 \rangle$ es un ejemplo de PL-álgebra.

Consideramos la función $f: [0, 1] \rightarrow \mathbf{R}^- \cup \{-\infty\}$ definida del siguiente modo:

$$f(x) = \begin{cases} \log(x) & \text{si } x > 0 \\ -\infty & \text{si } x = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Esta función nos permite transferir la t -norma $*_P$ y su adjunta \rightarrow_P a la semirrecta negativa $\mathbf{R}^- \cup \{-\infty\}$.

$$u * v = \begin{cases} u + v & \text{si } u > -\infty, v > -\infty \\ -\infty & \text{en caso contrario.} \end{cases}$$

$$u \rightarrow v = \begin{cases} 0 & \text{si } u \leq v \\ v - u & \text{si } u > v > -\infty \\ -\infty & \text{si } u > v = -\infty. \end{cases}$$

$$\neg u = u \rightarrow -\infty = \begin{cases} 0 & \text{si } u = -\infty \\ -\infty & \text{si } u > -\infty. \end{cases}$$

Esta observación sugiere la siguiente forma de obtener PL-álgebras.

Sea G un ℓ -grupo y \perp un elemento no perteneciente a G . En el conjunto $G \cup \{\perp\}$ definimos las operaciones binarias $*$ y \rightarrow como sigue:

$$x * y = \begin{cases} x + y & \text{si } x, y \in G^-, \\ \perp & \text{en caso contrario,} \end{cases}$$

y

$$x \rightarrow y = \begin{cases} 0 \wedge (y - x) & \text{si } x, y \in G^-, \\ 0 & \text{si } x = \perp, \\ \perp & \text{si } x \in G^- \text{ e } y = \perp \end{cases}$$

Es fácil verificar que $\langle G \cup \{\perp\}, *, \rightarrow, \perp \rangle$ es una PL-álgebra, que denotaremos por $\mathcal{P}(G)$.

El siguiente teorema fue demostrado en [16]:

Teorema 6.1 *Sea A una PL-álgebra. Existe un ℓ -grupo G tal que A es isomorfa a $\mathcal{P}(G)$ si y sólo si A satisface la siguiente condición:*

(c) *Para todo $z \neq \perp$, $\neg z = \perp$.*

En este caso, el ℓ -grupo G es único a menos de isomorfismos.

Como toda PL-álgebra totalmente ordenada satisface la condición (c) del teorema anterior, podemos utilizar nuevamente el Teorema de Gurevich y Kokorin mencionado en la sección anterior y la inversa de la función f definida por (16) para obtener el siguiente resultado, enunciado inicialmente por Hájek:

Lema 6.2 *Toda PL-álgebra totalmente ordenada es parcialmente inmersible en $\langle [0, 1]_*, \rightarrow, 0 \rangle$.*

Más información sobre la estructura de las PL-álgebras puede verse en [16].

7. La estructura de las BL-cadenas

Estamos ahora en condiciones de generalizar el teorema de estructura visto en §1 para t -normas continuas al caso de las BL-cadenas.

Comenzaremos observando que si u, v son elementos idempotentes con respecto a la operación $*$ de una BL-cadena C , entonces el conjunto

$$[u, v] = \{x \in C : u \leq x \leq v\}$$

con las operaciones $*$, \rightarrow_{uv} definidas por $x \rightarrow_{uv} y = v \wedge (x \rightarrow y)$, y $\perp = u$ deviene una BL-cadena, que denotaremos por $[u, v]_C$.

La siguiente construcción, debida a Hájek [26], es crucial para comprender la estructura de las BL-cadenas.

Definición 7.1 Sean $(C_i, *_i, \rightarrow_i, \perp_i)$, $i = 1, 2$, dos BL-cadenas, y para simplificar las notaciones, supongamos que $\perp_1 = \perp_2$ y $(C_1 \setminus \{\perp_1\}) \cap (C_2 \setminus \{\perp_2\}) = \emptyset$. La suma ordinal $C_1 \sqcup C_2 = (C_1 \cup C_2, *, \rightarrow, \perp, \top)$ es una nueva BL-cadena cuyas operaciones $*$, \rightarrow están definidas como sigue:

$$x * y = \begin{cases} x *_i y & \text{si } x, y \text{ están en } C_i, i = 1, 2, \\ x \wedge y & \text{si } x \in C_i, y \in C_j \text{ e } i \neq j. \end{cases}$$

$$x \rightarrow y = \begin{cases} \top_2, & \text{si } x \leq y \\ x \rightarrow_i y, & \text{si } x > y \text{ y } x, y \in C_i, i = 1, 2 \\ y, & \text{si } x > y \text{ y } x \in C_2, y \in C_1 \end{cases}$$

La definición de la operación \square se extiende de modo natural para más de dos componentes.

Ejemplo 4 (Hájek [26]) Sea $C = [0, 2]$ con su orden natural como subconjunto de \mathbb{R} y equipado con las operaciones $*$ y \rightarrow definidas del modo siguiente:

$$x * y = \begin{cases} 1 + (x - 1)(y - 1) & \text{si } x, y \in (1, 2] \\ x & \text{si } x \in [0, 1] \text{ e } y \in (1, 2] \\ (x + y - 1) \vee 0 & \text{si } x, y \in [0, 1] \end{cases}$$

$$x \rightarrow y = \begin{cases} 2 & \text{si } x \leq y, \\ \frac{y-1}{x-1} + 1 & \text{si } x > y \text{ y } x, y \in (1, 2] \\ y & \text{si } x > y, x \in (1, 2] \text{ e } y \in [0, 1] \\ 1-x+y & \text{si } x > y \text{ y } x, y \in [0, 1] \end{cases}$$

Se tiene que 1 es un idempotente de C y que $C = [0, 1]_C \cup [1, 2]_C$. Notemos que $[0, 1]_C$ es la MV-álgebra $\langle [0, 1], *_L, \rightarrow_L, 0 \rangle$ y que $[1, 2]_C$ es una PL-álgebra isomorfa a $\langle [0, 1] *_P, \rightarrow_P, 0 \rangle$.

La siguiente noción también se debe a Hájek [26].

Definición 7.2 Sea C una BL-cadena. Un par de subconjuntos de C , (X, Y) se dice una *cortadura* en C si y sólo si se satisfacen las siguientes condiciones:

- C_1 $X \cup Y = C$.
- C_2 $x \leq y$, para todo $x \in X$ e $y \in Y$,
- C_3 Y es cerrado por $*$,
- C_4 $x * y = x$, para todo $x \in X$ e $y \in Y$.

Ejemplo 5 Sea C una BL-cadena, u un elemento idempotente de C tal que $\perp < u < \top$, y consideremos los conjuntos $X = \{x \in C \mid x < u\}$, $\bar{X} = X \cup \{u\}$, $Y = \{x \in C \mid x > u\}$ e $\bar{Y} = Y \cup \{u\}$. Entonces (\bar{X}, \bar{Y}) , (X, \bar{Y}) y (\bar{X}, Y) son ejemplos de cortaduras en C .

Las cortaduras del tipo indicado en el ejemplo anterior se dicen *determinadas por el idempotente u* . Si C es la cadena del Ejemplo 4, es fácil verificar que $C' = C \setminus \{1\}$ es una subálgebra de C . El par $([0, 1], (1, 2])$ es una cortadura en C' que no está determinada por un idempotente. Esto motiva la siguiente definición.

Definición 7.3 Una BL-cadena C se dice *saturada* si toda cortadura (X, Y) en C está determinada por un idempotente de C .

Teorema 7.4 (Hájek [26]) Toda BL-cadena C se puede incluir isomórficamente en una BL-cadena saturada \bar{C} , de modo que C sea densa en \bar{C} , esto es, para todo par de idempotentes $u < u'$ in $\bar{C} \setminus C$, existe $x \in C$ tal que $u < x < u'$.

El siguiente lema está probado en [21].

Lema 7.5 Sea C una BL-cadena saturada y sea E el conjunto de los elementos idempotentes para la operación $*$ de C . Se tiene que:

- (i) Todo subconjunto $A \subseteq E$ tiene sup e inf en C , y ambos pertenecen a E .
- (ii) Para todo $c \in E$ existe el mayor intervalo cerrado $[a, b] \subseteq E$ tal que $c \in [a, b]$.
- (iii) Para cada $x \in C \setminus E$ existe un intervalo cerrado $[a, b]$ tal que $x \in [a, b]$ y $[a, b] \cap E = \{a, b\}$.

Vamos a denotar por $I(E)$ al conjunto de los intervalos definidos en (iii) del lema anterior, esto es, $I(E) = \{[a, b] \mid a, b \in E, a < b, (a, b) \cap E = \emptyset\}$. Además en $G(E)$ denotaremos al conjunto de los intervalos propios (o sea, no reducidos a un elemento) definidos en (ii) y escribimos $E_u = E \setminus (I(E) \cup G(E))$. Con estas notaciones podemos enunciar el teorema fundamental de la estructura de las BL-cadenas, que generaliza al visto en §1 para t-normas continuas. Este teorema fue probado por Hájek [26], pero con el agregado de hipótesis adicionales, que se demostraron innecesarias en [21].

Teorema 7.6 Sea C una BL-cadena saturada e I el conjunto definido por

$$I = \{a \in C : a \in E_u \text{ o existe } b \in C \text{ tal que } [a, b] \in I(E) \cup G(E)\},$$

totalmente ordenado por el orden heredado de la cadena C . Para cada $a \in I$, sea M_a o bien $[a, a]$, si $a \in E_u$, o la correspondiente álgebra $[a, b]_C$ para cada $[a, b] \in I(E) \cup G(E)$, en el otro caso. Entonces, $C = \bigcup_{a \in I} M_a$. Para $[a, b] \in G(E)$, $[a, b]_C$ es un álgebra de Heyting lineal. Cuando $[a, b] \in I(E)$, entonces $[a, b]_C$ es o bien una MV-álgebra o bien una PL-álgebra.

8. La completitud de la Lógica Borrosa Básica

A la luz del Teorema 3.4 y del Lema 3.6, para probar la completitud de los axiomas de la lógica borrosa básica con respecto a las t-normas continuas es suficiente probar que toda BL-cadena es inmersible en una BL-cadena del tipo $\langle [0, 1], *, \rightarrow, 0 \rangle$,

donde $*$ es una t-norma continua y \rightarrow su adjunta. Además, del Teorema 7.4 resulta que podemos limitarnos a considerar BL-cadenas saturadas.

Sea entonces C una BL-cadena saturada y S un subconjunto finito de C conteniendo los elementos \perp y \top . Por el Teorema 7.6, $C = \bigcup_{a \in I} M_a$, y como S es finito, podemos encontrar un número finito de elementos de I , digamos a_{i_0}, \dots, a_{i_n} , tal que $S \subseteq D = \bigcup_{j=0}^n M_{a_{i_j}}$. Sean r_0, \dots, r_{n+1} números racionales tales que $0 = r_0 < r_1 < \dots < r_n < r_{n+1} = 1$. Podemos definir entonces sobre el segmento unitario real $[0, 1]$ una t-norma continua $*$ de modo que su restricción a cada uno de los intervalos $[r_j, r_{j+1}]$ resulte equivalente a $*_H$, $*_F$ o $*_L$ según que $M_{a_{i_j}}$ sea un álgebra de Heyting lineal, una PL-álgebra o una MV-álgebra, para $j = 0, 1, \dots, n$. Ahora teniendo en cuenta los Lemas 4.1, 5.4 y 6.2 se puede probar el siguiente teorema:

Teorema 8.1 *Sea C una BL-cadena saturada y S un subconjunto finito de C conteniendo los elementos \perp y \top . Entonces existe una t-norma continua $*$ que admite una inmersión parcial de C en $([0, 1], *, \rightarrow, 0)$ con dominio S .*

Corolario 8.2 (Teorema de completitud de la Lógica Básica) *Toda tautología de la Lógica Difusa Básica es demostrable a partir de los axiomas $T_1 - T_7$ mediante la regla del modus ponens.*

Para finalizar, me gustaría hacer algunas consideraciones sobre la representación de las proposiciones en lógicas polivalentes.

Es bien sabido que las proposiciones de la lógica clásica se pueden representar como funciones booleanas, esto es, funciones de $\{0, 1\}$ en $\{0, 1\}$. Esto a su vez permite la representación de las proposiciones por circuitos en serie y en paralelo, y por consiguiente su implementación computacional. Es natural buscar una representación análoga para las lógicas polivalentes.

Uno de los primeros resultados en esta dirección se debe a McNaughton [32], quien probó que las proposiciones de la lógica infinito-valente de Łukasiewicz que se

pueden construir con n variables proposicionales están en correspondencia con las funciones de $[0, 1]^n$ en $[0, 1]$ que son continuas (con la topología natural del hipercubo real n -dimensional) y lineales a trozos, con coeficientes enteros. La demostración dada por McNaughton es no constructiva. Una demostración constructiva fue dada por Mundici (ver [18], donde se pueden ver también las representaciones de las proposiciones para los cálculos finito-valentes de Łukasiewicz). Representaciones funcionales para las proposiciones de la lógica intuicionista lineal y la lógica producto fueron obtenidas en [29] y en [16], respectivamente. Aún falta encontrar una caracterización funcional para las proposiciones de la Lógica Borrosa Básica, o, en términos algebraicos, una descripción de las BL-álgebras libres.

También está faltando una teoría satisfactoria de la cuantificación en lógica polivalente.

Referencias

- [1] Bigard, A., Keimel, K. and Wolfenstein, S. *Groupes et anneaux réticulés*, Lectures Notes in Mathematics, v. 108, Springer-Verlag, New York - Heidelberg - Berlin (1977).
- [2] Boicescu, V., Filipoiu, A., Georgescu, G. and Rudeanu, S. *Łukasiewicz-Moisil Algebras*. North-Holland, Amsterdam (1991).
- [3] Chang, C. C. *Algebraic analysis of many-valued logics*, Trans. Amer. Math. Soc. 88 (1958), 467-490.
- [4] Chang, C. C., *A new proof of the completeness of the Łukasiewicz axioms*, Trans. Amer. Math. Soc., 93 (1959), 74-90.
- [5] Cignoli, R., *Moisil algebras*, Notas de Lógica Matemática N° 27, Instituto de Matemática, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, (1970).
- [6] Cignoli, R., *Representation of Łukasiewicz and Post algebras by continuous functions*, Colloquium Mathematicum 24 (1972), 127-138.
- [7] Cignoli, R. *Some algebraic aspects of many-valued logics*. En: Third Brazilian Conference on Mathematical Logic, Recife, (1979). Edited by A. I. Arruda, N. C. A. da Costa, A. M. Sette. Sociedade Brasileira de Lógica, São Paulo, (1980), p. 49-69.

- [8] Cignoli, R., *Proper n -valued Łukasiewicz algebras as S -algebras of Łukasiewicz n -valued propositional calculi*, *Studia Logica* 41 (1982), 3-16.
- [9] Cignoli, R. *An algebraic approach to elementary theories based on n -valued Łukasiewicz logics*, *Zeitschrift für math. Logik und Grundlagen der Mathematik*, 30 (1984), 87-96.
- [10] Cignoli, R. *Free ordered abelian groups and varieties of MV-algebras*. In: IX Latin American Symposium on Mathematical Logic, Bahía Blanca, (1993) p. 113-118. (*Notas de Lógica matemática, v. 38, part D*).
- [11] Cignoli, R. and Mundici, D. *An elementary proof of Chang's completeness theorem for the infinite-valued calculus of Łukasiewicz*, *Studia Logica* 58 (1997), 79-97.
- [12] Cignoli, R. and Mundici, D. *An invitation to Chang's MV-algebras*. In Conference on Algebra and Model Theory, Dresden 1995 (Droste M. and Göbel, R., Editors). Gordon and Breach, Amsterdam, (1997), pp. 171-197.
- [13] Cignoli, R. and Mundici, D. *An elementary presentation of the equivalence between MV-algebras and ℓ -grupos with strong unit*, *Studia Logica* 61, 49-64.
- [14] Cignoli, R. and Mundici, D. *Partial isomorphisms of totally ordered abelian groups and Hájek's completeness theorem for Basic Logic*, *Multiple-Valued Logic*.
- [15] Cignoli, R. and Torrens, A. *The poset of prime ℓ -ideals of an abelian ℓ -group with a strong unit*, *Journal of Algebra* 184 (1996), 604-612.
- [16] Cignoli, R. and Torrens, A. *An algebraic analysis of Product Logic*, *Multiple-Valued Logic*, 5 (2000), 45-65.
- [17] Cignoli, R., D'Ottaviano, I.M.L. and Mundici, D. *Algebras das lógicas de Łukasiewicz*, Coleção CLE, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, (1994).
- [18] Cignoli, R., D'Ottaviano, O.M.L. and Mundici, D. *Algebraic foundations of many-valued reasoning*, Kluwer, Dordrecht-Boston - London, (2000).
- [19] Cignoli, R., Elliott, G. A. and Mundici, D. *Reconstructing C^* -algebras from their Murray von Neumann orders*, *Advances in Mathematics* 101 (1993), 166-179.
- [20] Cignoli, R., Gluschankof, D. and Lucas, F. *Prime spectra of lattice-ordered abelian groups*, *Journal of Pure and Applied Algebra* 136 (1999), 217-229.
- [21] Cignoli, R., Esteve, F., Godo, L. and Torrens, A. *Basic Fuzzy Logic is the logic of continuous t -norms and their residua*, *Soft Computing* 4 (2000), 106-112.
- [22] Darnel, M. R. *Theory of lattice-ordered groups*, Marcel Dekker Inc, New York - Basel - Hong Kong, 1995.
- [23] Gluschankof, D. *Prime deductive systems and injective objects in the algebras of Łukasiewicz infinite-valued calculi*, *Algebra Universalis* 29 (1992), 354-377.
- [24] Gurevich, Y. S. and Kokorin, A. I. *Universal equivalence of ordered abelian groups* (en ruso), *Algebra i Logica*, 2 (1963), 37-39.
- [25] Hájek, P. *Metamathematics of Fuzzy Logic*, Kluwer, Dordrecht - Boston - London, (1998).
- [26] Hájek, P. *Basic fuzzy logic and BL-algebras*, *Soft Computing* 2 (1998), 124-128.
- [27] Hájek, P., Godo, L. and Esteve, F. *A complete many-valued logic with product conjunction*, *Arch. Math. Logic* 35 (1996), 191-208.
- [28] Horn, A. *Logic with truth values in a linearly ordered Heyting algebra*, *Journal of Symbolic Logic* 34 (1969), 395-408.
- [29] Horn, A. *Free L-algebras*, *Journal of Symbolic Logic* 34 (1969), 475-480.
- [30] Lacava, F. *Alcune proprietà delle L -algebre e delle E -algebre essenzialmente chiuse*, *Bolletino Unione Matematica Italiana, A* (5) 16 (1979), 119-133.
- [31] Martínez, N. G. *The Priestley duality for Wajsberg algebras*, *Studia Logica* 49 (1990), 31-46.
- [32] McNaughton, R. *A theorem about infinite-valued sentential logic*, *Journal of Symbolic Logic* 16 (1951), 1-13.
- [33] Menu, J. and Pavelka, J. *A note on tensor products on the unit interval*, *Comm. Math. Univ. Carolinae* 17 (1976), 71-83.
- [34] Moisil, G. *Recherches sur les logiques nonchrysippiennes*, *Annales Scientifiques de l'Université de Jassy*, 26 (1940), 431-436. Reproducido en [36, p. 195-232].
- [35] Moisil, G. *Notes sur les logiques nonchrysippiennes*, *Annales Scientifiques de l'Université de Jassy*, 27 (1941) 9, 86-98. Reproducido en [36, p. 233-243].
- [36] Moisil, G. *Essays sur les logiques nonchrysippiennes*. Académie de la République Socialiste de Roumanie, Bucharest, 1971.
- [37] Monteiro, A. *Linéarisation de la logique positive de Hilbert Bernays*, *Revista de la Unión Matemática Argentina* 20 (1962), 308-309.

- [38] Monteiro, A. *Sur les algèbres de Heyting symétriques*, Portugaliae Mathematica 39 (1980), 1-237.
- [39] Mundici, D. *Interpretation of AF C^* -algebras in Łukasiewicz sentential calculus*, Journal of Functional Analysis 65 (1986), 15-63.
- [40] Panti, G. *A geometric proof of the completeness of Łukasiewicz calculus*, Journal of Symbolic Logic, 60 (1993), 563-578.
- [41] Rasiowa, H. and Sikorski, R. *The mathematics of metamathematics*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warsaw, 1963.
- [42] Rose, A. and Rosser, B. J. *Fragments of many-valued statement calculi*, Transactions of the American Mathematical Society, 87 (1958), 1-53.
- [43] Turunen, E. *Mathematics behind fuzzy logic*, Physica-Verlag, Heilderberg - New York, 1999.
- [44] Zadeh, L.A. *Fuzzy sets*, Information and Control 8 (1965), 338-353.

Manuscrito recibido y aceptado en diciembre de 2000.

PRESENTACIÓN DEL ING. EDUARDO NUÑEZ COMO ACADÉMICO TITULAR

Arnoldo J. L. Bolognesi

Académico Titular de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

El Ing. Eduardo Nuñez nació en Gualeguay, provincia de Entre Ríos, el 25 de abril de 1933, en el seno de una familia presidida por un inmigrante español, en un ambiente con elevados principios, tanto en el comportamiento como en el conocimiento. Su madre, argentina descendiente de españoles, tenía una educación artística superior que naturalmente se reflejaba en el ambiente hogareño.

Ese espíritu influyó decisivamente en todos sus hijos. El Ing. Nuñez es un producto de su hogar y de la educación pública primaria, secundaria y universitaria de la Argentina de su niñez y juventud. La escuela primaria y secundaria la realizó en Gualeguay, mientras que su educación universitaria, en la Universidad Nacional de La Plata. Fue un alumno distinguido en toda su carrera, e interesado, además, en temas de cultura general como la historia y la filosofía.

Pertenece a una generación universitaria de su familia. Su esposa ha sido profesora universitaria, sus hijos son graduados o estudiantes universitarios y sus hermanos han participado en forma activa en la vida universitaria.

El Ing. Nuñez obtuvo el premio de esta Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales en 1993.

Presentación realizada el 28 de mayo de 1999.

A continuación se hace un resumen de su curriculum vitae.

Ingeniero Civil, Universidad Nacional de La Plata, en 1957.

Estudios de posgrado

Beca de la Dirección General de Relaciones Exteriores de España para realizar estudios de Construcciones Hidráulicas de Hormigón y Presas de Tierra, de un año de duración (1957/1958). Esta fue una excelente oportunidad, pues coincidió con un gran programa de aprovechamientos hidráulicos en España. Esta beca fue complementada con visitas técnicas a obras de Italia y Francia.

Participante del Soil Mechanics Program for Practicing Engineers and Teachers, en Harvard University (1969). Duración, un semestre universitario con exámenes finales pasados con distinción. Director del curso, profesor doctor Arturo Casagrande.

Participante de cursos de menor duración sobre temas específicos en el país y en el extranjero.

Antecedentes docentes universitarios destacados

El Ing. Nuñez ha llegado a los niveles superiores: profesor titular en dos universidades de primera línea en la Argentina -la Universidad de Buenos Aires y la Universidad Católica Argentina-, en ambas, mediante concursos ganados en todos los escalones de la carrera universitaria.

Jefe de trabajos prácticos de Mecánica de Suelos y Fundaciones, de 1959 a 1965, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires. Profesor regular adjunto de Mecánica de Suelos, desempeñándose en las respectivas cátedras de Mecánica de Suelos y Fundaciones o Geotécnica, de 1965 a 1980, en esa Facultad. Profesor titular regular por concurso de Mecánica de Suelos y Fundaciones, de 1982 a 1998, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires.

Profesor protitular de Mecánica de Suelos y Fundaciones, de 1973 a 1975, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica Argentina.

Profesor titular ordinario de Mecánica de Suelos y Fundaciones, de 1976 a 1998, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica Argentina.

Además, profesor de los cursos, por invitación, organizados por el Centro Argentino de Ingenieros, y de graduados, organizados por universidades argentinas en el período de difusión de la Mecánica de Suelos.

Integrante de jurados en los concursos para profesores regulares de la especialidad en la Universidad de Buenos Aires, La Plata, Córdoba, Bahía Blanca, Rosario y Centro.

Trabajos de investigación

Toda obra de ingeniería geotécnica requiere una investigación, como mínimo, experimental. Es en el campo específico de la Mecánica de Suelos y la de Rocas, ciencias básicas de la ingeniería geotécnica, donde se producen las contribuciones más trascendentes.

El Ing. Nuñez es autor y coautor de 50 trabajos publicados en la Argentina y en reuniones y congresos panamericanos e internacionales.

Sus trabajos reflejan su actividad como un prestigioso especialista en ingeniería geotécnica, con una importante actuación en la docencia universitaria y una mente cuestionadora de conceptos técnico-científicos aceptados.

Los temas de investigación a los que ha dedicado una parte importante de su tiempo son las relaciones entre tensiones y defor-

maciones de los materiales suelos o rocas y su interacción con otros materiales estructurales. También sus conexiones con las ecuaciones constitutivas correspondientes. Su labor ha sido la de un pionero de estos estudios en la ingeniería geotécnica argentina.

Actividad profesional

El Ing. Nuñez ha desarrollado toda su actuación profesional en la actividad privada, totalmente dedicado a la especialidad. Tiene 42 años de ingeniero civil y en tan largo tiempo lo ha hecho en todos los tipos de obras que requieren la ingeniería geotécnica. Su participación ha sido particularmente importante y trascendente en las obras hidráulicas y en las fundaciones complejas, en las cuales se mantiene activo en la actualidad.

Por ejemplo, es el autor del proyecto y el consultor principal de una de las dos presas de su tipo en construcción en este momento en el país: sobre el río Nogolí, en la provincia de San Luis.

A la catedral de La Plata, obra de gran importancia arquitectónica y monumento histórico, le han faltado, hasta ahora, sus dos grandes torres, de más de 100 metros de altura, las cuales requieren un esfuerzo de sus fundaciones. El Ing. Nuñez, conjuntamente con el Ing. Trevisán, desarrollaron el proyecto y la dirección de la solución adoptada, en avanzado estado de ejecución. Como proyecto de ingeniería es original y ha sido complementado con investigaciones con alcance científico.

Reconocimiento dentro y fuera de la Argentina

Ha sido presidente de la Sociedad Argentina de Mecánica de Suelos y es particularmente estimado en el círculo de ingenieros sudamericanos y desempeñado los cargos distinciones que se asignan en los congresos argentinos, panamericanos y mundiales, como el de organizador y jefe de sesiones, relator general, panelista, evaluador. Su interés y su labor más trascendente ha sido en el país.

Es un consejero permanente de la Sociedad Argentina de Ingeniería Geotécnica y uno de los más frecuentes aportantes de artículos técnicos científicos al Boletín de la

misma, tanto propios como los de sus alumnos, a los que ha estimulado a realizar trabajos de investigación con posibilidades de aplicación.

Con el Ing. Nuñez se completan las incorporaciones realizadas en la década del '90. Son cinco que en un plazo breve influirán decisivamente en la conducción de la Sección de Ingeniería. Estos ingenieros, a quienes la Academia ha otorgado la alta distinción de pertenecer a ella, tienen una larga experiencia en la solución de problemas de ingeniería, particularmente en las fases de proyecto y de consultoría durante la construcción, tienen, o han tenido hasta recientemente, una importante vinculación con la Universidad, todos son o han sido profesores titulares de sus especialidades en universidades argentinas de primera línea, han efectuado contribuciones al conocimiento a través de sus publicaciones técnico-científicas y han demostrado su interés por el buen funcionamiento de la Acade-

mia cumpliendo con las exigencias de la misma.

Estas precisiones son pertinentes pues la educación para la ingeniería despierta vocaciones que se extienden desde el ingeniero empresario, creador de empleos, hasta el atraído esencialmente por problemas teóricos.

Ing. Nuñez, desde este momento es usted Académico Titular de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales con los derechos y obligaciones propios de este elevado cargo. Estoy seguro que lo desempeñará con dedicación y que adicionará su aporte al brillo que los ingenieros que lo han precedido han procurado agregar al gran prestigio que ha conquistado en el mundo académico.

A continuación tendremos el gusto de escuchar la disertación que usted va a exponer en esta casa, que a partir de hoy es también suya.

INVESTIGACIÓN APLICADA EN LA INGENIERÍA GEOTÉCNICA

Eduardo Nuñez

Ingeniero Civil. Profesor de la Universidad de Buenos Aires.

Resumen

En el campo de la Ingeniería Geotécnica cada problema debe resolverse a partir de una investigación previa para establecer las condiciones mecánicas e hidráulicas del subsuelo o de la formación rocosa. Esta investigación debe ejecutarse en el terrero y en el laboratorio para obtener los parámetros que se emplean en los estudios analíticos, aplicando las técnicas usuales o desarrollando nuevos procedimientos de cálculo. En esta presentación se incluyen algunos casos que cubren un espectro amplio de problemas geotécnicos donde fueron aplicados los métodos propios de la Mecánica de Suelos y Rocas.

Palabras clave: Investigación geotécnica; mejoramiento del terreno de fundación; pilotes; túneles; presas.

Abstract

In Geotechnical Engineering each problem must be solved with a previous investigation to establish the mechanical and hydraulics subsoil (or rock formation) conditions. This investigation should be performed on site and in the laboratory to obtain the parameters to be used in the analytical studies, applying current technics or developing new procedures of calculations. In this presentation are included some cases that cover a wide spectrum of geotechnical problems where the Soil and Rock Mechanics methods were applied.

Key words: Geotechnical investigation; improvement of soil foundation; piles; tunnels; dams.

Para la presentación de esta disertación, el autor consideró el auditorio a quien estaba dirigida, constituido por familiares y amigos no versados en el geotecnia, por colegas de la ingeniería civil y por especialistas y profesores en el campo específico de los temas

Conferencia pronunciada en su incorporación como Académico Titular, el 28 de mayo de 1999.

en consideración. La opción fue una presentación panorámica sobre aspectos de la investigación y de la aplicación de la geotecnia, ilustrada por numerosas diapositivas que mostraban con claridad distintas etapas de las obras a que se hacía referencia, en las cuales el autor tuvo intervención decisiva. En el texto se señala como "nota 1" cuando estas diapositivas eran presentadas, las cuales, por razones de espacio, no pueden incluirse aquí.

Introducción

La investigación científica que estudia los fenómenos del mundo de la naturaleza física requiere que sus teorías o interpretaciones del por qué, el cómo y el cuándo de los acontecimientos puedan ser verificados experimentalmente. El método para adquirir, acumular y desarrollar el conocimiento del mundo físico admite dos posibilidades aparentemente contradictorias: una es el de la observación primaria del hecho seguido por el intento de explicación o interpretación del mismo que permita, bajo iguales circunstancias, poder repetirlo; otra es formular algún tipo de hipótesis sobre la factibilidad que un hecho acaezca, producirlo realmente y establecer una interpretación de las causas concurrentes, el análisis de las mismas y la implementación de una operatoria que posibilite su repetición. De cualquier manera, y siguiendo distintos caminos, siempre se pretende establecer una teoría que permita la predicción de un evento físico. Por tanto, la investigación científica requerirá, en todos los casos, una validación experimental del hecho que se estudia.

Sin embargo, el alcance de esta definición resulta insatisfactoria si se considera el inmenso campo de la investigación matemática, que trabaja exclusivamente con elementos formales o entes de razón para los cuales en principio no se requiere ningún soporte material. La insuficiencia de la primera definición queda de manifiesto justamente en el campo básico que opera la ingeniería, en donde el lenguaje que permite su desarrollo es precisamente la matemática. El progresivo conocimiento del mundo físico, del mundo material, requiere de las matemáticas porque ellas pueden operar sobre el accidente propio de la materia, que es la cantidad, la cual puede ser medida, pesada, proporcionada y observada en su evolución temporal. La investigación científica entonces, no solamente cubre el campo en donde se estudian los primeros cómo y cuándo de los fenómenos, sino también su posibilidad de repetirlos o impedirlos; esto conduce de inmediato a la aplicación de este conocimiento en lo que se ha dado en llamar las ciencias aplicadas. El desarro-

llo de métodos, procedimientos y operatorias permite la obtención de tecnologías que suman diferentes técnicas para el logro de productos creados por el arte humano. Estas tecnologías emplearán instrumentos, herramientas o procesos que generalmente hoy se denomina "la industria", y cuyo campo de acción cubre todas las actividades que el hombre realiza en su espacio físico. En la frontera en donde se desarrollan en forma directa las transformaciones que produce el hombre en su ambiente natural opera la ingeniería. En particular, la ingeniería civil se ocupará del aprovechamiento y control del espacio y su transformación a través de las construcciones de estructuras, obras hidráulicas, facilidades para el transporte, etc.

Entre los materiales que emplea la ingeniería civil para sus obras están los suelos y las rocas; a su vez, sus construcciones las apoya sobre los suelos y las rocas, en estado natural o previamente modificados según técnicas especiales. Al cambiar las morfologías naturales debe establecer geometrías estables de tipo permanente que se manifiestan en cavernas, túneles, cortes en laderas, excavaciones generales, terraplenes o estructuras de retención de suelos y rocas, los cuales pueden requerir estabilidad a corto o largo plazo, condiciones que caracterizan las construcciones temporarias o permanentes. Este campo denominado Mecánica de Suelos y/o Cimentaciones, recibe hoy día el nombre genérico de Geotécnica, materia que se ocupa de estudiar las características mecánicas e hidráulicas de los suelos y rocas como materiales de fundación y/o construcción. Es corriente afirmar que en la ingeniería civil cada obra es un prototipo, por lo cual debe ser estudiada y resuelta para cada caso y de acuerdo con sus dificultades propias. En el campo de la Geotécnica esta característica es tan marcada que obliga en cada circunstancia efectuar una verdadera investigación sobre las propiedades de los macizos naturales, los materiales que los constituyen, su estructuración particular y, además, las técnicas a que deberá recurrirse para su adecuado manejo y poder obtener así el objetivo buscado. El proyecto en el campo de la geotécnica requiere ineludiblemente la investigación apropiada

para establecer eventualmente nuevas teorías o ampliar las ya disponibles con el fin de formular una predicción sobre el comportamiento de la cimentación, de la estructura de materiales sueltos o del "hueco" que resulte de excavaciones a cielo abierto o subterráneas. Por tanto, el ingeniero que se desempeña en el campo de la geotecnia necesitará de la investigación en el terreno, en el laboratorio y la especulación en el gabinete para poder "predecir" con éxito sobre el comportamiento mecánico o hidráulico de los suelos y/o rocas involucrados en su diseño. El ingeniero deberá tomar una decisión teniendo como base su predicción; citando a Indalecio Gómez, el redactor de nuestra vieja "ley Sáenz Peña", cuando hablaba del acto de la decisión política: "Esta es, siempre, una opción entre dificultades". El ingeniero, a diferencia del científico, siempre tiene plazos perentorios, y sus decisiones son "opciones entre dificultades", y requieren también -siempre- del coraje para ejecutar lo que el razonamiento y la experiencia le muestran como más acertado.

Geotecnia... no sólo en el Planeta Tierra

El campo de conocimiento que llamamos geotecnia, también cubre requerimientos de estabilidad que deben cumplimentar otras estructuras eventualmente construidas u operando fuera de la Tierra. Por ejemplo, en ocasión de tener que diseñar, dentro del Programa Apollo 11, las formas estructurales de las placas de apoyo para el alunizaje del módulo lunar, debió efectuarse una cuidadosa revisión de todas las investigaciones disponibles sobre el comportamiento de materiales granulares incoherentes. Adicionalmente se efectuó un amplio programa de investigación de laboratorio y gabinete para simular las condiciones hipotéticamente esperables en la superficie lunar. Las diapositivas que se muestran corresponden al informe de los ingenieros científicos norteamericanos (*nota 1*), en donde se aprecian las huellas del calzado del astronauta que son la impronta de un verdadero "ensayo de carga superficial"; del astronauta en plena tarea de obtener muestras del material que constituye la superficie de la Luna; del

aparataje empleado en estos trabajos de "perforador" (una repetición -en su escala- de lo que se efectúa diariamente en todo el mundo durante las etapas similares de un "estudio de suelos"); la placa de base correspondiente a una de las patas del módulo en donde se aprecia el hundimiento producido; y de una "muestra" del suelo lunar en el interior del tubo sacatestigos. El material granular recuperado está constituido por partículas tamaño predominantemente arenas finas limosas que poseen una pequeña cohesión. La composición individual de las mismas es diferente a las comunmente encontradas en nuestro planeta, pero sus características mecánicas son similares a las de los suelos con granulometría parecida. El hundimiento de las placas base fue del orden de 1" a 3", correspondiente a una presión estática de 0,5 Tn/m² a 1,5 Tn/m². Al tiempo que el astronauta camina sobre la superficie describe los efectos sensibles que produce su peso, en lo que podríamos denominar un informe geotécnico oral en "tiempo real"... Esta experiencia tan impresionante muestra que los conocimientos adquiridos por los geotécnicos resultarán siempre de gran utilidad para las futuras investigaciones que puedan realizarse aun fuera de nuestro propio planeta, y se presentan aquí al sólo efecto de mostrar la amplitud del campo del conocimiento de esta especialidad de la ingeniería civil.

Las investigaciones geotécnicas corrientes

Aun las investigaciones geotécnicas más simples pretenden obtener como resultado básico la posibilidad de establecer lo que denominamos un "perfil estratigráfico" (suelos) o "litológico" (rocas) del sitio de nuestro particular interés. Por ejemplo, si proyectamos construir un edificio relativamente importante -carga y altura- en nuestra ciudad, ejecutamos un "estudio de suelos" efectuando perforaciones que nos permiten la extracción de muestras "representativas" o "inalteradas", aptas para efectuar algunos ensayos en el laboratorio y caracterizar los suelos, conocer sus "propiedades físicas" y estimar -dentro de cierto rango- sus características de resistencia y

deformabilidad. Una planilla estratigráfica típica se muestra en la Figura 1. Esta corresponde a un estudio convencional en donde aparecen los suelos denominados "de la formación pampeana", que en este caso alcanzan una profundidad del orden de los 28 m, y están seguidos por las arenas finas y medianas densas de la llamada formación "puelches". La parte superior, hasta los 28 m, está constituida por suelos finos -arcillas y limos heterogéneamente cementados con carbonatos, preconsolidados, y, en general, muy compactos a muy duros, y que permiten cimentar edificios pesados o de gran altura mediante fundaciones "directas" que en general son bases aisladas o plateas. Esta formación es del cuaternario y puede ser subdividida por su origen y edad geológica. En cambio, las arenas finas densas son del terciario y se prolongan a gran profundidad con alguna intercalación de estratos de arcillas duras.

Una investigación geotécnica como la mostrada, aun en su expresión gráfica tan simple, permite al ingeniero estimar el comportamiento de las estructuras que eventualmente debe construir, analizar la estabilidad de excavaciones temporarias permanentes, iniciar el diseño preliminar de obras subterráneas o prevenir los efectos del abatimiento del nivel freático o del bombeo profundo que pudiera resultar necesario para el alivio de presiones hidrostáticas. Pero es conveniente enfatizar que en este campo siempre resulta necesaria una investigación "in situ", tanto más compleja como difícil resulte el problema a resolver.

Una predicción del comportamiento del subsuelo

Pero los suelos pueden poseer características mecánicas muy diferentes a los indicados anteriormente. Por ejemplo, en las riberas del Paraná o del Río de la Plata y en las cercanías del Riachuelo o del Reconquista, existen mantos de suelos finos de baja resistencia y alta compresibilidad que no soportan en forma directa la acción de estructuras pesadas. Aun estructuras muy flexibles como son los tanques metálicos que contienen combustibles requieren, si se los cimenta en for-

ma directa, algunas operaciones previas sobre el terreno natural capaces de modificarlo y transformarlo en apto para recibir la estructura de carga sin que la misma sufra deterioros que la coloquen fuera de servicio. Estos suelos finos blandos compresibles, sumergidos bajo la capa freática, sometidos a la acción de cargas permanentes sufren el fenómeno denominado de "cosolidación". Inmediatamente después de colocada la carga se produce un aumento de la presión del agua que llena los espacios vacíos continuos del suelo: esta sobrepresión es capaz de producir una velocidad del agua la cual drena a localizaciones de presión menor al tiempo que se reduce el volumen del suelo, el cual manifiesta un asentamiento en la superficie. Este proceso de densificación aumenta la resistencia del suelo consolidado y reduce su compresibilidad bajo la acción de nuevas cargas adicionales. Este fenómeno está bien estudiado en geotecnia, y si se conoce bien la geometría de drenaje, la permeabilidad y la disposición estratigráfica, pueden efectuarse predicciones exitosas sobre el comportamiento del suelo bajo carga, tanto más ajustadas cuanto mayor sea el grado de conocimiento en detalle de las características hidráulicas y mecánicas.

En la Figura 2 se muestra el resultado de una predicción de este tipo. Para la cimentación de un gran tanque de combustible en zona de suelos muy compresibles, se decidió que antes de construir el tanque se colocara una carga previa de suelos, constituyendo un "terraplén de precarga" con una altura cercana a los 9 m. En la figura se muestra la marcha de la carga y de los asentamientos con referencia al tiempo. La línea gruesa superior muestra la "predicción" del asentamiento, que se ajusta muy bien a los valores medidos. Posteriormente al efecto producido por la acción del terraplén, el mismo fue removido, se preparó la superficie y se apoyó el tanque que, al actuar sobre un suelo preconsolidado (predeformado), experimentó -una vez cargado- un asentamiento aceptable compatible con un buen servicio estructural durante su explotación posterior.

En algunos casos no resulta conveniente o posible apelar a la solución anterior, y el tanque debe ser soportado por una subes-

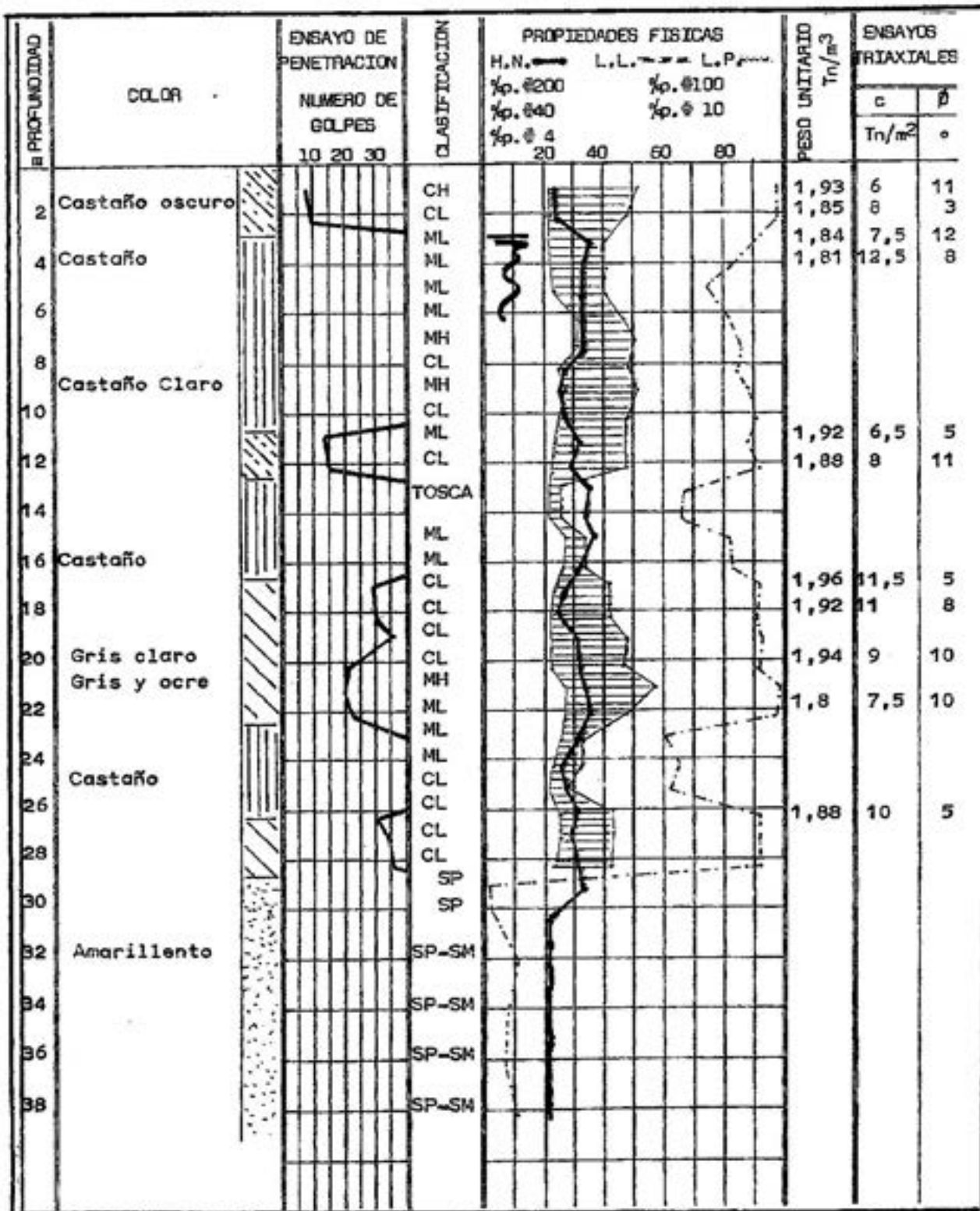


Fig. 1. Planilla estratigráfica típica.

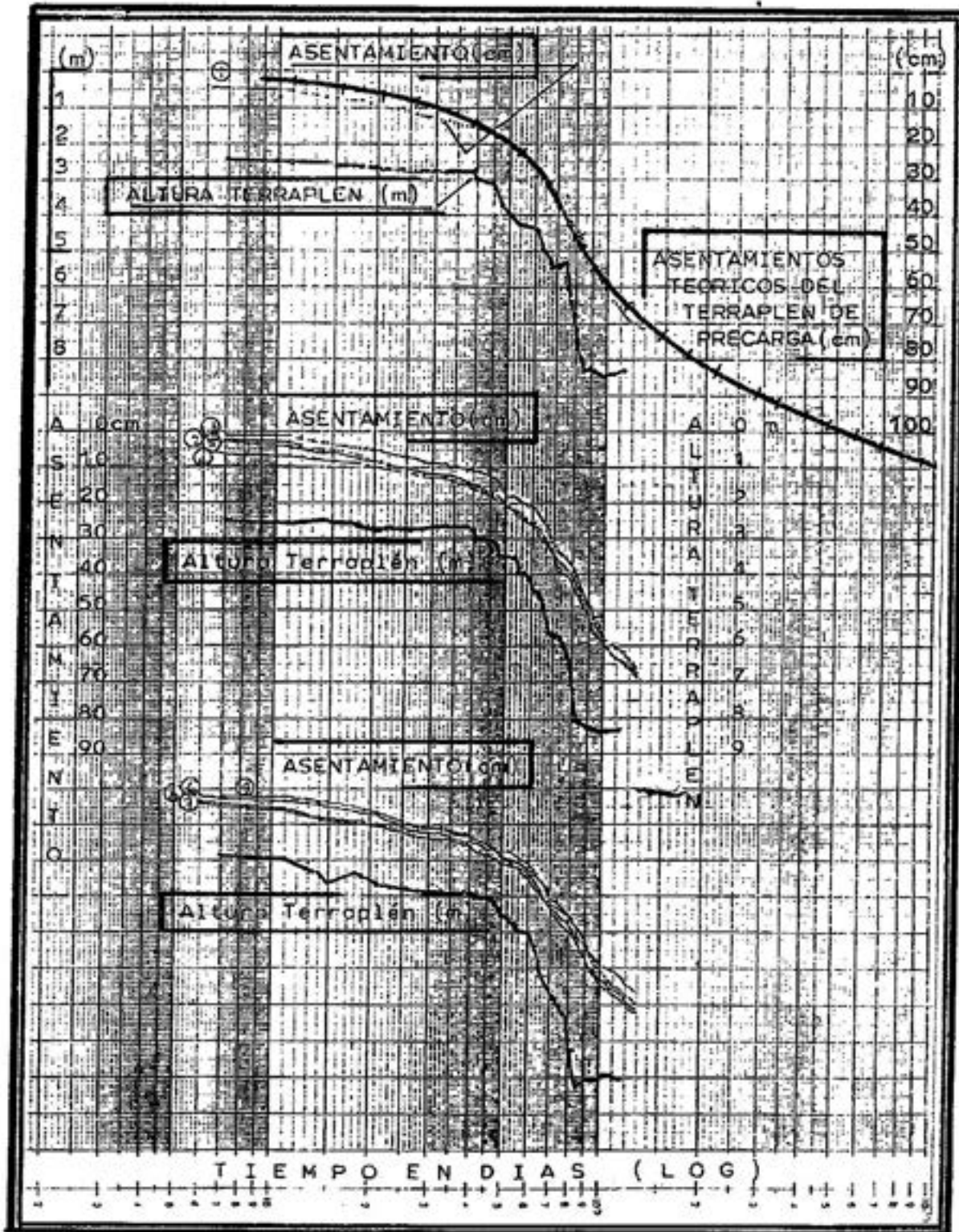
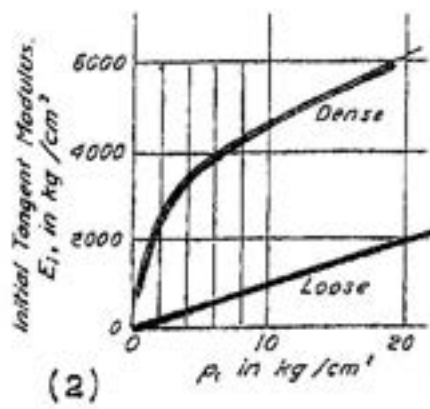
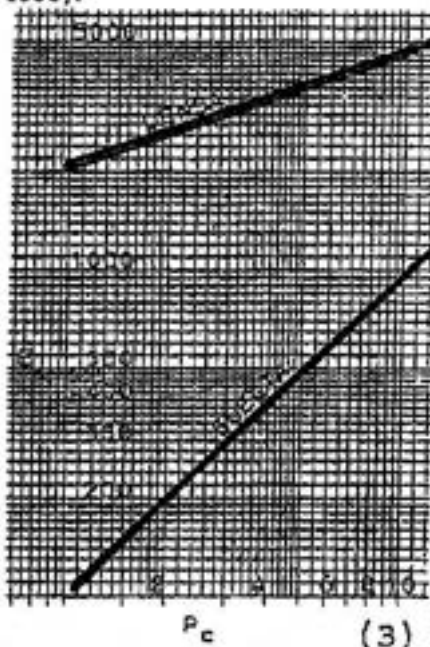


Fig. 2. Asentamiento de un terraplén de precarga.



(2)
Fig. 15.4 Relation between initial tangent modulus and all-around pressure for sand (after Selveidig 1931).



$$E_i = C \cdot p_c (p_c/p_0)^n$$

A. Densa: $C=2100$; $n=1/3$
 A. Suelta $C= 100$; $n=1$

Fig. 3. Variación del módulo inicial con la presión de confinamiento en arenas.

estructura suficientemente resistente como para que sus propias deformaciones -cuando el tanque esté cargado- sean compatibles con las deformaciones admisibles del mismo. Por ejemplo, en la diapositiva que se muestra (nota 1), se aprecia una solución constituida por un grupo de pilotes que sustentan una platea delgada con capiteles, sobre la cual apoyará el tanque. Este tanque era del tipo de "techo flotante" que no admite mayores deformaciones. Su diámetro era del orden de los 50 m y su altura de unos 22 m, por lo que la carga sobre el grupo de pilotes era mayor a los 40.000 tn con el tanque lleno de agua durante la prueba hidráulica. El comportamiento fue totalmente satisfactorio, no solamente debido a una construcción cuidadosa de la fundación, sino al conocimiento ajustado sobre las características del subsuelo obtenido luego de una adecuada investigación geotécnica en donde fue necesario desarrollar algunos estudios que iban más allá de los denominados "convencionales" o básicos.

La caracterización de los suelos

El comportamiento mecánico de los materiales queda descrito matemáticamente mediante relaciones que vinculan sus características tensión-deformación y sus variaciones con el tiempo y temperatura. Estos estudios se efectúan en el terrero y en el laboratorio mediante ensayos estáticos y dinámicos que permiten modificar diferentes niveles de esfuerzos o deformaciones asociadas; en muy pocos problemas es importante la temperatura. En el laboratorio de Mecánica de Suelos se emplea comunmente la cámara triaxial para estudiar las relaciones tensión-deformación; este dispositivo permite estudiar estados triples de esfuerzos con simetría axial. Para distintas presiones de confinamiento y drenaje pueden medirse las deformaciones específicas y obtener las correspondientes curvas $\sigma - \epsilon$. El módulo de deformación expresado por $E_t = d\sigma/d\epsilon$ presenta diferentes valores, desde el inicial E_i hasta el final, que en el caso de plastificación mantenida, es igual a 0.

En la Figura 3 se muestra la variación de E_i con el valor de la presión σ_3 de confinamiento, para arenas de condición drenada,

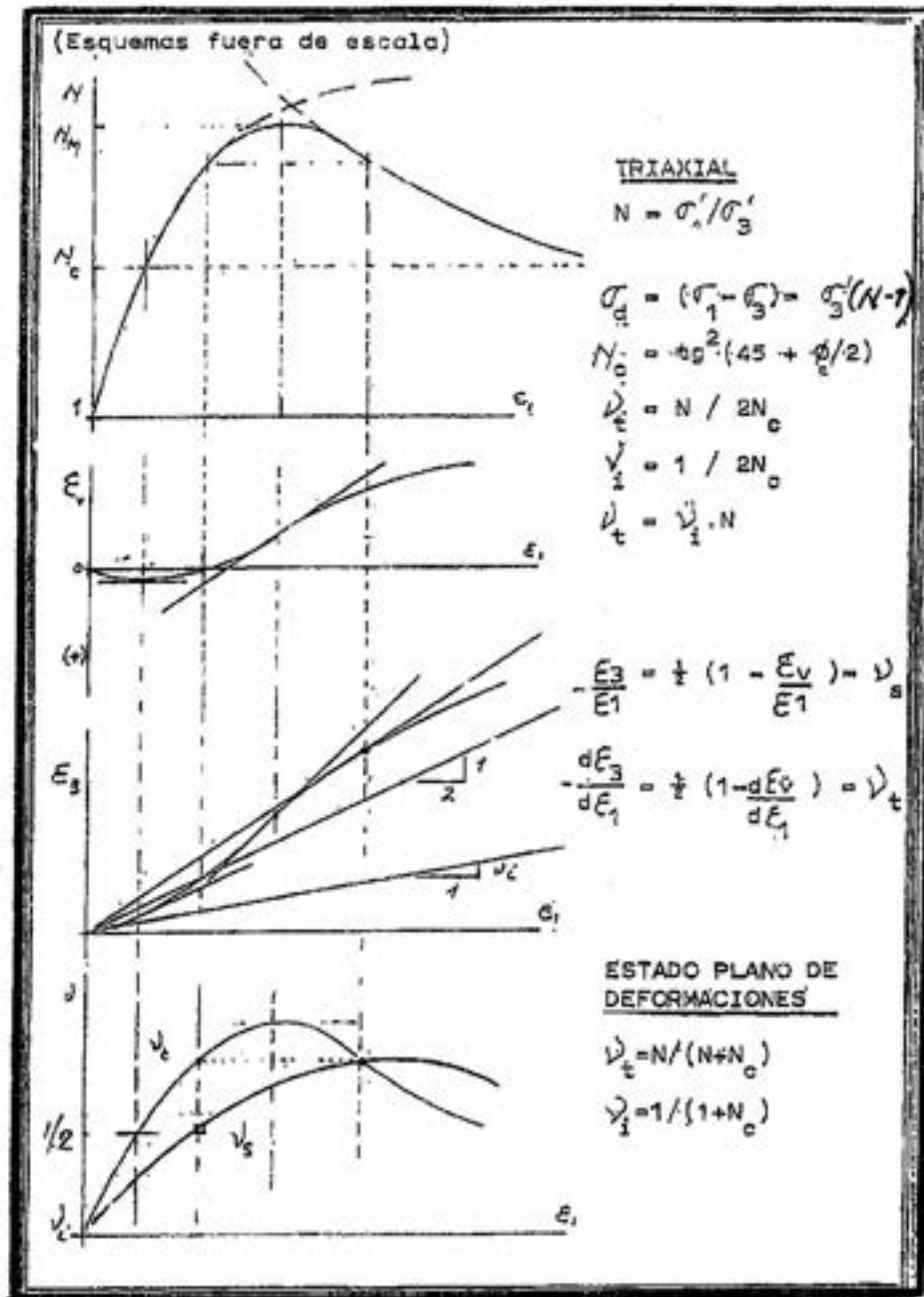


Fig. 4. Relaciones entre esfuerzos y deformaciones para una arena medianamente densa en condiciones drenadas.

o sea que a lo largo de todo el ensayo el valor de las presiones externas son transferidas íntegramente a las partículas. Estos resultados fueron obtenidos hace casi 70 años por Sheidig, y si los valores se presentan en un gráfico $\log E_1 - \log \sigma_3$, aparecen claramente relaciones lineales expresables mediante expresiones de tipo parabólico en donde los va-

lores de C y n son función de la densidad relativa de la arena ensayada. Cuando se aplican esfuerzos desviante $(\sigma_1 - \sigma_3) = \sigma_3$ la relación $N = \sigma_1/\sigma_3$, que marca la oblicuidad entre las presiones principales máxima y mínima, varía a medida que aumentan las deformaciones específicas ϵ_1 .

En la Figura 4 se muestra la marcha

de un ensayo drenado efectuado en una arena relativamente densa en relación con la presión de confinamiento σ_3 . Si contemporáneamente medimos el cambio específico de volumen $\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3$ se observa que la máxima contracción (disminución del volumen) se alcanza para un valor que denominamos N_c . Luego, aumentando σ_3 , o sea aumentando N , siguen aumentando las deformaciones axiales ε_1 . El mayor valor de N se obtiene cuando $(d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_{máx}$ y el suelo se encuentra en pleno proceso de dilatación (aumento de volumen). Este fenómeno de variación del volumen cuando varían las tensiones tangenciales (que dependen de la diferencia entre las tensiones principales y del plano de acción que se considere) recibe el nombre de dilatancia y fue señalado originalmente por Reynolds hace ya más de 100 años. En la misma figura también se ha representado la variación de $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$, de $\varepsilon_3/\varepsilon_1$ y $d\varepsilon_3/d\varepsilon_1$ con el incremento de ε_1 . Se aprecia que para grandes deformaciones, el valor $N = N_c$ es independiente del nivel de esfuerzos y corresponde a un volumen constante; el valor de la relación de vacíos correspondiente depende del nivel de esfuerzos y fue denominado por A. Casagrande como la "relación de vacíos crítica" que corresponde a una disposición relativa entre partículas llamada "estructura de flujo". También en la figura se puede observar que las relaciones v_v y v_s pueden presentar valores mayores a 1/2; cuando se desarrolla la estructura de flujo, la deformación corresponde a un material plástico ideal en donde $d\varepsilon_v/d\varepsilon_1 = 0$. Se ve entonces que el comportamiento mecánico de un material construido por partículas es diferente al de los metales, y que las teorías de rotura y las ecuaciones constitutivas que ligan los esfuerzos con las deformaciones presentan dificultades considerables para su correcta formulación, por lo que las "predicciones" pertinentes respecto del comportamiento mecánico de los suelos o rocas resultan bastante cuestionables.

Por otro lado, si examinamos el comportamiento de los suelos finos constituidos con partículas del tamaño y forma de las arcillas y coloides, no encontramos diferencias demasiado grandes en las respuestas σ - ε , aun cuando la naturaleza de los contactos inter-

particulares sea muy diferente e intervengan otras fuerzas como las coulombianas o las de van der Waals.

En la Figura 5 se presenta en forma muy esquemática los resultados de ensayos triaxiales drenados -trayectoria OC- y no drenados -trayectoria OC'- de una arcilla amasada normalmente consolidada (mostrados primeramente por Rendulic), y las correspondientes variaciones σ - ε , E_s y E_t en función de ε_1 . Estos resultados son similares a los que se obtienen para materiales granulares sueltos. En cambio, los correspondientes de la Figura 4 son similares a los que se obtienen para materiales arcillosos preconsolidados.

Por ejemplo, en la Figura 6 se ejemplifican los resultados presentados hace casi 40 años, correspondientes a suelos finos limo-arcillosos de baja plasticidad compactados, que se emplearon en la construcción de la presa de Río Hondo. Esta forma de presentación de los resultados permite evaluar no solamente la resistencia, sino definir parámetros para la estimación de las deformaciones de estos materiales que se apartan tan considerablemente de un comportamiento lineal.

Casos de la práctica geotécnica

A esta altura de la presentación podemos examinar un caso práctico que fue resuelto empleando los métodos de diseño que se utilizan en geotecnia. Se trata de la cimentación de un gran depósito de gas licuado, el cual será mantenido a una temperatura de -174°C . El depósito es un gran cilindro metálico de unos 45 m de diámetro y otros tantos de altura. Como siempre, el primer paso es investigar en el sitio las condiciones geotécnicas de los suelos, niveles del agua libre subterránea, etc. En un primer grado de investigación se ejecutan los ensayos convencionales para definir las características estratigráficas y obtener los valores aproximados de resistencia; esto permite confeccionar una planilla estratigráfica como se muestra en la Figura 7. De allí surge que es posible resolver la fundación mediante una cimentación directa previa excavación y recolocación de los suelos relativamente débiles de la parte superior del perfil. Para estimar las deformaciones de una

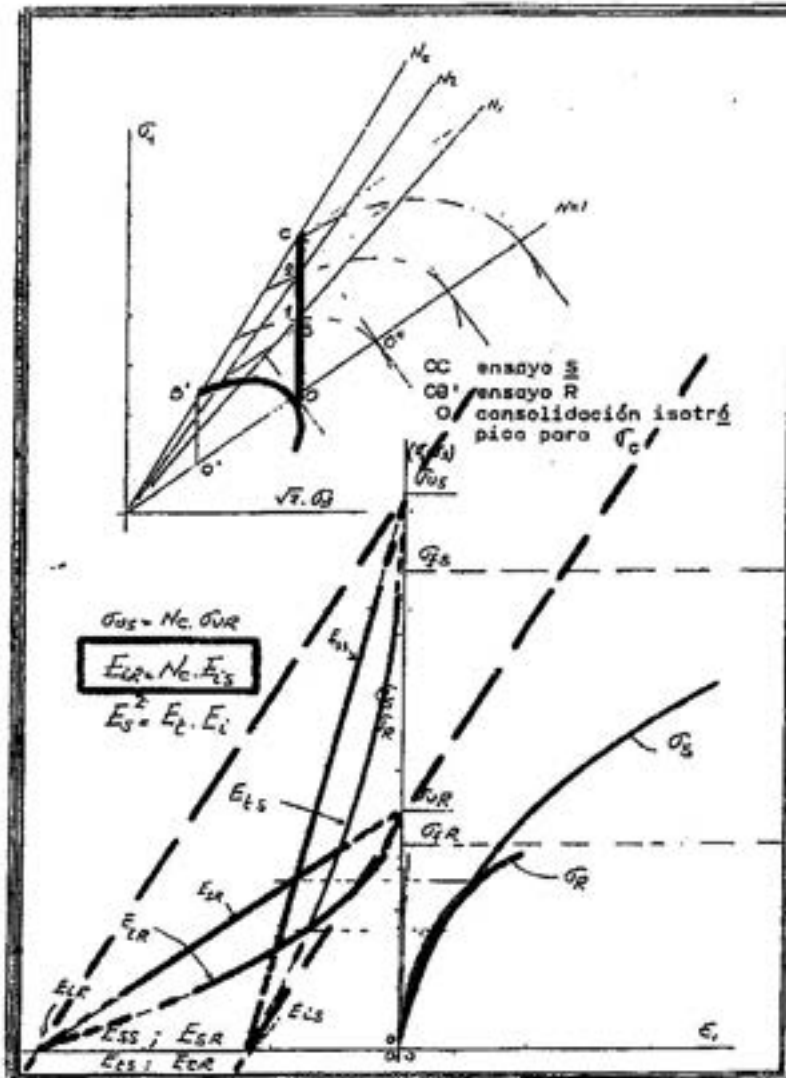


Fig. 5. Relaciones entre esfuerzos, deformaciones y módulos para una arcilla amasada en condiciones drenadas y no-drenadas.

solución de este tipo se estudia con más detalle las características tensión-deformación de los suelos que pertenecen a la formación del pampeano, cuyos resultados típicos se presentan en la Figura 8 y permiten desarrollar un conjunto de expresiones algebraicas tales como las que se pueden ver en la Figura 9. Sin embargo, los análisis que en forma paralela se efectúan y que consideran aspectos económicos y programáticos, muestran que los problemas que provoca una temperatura tan baja del producto conduce a la necesidad de aplicar tecnologías de aislación y mantenimiento considerable. Aparece entonces como

atractiva una solución que emplee pilotes y que permita colocar la base única de apoyo, sobreelevada respecto de la superficie del terreno, a través de cuyo espacio pueda circular el aire ambiente y evitar la transmisión al suelo de las bajísimas temperaturas con que se almacena el gas licuado. Pero surge una primera dificultad y es que si se quiere emplear pilotes con alta carga específica -hincados con martillos de alta eficiencia- es necesario ejecutar previamente una perforación para alojar en parte el pilote, el cual deberá penetrar en suelo natural alguna proporción de su longitud total. El huelgo que pueda que-

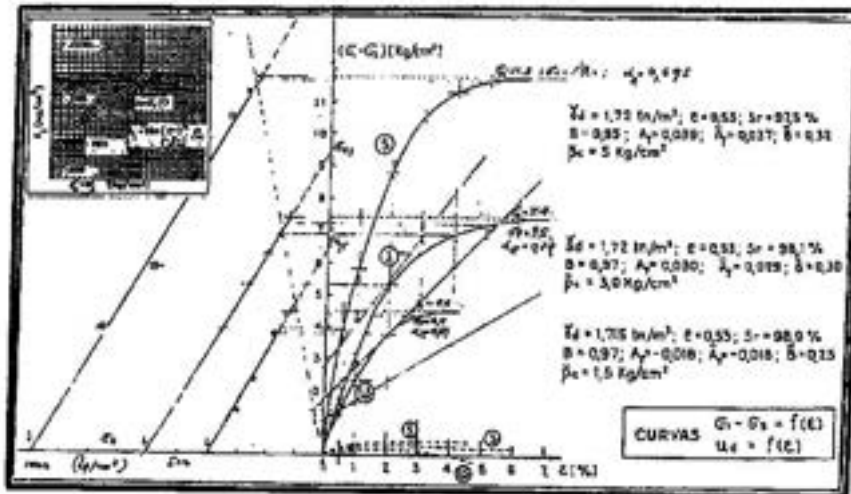


Fig. 6. Esfuerzos-deformaciones-módulos para un limo arcilloso compactado.

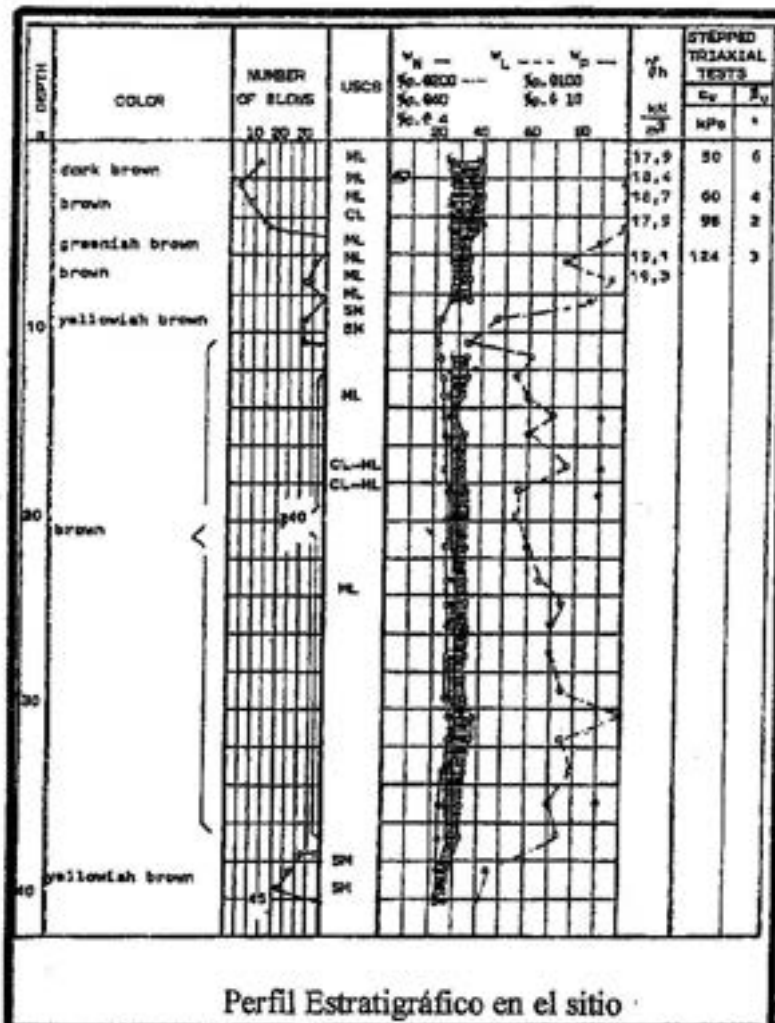


Fig. 7. Perfil estratigráfico en el sitio.

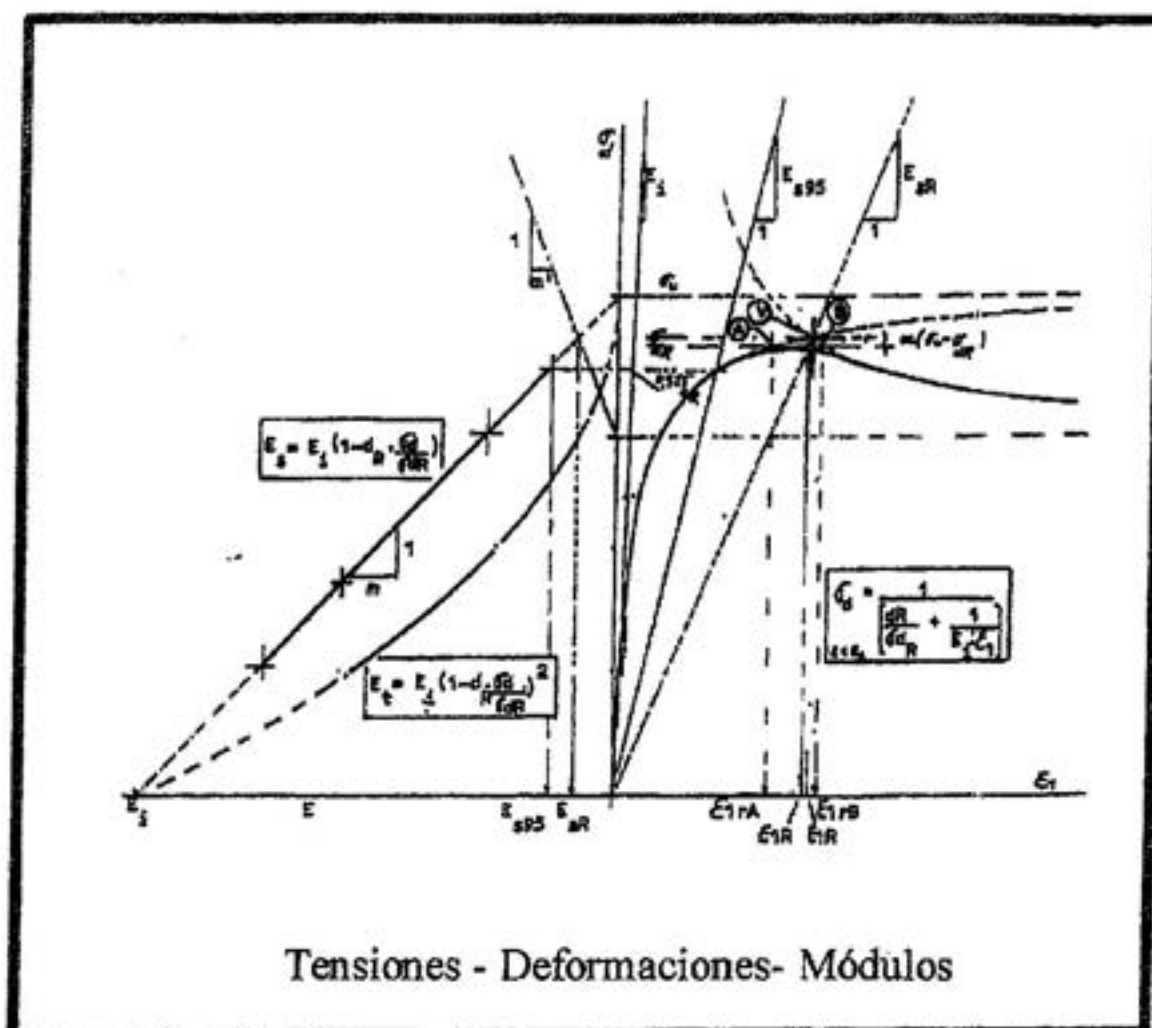


Fig. 8. Tensiones - deformaciones - módulos.

dar entre las paredes de la excavación y la superficie del pilote deberá ser relleno con un hormigón, el cual será vibrado y desplazado lateralmente mientras dure la hinca. Bajo estas circunstancias, se consideró una fricción unitaria promedio del orden de unas 8 Tn/m² y una resistencia unitaria de punta correspondiente a los suelos toscos del lugar del orden de 70 a 75 kg/cm². Por tanto, la estimación de la capacidad de carga a rotura que podía desarrollar el pilote por la punta resultó $Q_{RP} \approx 122$ Tn y la correspondiente de fricción por el fuste $Q_{RF} \approx 184$ Tn. Para los suelos cementados en correspondencia con la punta se consideró un valor $N(SPT)$ del orden de 50 a 60, por lo que puede estimarse $E_i = 1,3 \cdot \alpha_{qu}$

$\cdot 1,3 \cdot N_{prom} = 1,3 \times 300 \times 1,3 \times 1/2(50+60) = 2750$ kg/cm². $K_{iP} = k_{iP} \cdot XB^2 = XBE_i = 2 \times 0,4m \times 27500Tn/m^2 = 22000Tn/m^2 = 220$ Tn/cm. Por otra parte, considerando una longitud útil de 11,5 m y que el hundimiento de la cabeza δ_{RP} es del orden de un milésimo de la longitud de la pieza, puede escribirse $\delta_{RP}/L_u = 0,001$; $\delta_{RP} = 1150 \times 0,001 = 1,15$ cm; $K_{iP} = Q_P / (1 + d_R \cdot Q_P / Q_{RP}) \cdot \delta_{RP} = Q_{RP} / 0,15 \times \delta P \Phi = 1070$ Tn/cm.

En la Figura 10 se presenta el resultado de esta estimación, la cual se muestra muy ajustada con los resultados de un ensayo real de carga efectuado sobre un pilote de prueba y que se presentan en la Figura 11. La comparación se muestra en la Figura 12.

$$\frac{\sigma_d}{\varepsilon_1} = E_s \quad [3.1]; \quad \left(\frac{\sigma_d}{\varepsilon_1} = E_s \right)_{\varepsilon_1 \rightarrow 0} = E_i \quad [3.2]; \quad E_s = E_i - m \cdot \sigma_d \quad [3.3];$$

$$m = \frac{E_i}{\sigma_{dR}} \quad [3.4]; \quad \frac{\sigma_{dR}}{\sigma_{dR}} = d_R \quad [3.5]; \quad m = \frac{E_i \cdot d_R}{\sigma_{dR}} \quad [3.6];$$

$$E_s = E_i - \frac{E_i \cdot d_R}{\sigma_{dR}} \cdot \sigma_d = E_i \cdot \left(1 - d_R \cdot \frac{\sigma_d}{\sigma_{dR}} \right) \quad [3.7]; \quad E_s = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_1} = E_i - m \cdot \sigma_d \quad [3.8] \quad \therefore$$

$$\frac{\sigma_d}{\varepsilon_1} + m \cdot \sigma_d = E_i = \sigma_d \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + m \right) \quad [3.9]; \quad \sigma_d = \frac{E_i}{\frac{1}{\varepsilon_1} + m} = \frac{1}{\frac{d_R}{\sigma_{dR}} + \frac{1}{E_i \cdot \varepsilon_1}} \quad [3.10];$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{máx}} = \sigma_{dR} = (N_\phi - 1) \sigma_3 + 2 \cdot c \cdot \sqrt{N_\phi} \quad [3.11]; \quad N_\phi = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad [3.12];$$

$$\sigma_d = \frac{E_i \cdot \varepsilon_1}{1 + m \cdot \varepsilon_1} \quad [3.13]; \quad E_i = \frac{\partial \sigma_d}{\partial \varepsilon_1} = \frac{E_i}{(1 + m \cdot \varepsilon_1)^2} = E_i \cdot \left(1 - d_R \cdot \frac{\sigma_d}{\sigma_{dR}} \right)^2 = \frac{E_i}{\left(1 + \frac{d_R \cdot E_i}{\sigma_{dR} \cdot \varepsilon_1} \right)^2} \quad [3.14]$$

$$E_s = E_i \cdot \left(1 - d_R \cdot \frac{\sigma_d}{\sigma_{dR}} \right) \quad [3.15]; \quad \sigma_d = \frac{1}{\frac{d_R}{\sigma_{dR}} + \frac{1}{E_i \cdot \varepsilon_1}} \quad [3.16]; \quad E_i = E_i \cdot \left(1 - d_R \cdot \frac{\sigma_d}{\sigma_{dR}} \right)^2 \quad [3.17]$$

Para $\varepsilon_1 > \varepsilon_{1R}$

$$\frac{\sigma_d}{\varepsilon_1} = E_s = m' \cdot (\sigma_d - \sigma_{d\text{máx}}) \quad \alpha \cong 0,2 \quad [3.18]$$

$$m' = \frac{E_i}{\sigma_{dR}} \cdot \left\{ \frac{0,8 \cdot (1 - d_R)}{0,2 \cdot \left(\frac{4 \cdot d_R + 1}{d_R} \right) - \frac{\sigma_{d\text{máx}}}{\sigma_{dR}}} \right\} \quad [3.19]; \quad \sigma_d = m' \cdot \sigma_{d\text{máx}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_1}{m' \cdot \varepsilon_1 - 1} \right) \quad [3.20];$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{m' \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{d\text{máx}}}{\sigma_d} \right)} \quad [3.21] \quad \varepsilon_{1R} = \frac{1}{\left(\frac{\varepsilon_1}{\sigma_{dR}} \right)} \cdot \frac{4 \cdot d_R + 1}{4 \cdot (1 + d_R) \cdot d_R} \quad [3.22]$$

$$\frac{m}{m'} = \frac{d_R}{0,8 \cdot (1 - d_R)} \cdot \left(0,2 \cdot \frac{4 \cdot d_R + 1}{d_R} - \frac{\sigma_{d\text{máx}}}{\sigma_{dR}} \right) \quad [3.23]$$

Relaciones Tensión - Deformación

Fig. 9. Relaciones algebraicas entre tensiones y deformaciones.

En la Figura 13 se presenta en forma simplificada la estimación de la distribución de las resistencias por el fuste y por la punta para valores crecientes de la carga aplicada sobre la cabeza del pilote.

La Figura 14 muestra la etapa constructiva final del tanque. Como conclusión de

esta experiencia, puede afirmarse que a partir de una investigación geotécnica adecuada, y correlacionando valores característicos obtenidos para formaciones similares, es posible efectuar predicciones confiables para el proyecto ingenieril.

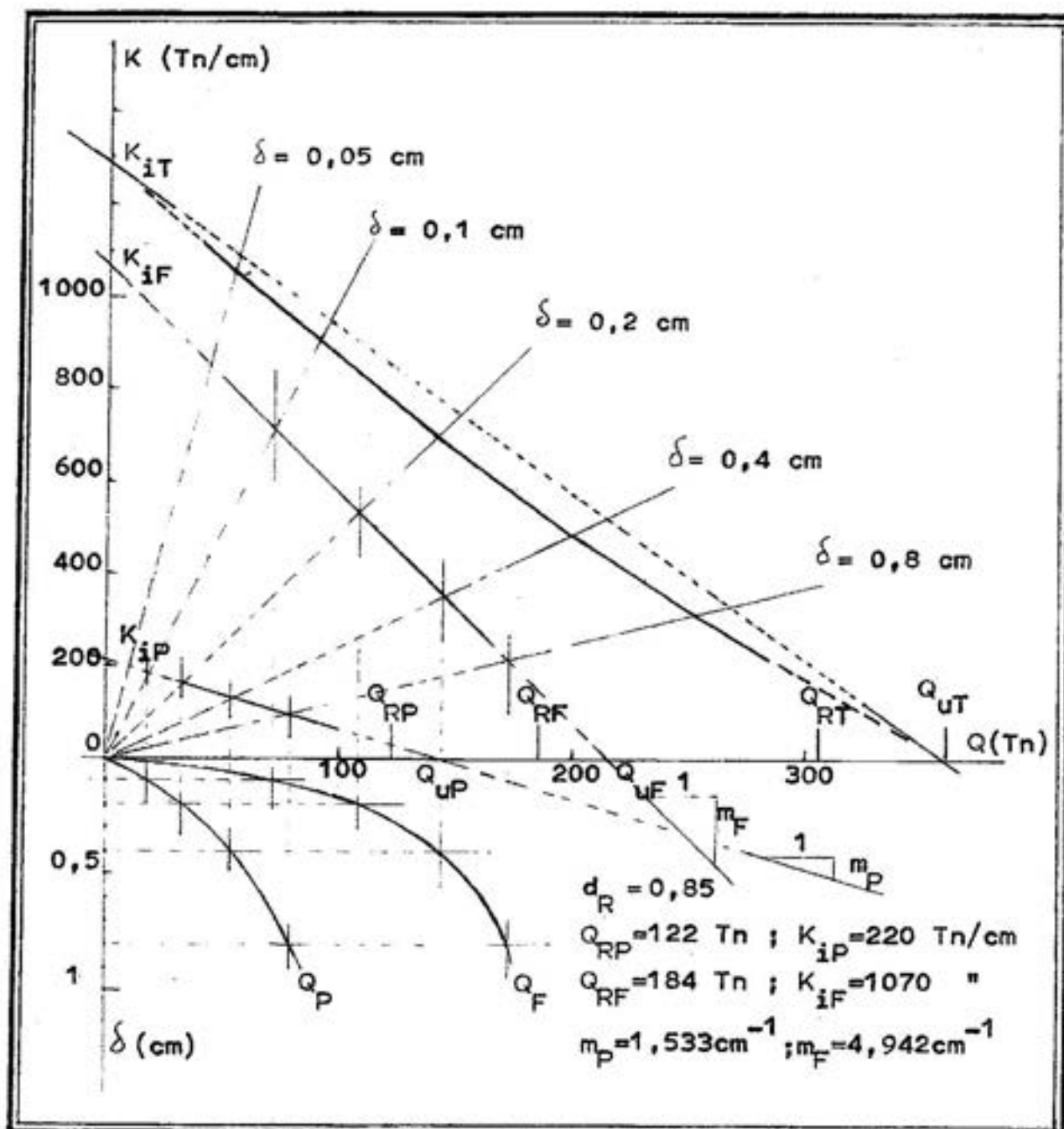


Fig. 10. Estimación de las resistencias de punta y de fuste para un pilote cargado axialmente.

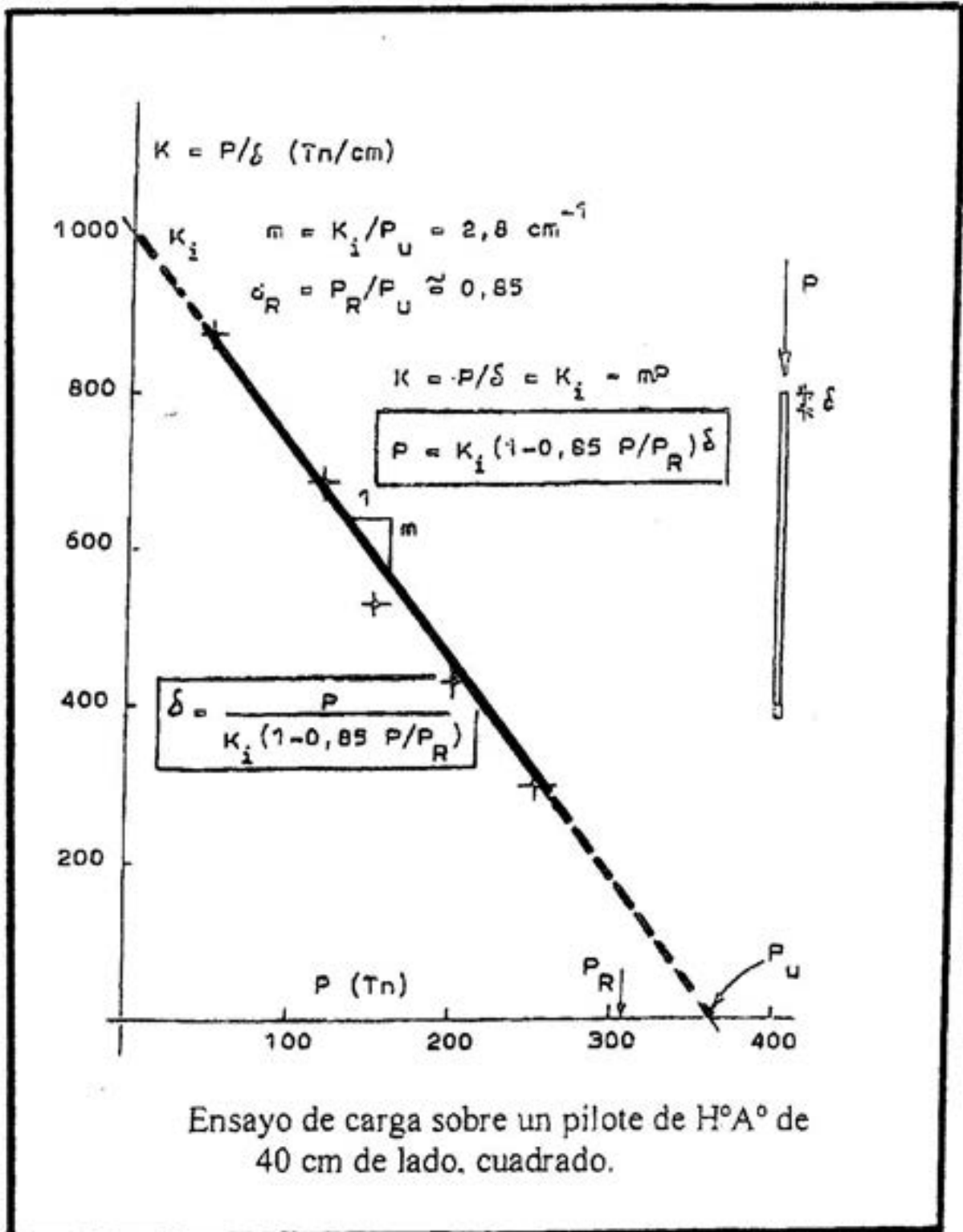


Fig. 11. Ensayo de carga sobre un pilote de H°A° de 40 cm de lado de sección cuadrada.

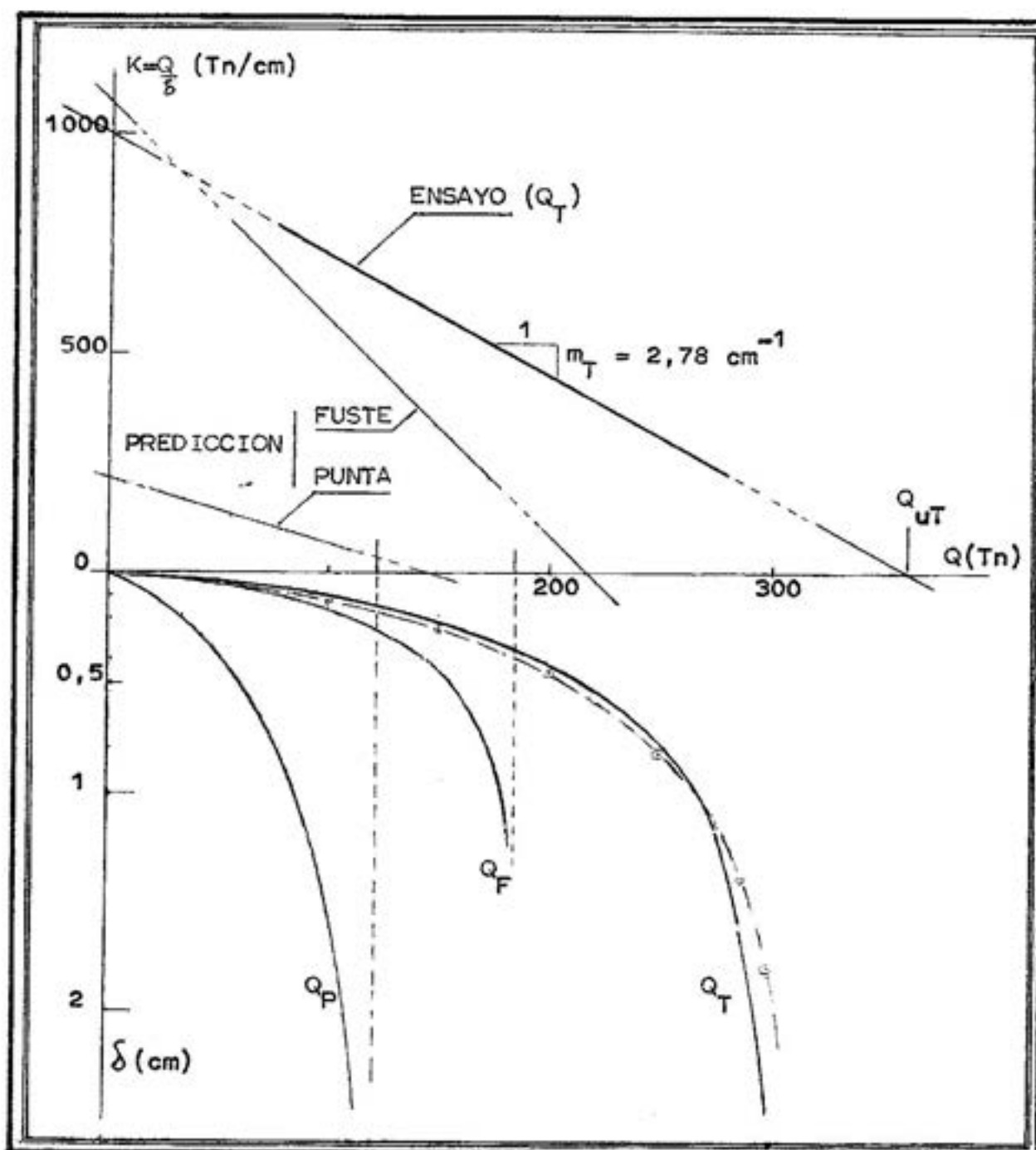


Fig. 12. Predicción del comportamiento de un pilote aislado.

Otro caso, pero referido a una cimentación ya existente

Otro caso práctico de interés es el de una cimentación existente que requería ser reforzada. La catedral de La Plata es un mo-

numento de estilo neogótico de grandes proporciones, como verse en estas diapositivas (nota 1). Es propiedad de la provincia de Buenos Aires y actualmente se encuentra en una etapa de ampliación. Dentro de este programa está el completamiento de las torres, cuya

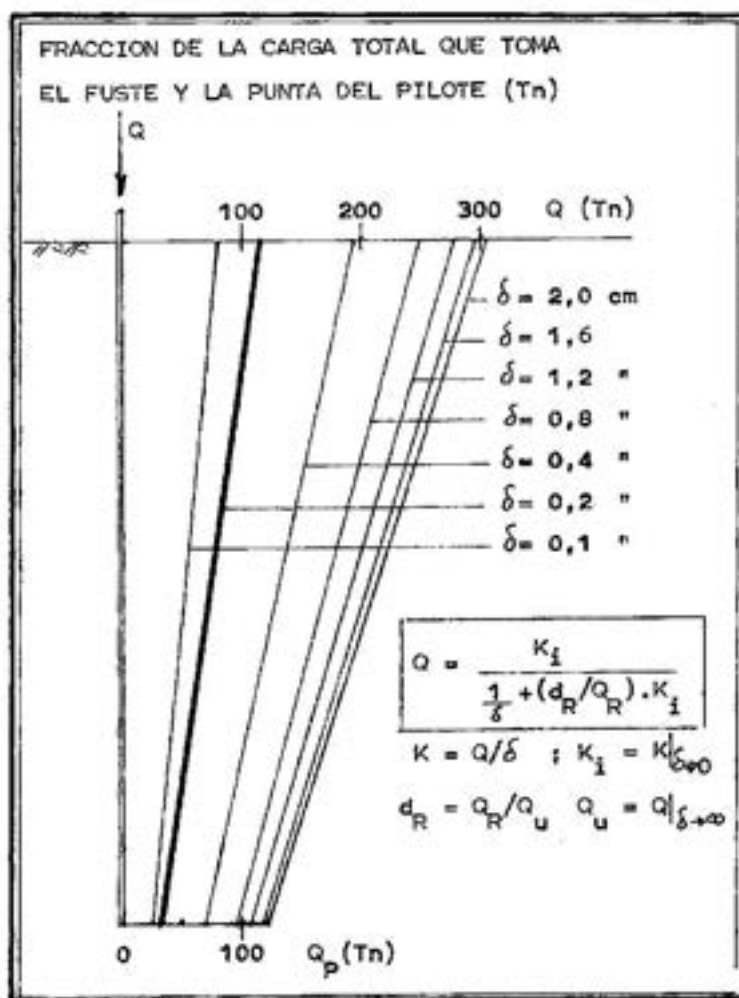


Fig. 13. Esquema simplificado de la distribución de cargas sustentadas por la punta y el fuste.



Fig. 14. Vista del tanque criogénico.

altura final será del orden de los 110/120 m. La cimentación existente de cada torre es una base de unos 160/180 m² de superficie implantadas a unos 4 o 5 m bajo la superficie del suelo circundante. El peso actual de cada torre es de unas 6500/7000 Tn y hay que agregar unas 2000 Tn. La base descansa en los suelos que constituyen la parte superior del pampeano y cuyas características mecánicas pueden verse en la Figura 15.

Es interesante observar la diferencia de valores que presentan los módulos de deformación obtenidos a partir de ensayos

triaxiales sobre muestras más o menos perturbadas y los calculados mediante retroanálisis a partir del comportamiento de estructuras construidas en formaciones similares.

Aproximadamente 3 o 4 m bajo el plano de cimentación, el pampeano se presenta con características mucho más resistentes que permite absorber las nuevas cargas mediante elementos estructurales de transferencia, como podrían ser submuraciones tradicionales o grupo de pilotes. La solución que se adoptó fue ejecutar un grupo de micropilotes como se muestra en la Figura 16. Los micropilotes

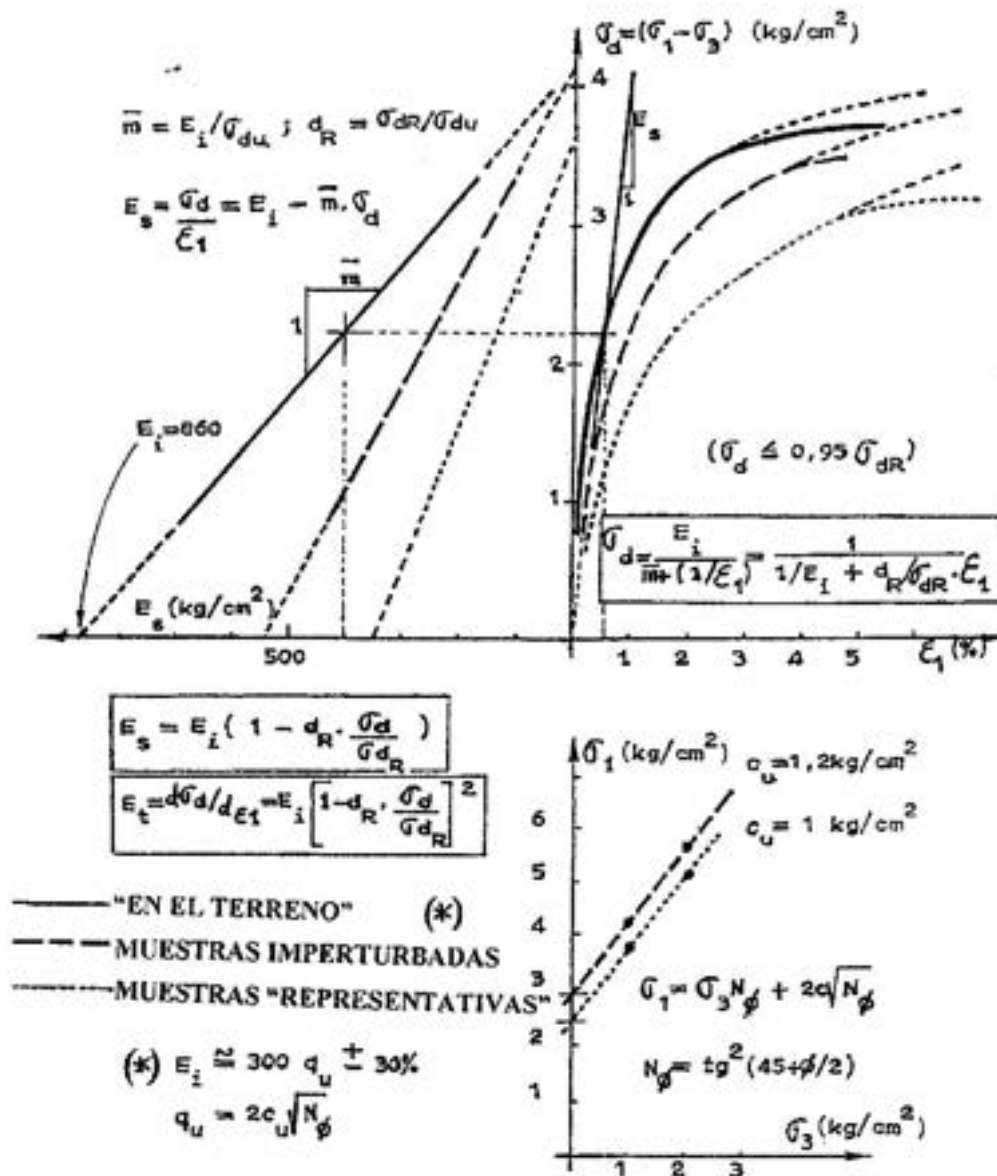


Fig. 15. Relaciones tensión-deformación-resistencia-módulos para suelos compactos a muy compactos del pampeano.

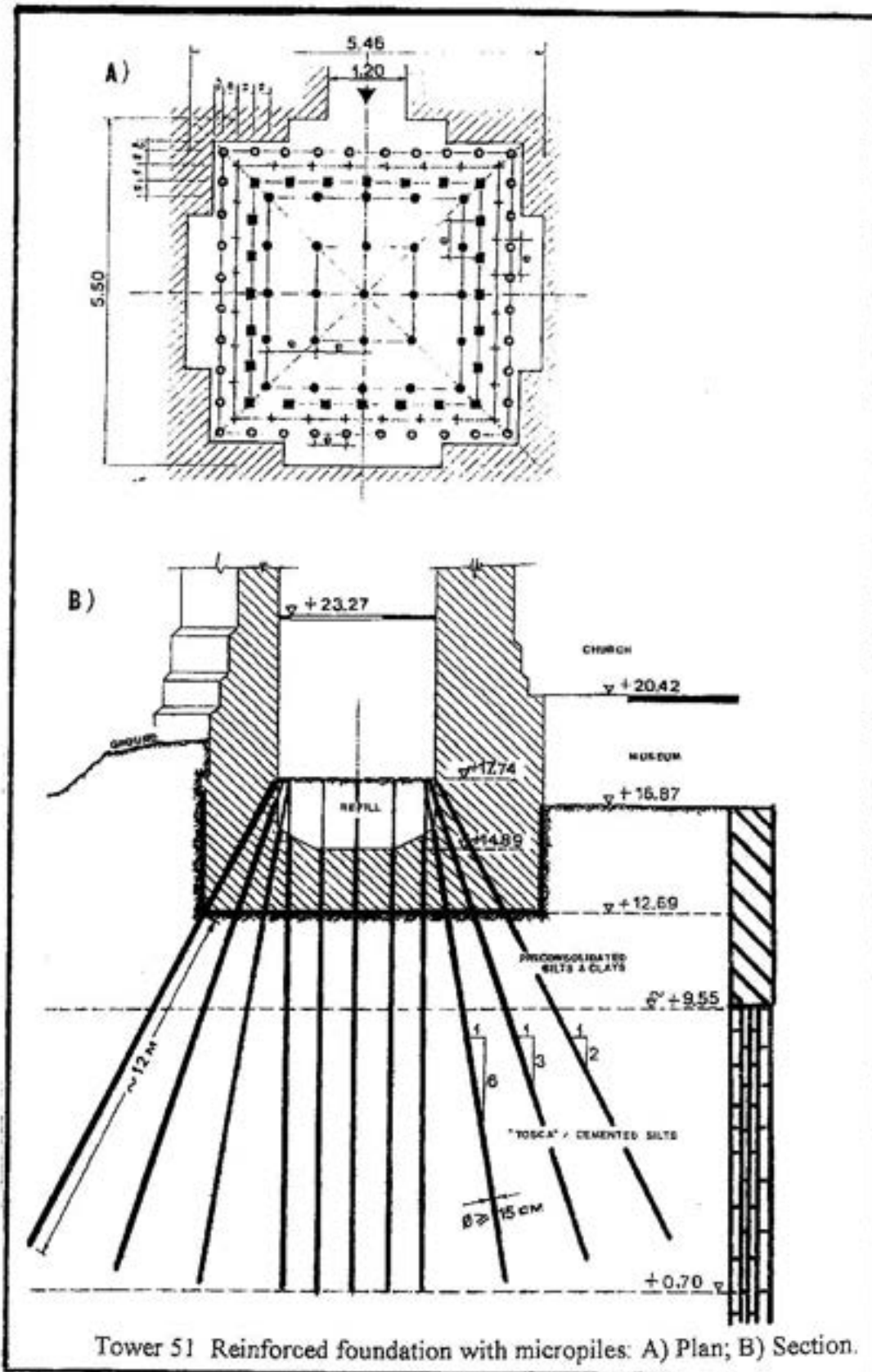


Fig. 16. Torre 51. Refuerzo de la fundación con micropilotes.

son tubos de acero de alta resistencia, alojados en una perforación de aproximadamente 15 cm de diámetro. Los tubos de acero están munidos con vainas expandibles que, al desplazarse, abren el camino a una mezcla de cemento inyectada a muy alta presión. El huelgo entre las paredes de la perforación practicada en el terreno y el caño de acero, se lo rellena con un microhormigón con aditivos que provocan su expansión y regulan el tiempo de endurecimiento, efectuándose la inyección algunas horas después, lo que permite predeformar lateralmente el suelo y eventualmente fisurarlo o agrietarlo al tiempo de introducir en el espacio así formado la lechada cementicia. La carga de rotura Q_R de estos micropilotes y el valor inicial de la relación $Q/\delta = K_i$ fue estimada a partir de la investigación geotécnica. Pero antes de iniciar los trabajos se efectuó un ensayo de carga para definir los valores de K_i , m , Q_u y d_R que mostraron el buen ajuste de la predicción.

El resultado de este ensayo se muestra en la Figura 17, mientras que en la Figura 18 se puede ver un croquis con el sistema de manguitos expandibles. Posteriormente se ejecutaron sendos ensayos sobre pilotes de servicio -uno en correspondencia con cada torre-, siendo los resultados satisfactorios. Las mediciones de estos ensayos se muestran en las Figuras 19 y 20.

A partir de estos resultados y de las expresiones incluidas en el Cuadro I, se efectuó una predicción del hundimiento que podía esperarse del grupo de pilotes, de la base considerada individualmente y del conjunto solidario de la fundación resultante.

Los resultados de esta evaluación pueden observarse en la Figura 21, pudiendo comunicar que al día de la fecha, con aproximadamente el 80% de la sobrecarga final ya aplicada, el asentamiento no supera el par de milímetros.

En las diapositivas que se muestran (nota 1) pueden apreciarse distintos sistemas aptos para ejecutar ensayos de carga -compresión y arranque- de piezas largas embebidas en el terreno: pilotes o tirantes de anclaje.

En algunas oportunidades, cuando se requiere reforzar las cimentaciones existentes, no puede recurrirse a la colocación de ele-

mentos de transferencia de carga, ya sean relativamente superficiales o profundos. Se recurre entonces a soluciones no convencionales como las que se muestran en estas diapositivas (nota 1), en donde se ilustra sobre las técnicas aplicadas durante la ejecución de un "tratamiento térmico" de suelos de origen loésico. En este caso, la infiltración de agua en el terrero había producido la disminución de resistencia y el incremento de deformabilidad -en este caso, colapso parcial de la estructura de partículas que originalmente poseía el suelo natural-, con el consiguiente asentamiento de las cimentaciones y deterioro del edificio. Se recurrió entonces al secado del suelo mediante la inyección de gases calientes a través de la estructura porosa del mismo. Esto se consiguió practicando perforaciones junto a las bases de los edificios e instalando en la parte superior pequeñas cámaras de combustión de gas natural en su interior, como se ve en la Figura 22.

Inyectando aire a presión desde dicha cámara es posible ir elevando paulatinamente la temperatura del suelo hasta cerca de los 1000°C y transformarlo en forma irreversible en una especie de ladrillo sin liga. En el caso que se muestra (fue el primero en realizarse en el país hace casi 40 años aplicando y adoptando una técnica rusa a nuestros recursos locales; la información básica se había obtenido de una publicación norteamericana presentada por miembros de una comisión de intercambio científico-técnico que había visitado por aquel tiempo la URSS) se prolongó unos 10 a 15 días por c/boca de combustión, la cual estaba munida de un visor de llama y termocuplas que permitían controlar en todo momento la marcha del proceso con resultados muy satisfactorios desde el punto de vista técnico.

Túneles

Otro tipo de estructuras, cuyo diseño y comportamiento son evaluados en la Geotecnia, son las cavernas y los túneles.

La forma de los túneles contiguos construidos en Quito, que se muestran en la Figura 23, tuvieron para quien habla el doble interés, de sus propias dificultades en el diseño y que los suelos involucrados -una forma-

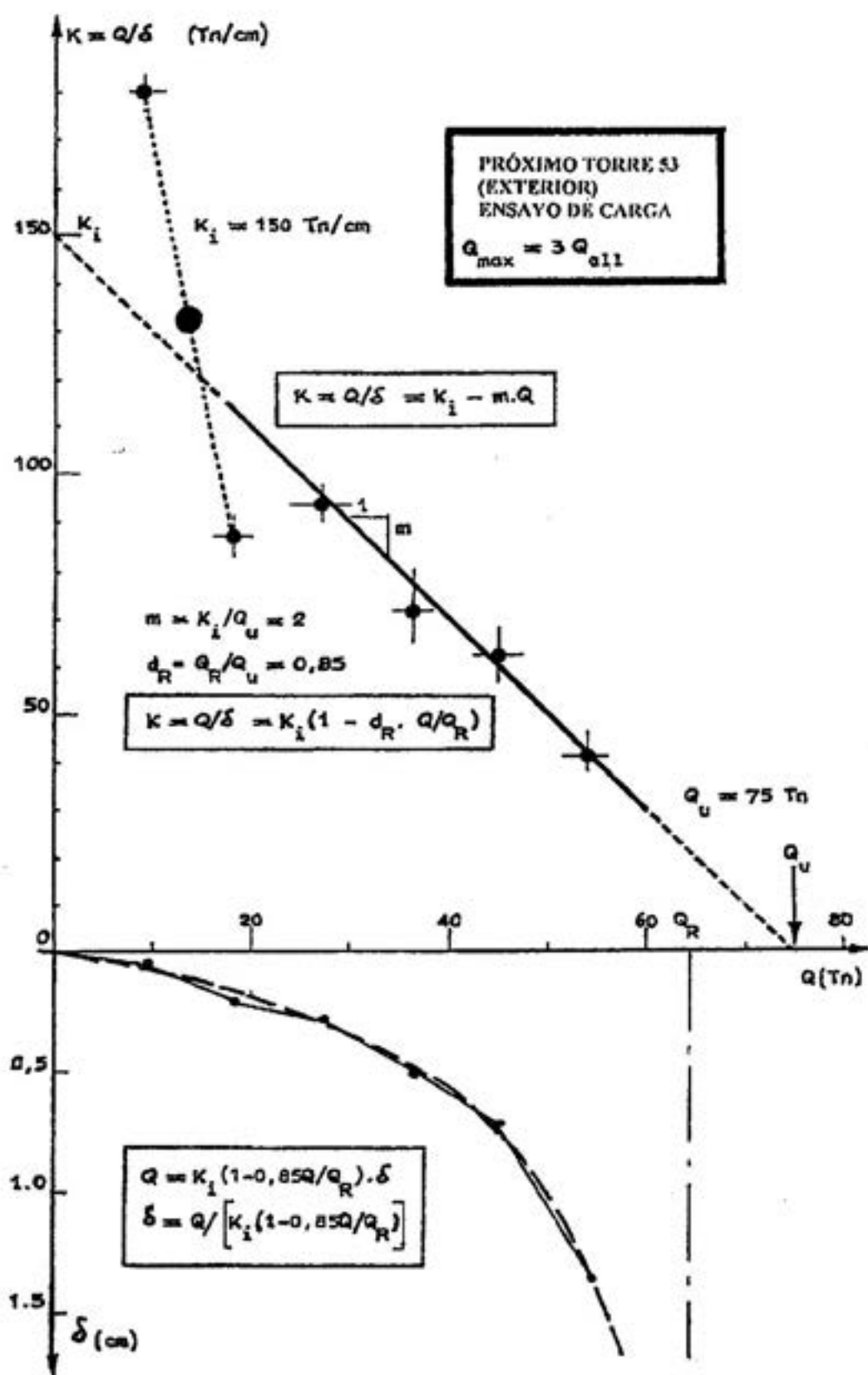


Fig. 17. Ensayo de carga sobre un micropilote prototipo.

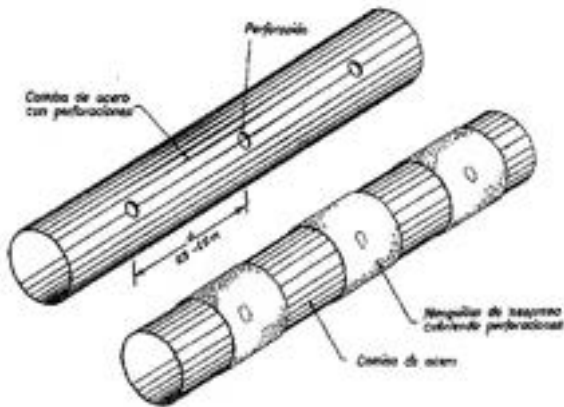


Fig. 18. Micropilote metálico con manguitos.

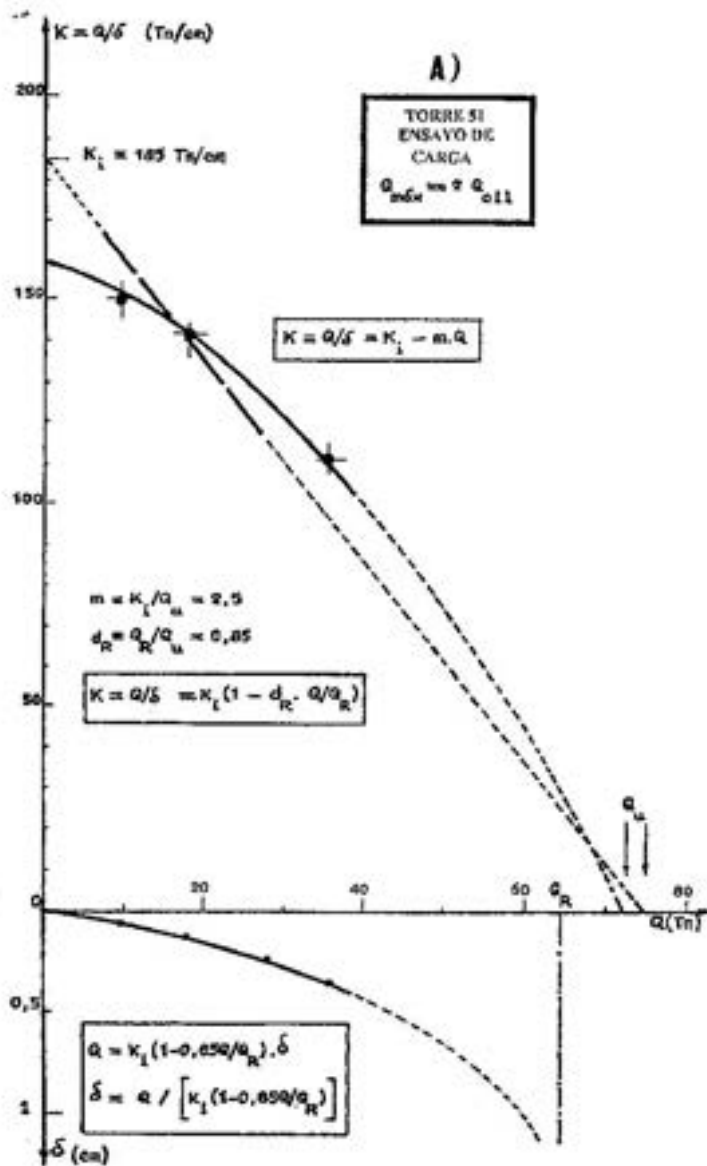


Fig. 19. Ensayo de carga sobre un micropilote de servicio en Torre 51.

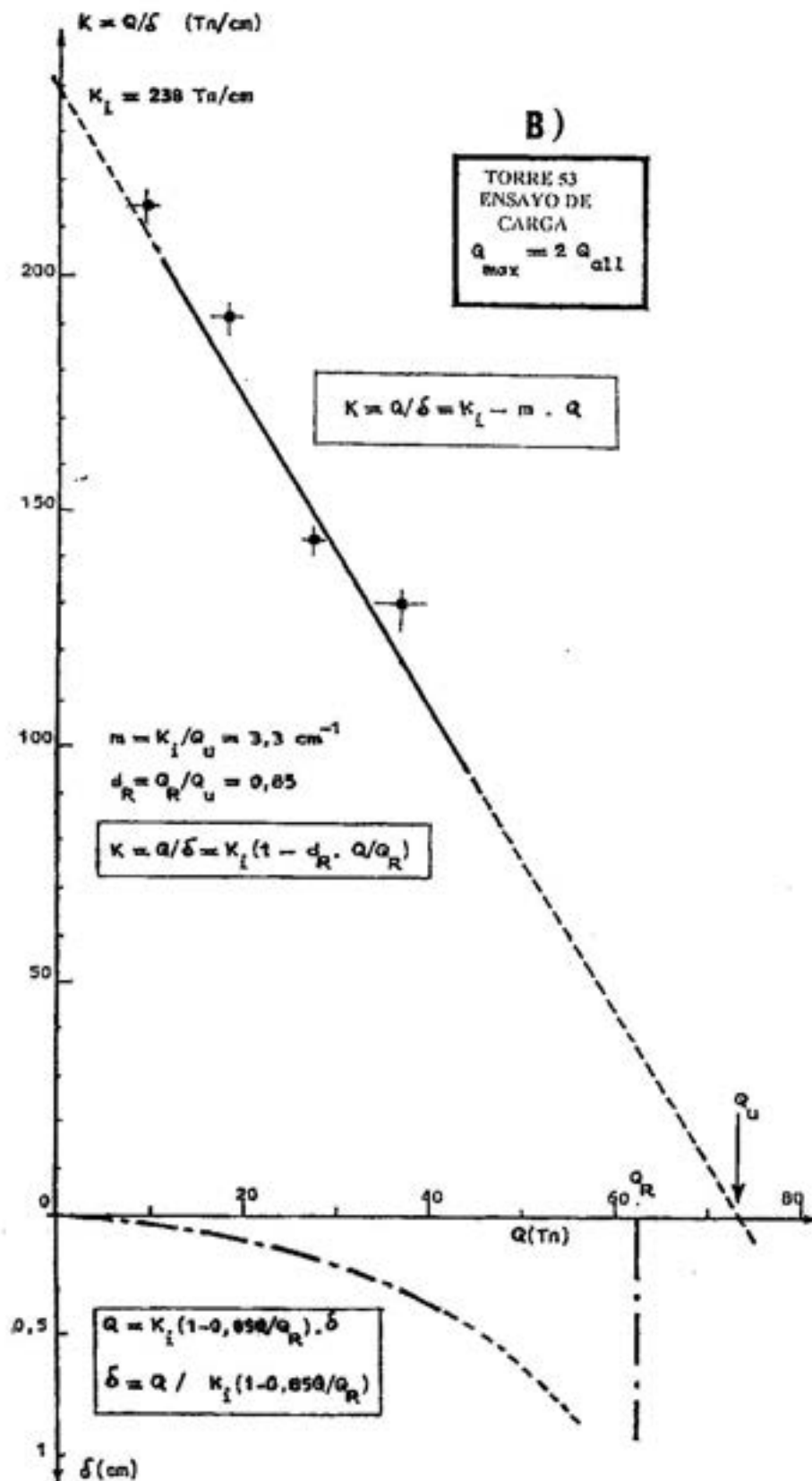


Fig. 20. Ensayo de carga sobre un micropilote de servicio en Torre 53.

Tabla I.

ASENTAMIENTO DE CABEZALES RIGIDOS	
Para estimar el asentamiento de un cabezal rígido pueden emplearse las siguientes fórmulas empíricas:	
$\frac{\delta}{\delta_0} = \left[\frac{2B(m)}{B(m) + 0,3 m} \right]^n$	$\frac{\delta}{\delta_0} = \frac{r}{1 + \alpha(r-1)}$
$r = B/B_0$; B_0 : diámetro o lado de un pilote ; B : diámetro o lado del grupo de pilotes ; d : distancia entre pilotes (del orden de $2 \div 3 B_0$) N^2 : número de pilotes en una dirección , $B = N^2 \cdot d$ δ : asentamiento del grupo ; δ_0 : a. de un pilote	
<ul style="list-style-type: none"> ▣ grupo de pilotes a través de suelos blandos que penetran en arenas o gravas arenosas densas ▣ Idem para arenas o gravas arenosas medianamente densas ▣ Idem para un grupo de pilotes trabajando predominantemente por fricción 	<ul style="list-style-type: none"> $n = 2$; $\alpha = 0,2$. $n = 3$; $\alpha = 0,1$ $n = 4$; $\alpha = 0,05$

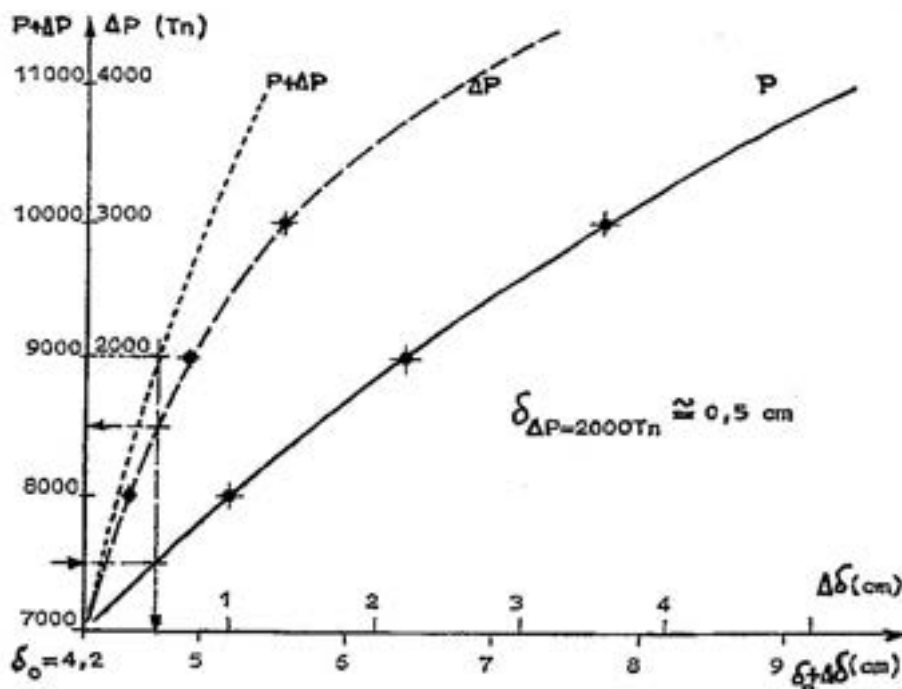


Fig. 21. Interacción entre la cimentación actual y el grupo de micropilotes.

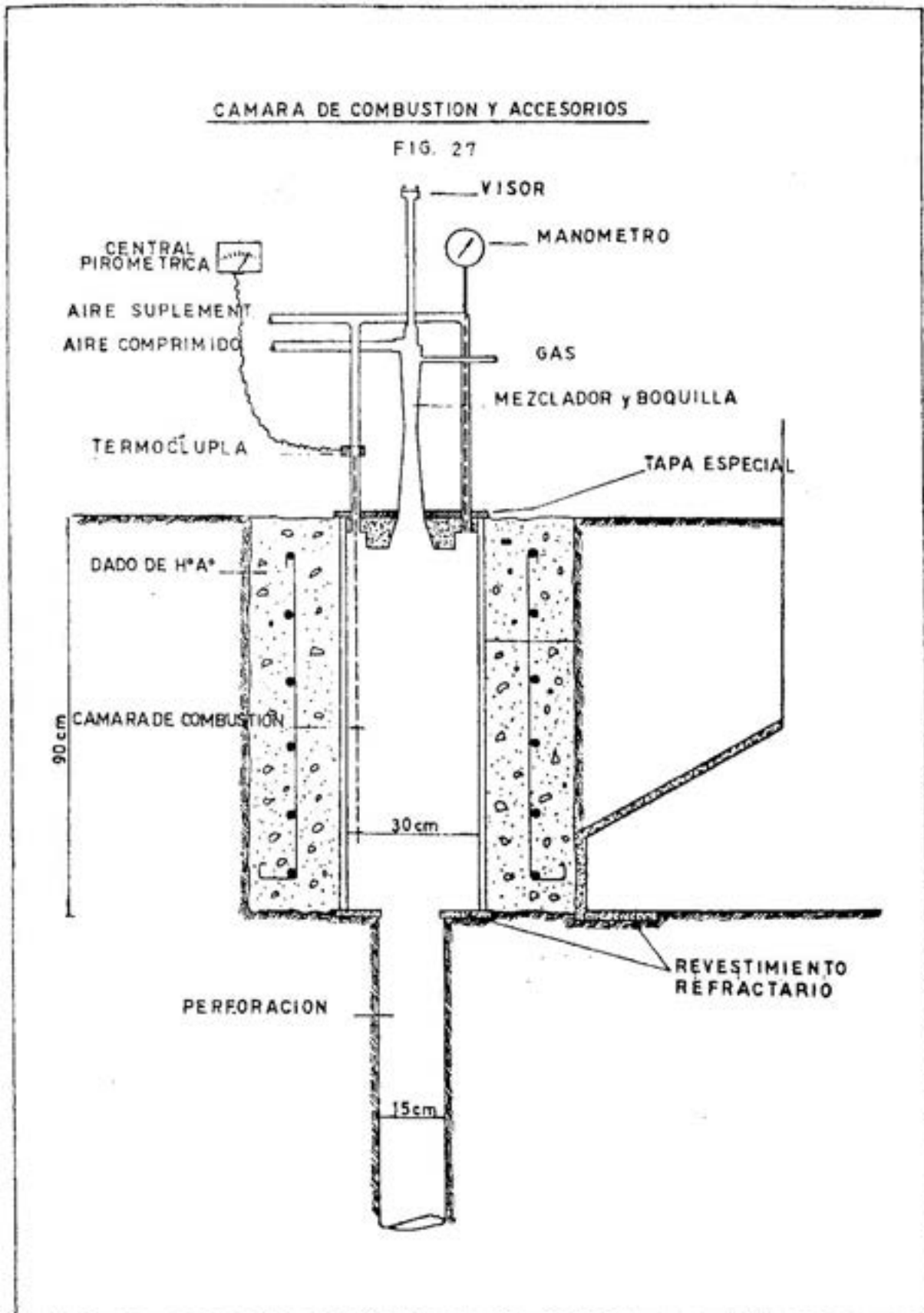


Fig. 22. Cámara de combustión y accesorios.

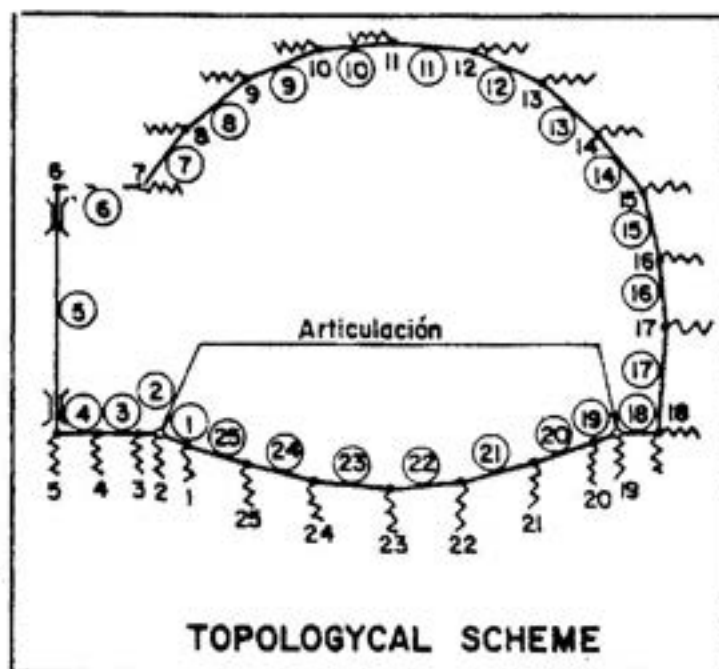


Fig. 25. Esquema topológico.

ción local típica denominada "cangahua"- presentaban algunas similitudes con nuestros suelos toscos del pampeano.

La investigación geotécnica mostraba que estos suelos -de estructura macroporosa y alta humedad- exhibían altos valores de los parámetros de resistencia no drenada c_u y ϕ_u , junto con un comportamiento relativamente frágil debido a una cierta cementación entre las partículas. La formación no era homogénea a lo largo de la traza, como se observa en la Figura 24. Dicha heterogeneidad también era apreciable al analizar los resultados de los ensayos triaxiales.

Esta circunstancia fue certificada a lo largo de un túnel piloto efectuado en correspondencia con el hastial central, que permitió una observación directa antes de expandirse lateralmente para completar la forma de los túnes definitivos.

La geotecnia debe proveer a los analistas estructurales de los parámetros de valor probable que permitan modelar las secciones de cálculo -Figuras 25 y 26- y efectuar análisis de sensibilidad para poder adaptarse durante la construcción a las verdaderas

condiciones del terreno. La Figura 27 muestra uno de los portales de los túneles comentados.

Problemas distintos presentan la construcción de túneles en macizos rocosos. Por ejemplo, en el túnel Cristo Redentor, cuyo esquema se presenta en las Figuras 28 y 29, las dificultades más importantes no se localizaron en correspondencia con el macizo mismo, sino en la zona del "talus", en donde se encuentra el material de derrumbe de la ladera, que obliga a un avance lento y muy cuidadosos para desarrollar adecuados sostenes temporarios que permitan posteriormente la ejecución de la estructura definitiva de revestimiento (Figura 30).

En otras oportunidades, cuando la traza se desarrolla a media ladera, como en el túnel Horcones, con tapadas irregulares y de relativo espesor, es conveniente ejecutar directamente una trinchera y construir lo que se denomina un "túnel artificial". Como luego de construido el túnel se lo cubre restituyendo la morfología original de superficie, el estado de esfuerzos que resultan para cada sistema constructivo y tipología particular es

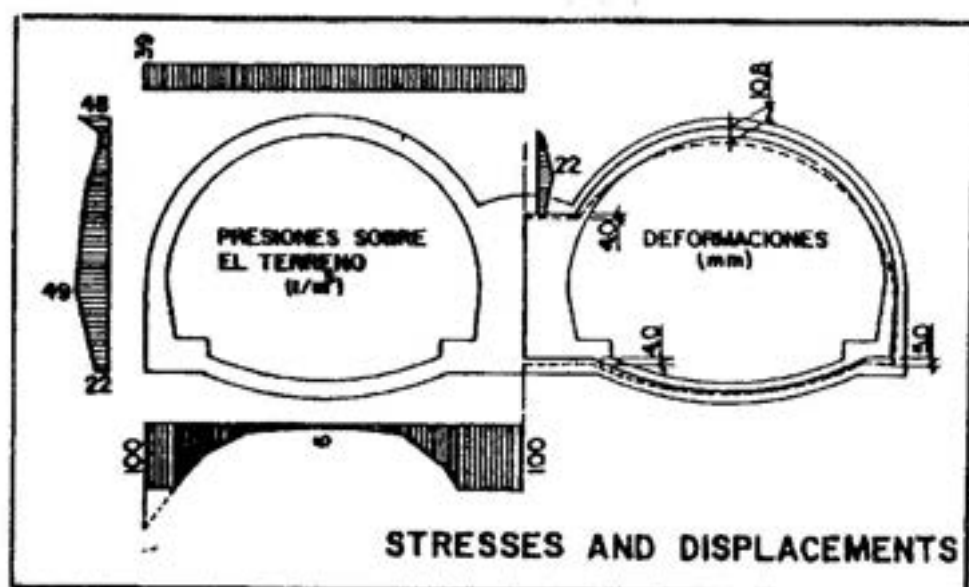


Fig. 26. Esfuerzos y desplazamientos.



Fig. 27. Vista de uno de los portales.

muy diferente, resultando también diferente las secciones estructurales correspondientes. Un ejemplo de túnel artificial se muestra en las Figuras 31 y 32. En ocasiones resulta más conveniente construir, en tramos relativamente cortos, galerías de tránsito, como se muestra en la Figura 33. Detalles constructivos,

portales y excavaciones de estas obras se muestran en las diapositivas que se exhiben (nota 1).

Los túneles requieren, en general, emplear todos los recursos de la investigación geotécnica en lo que se refiere a técnicas de campo, laboratorio y gabinete (métodos ana-

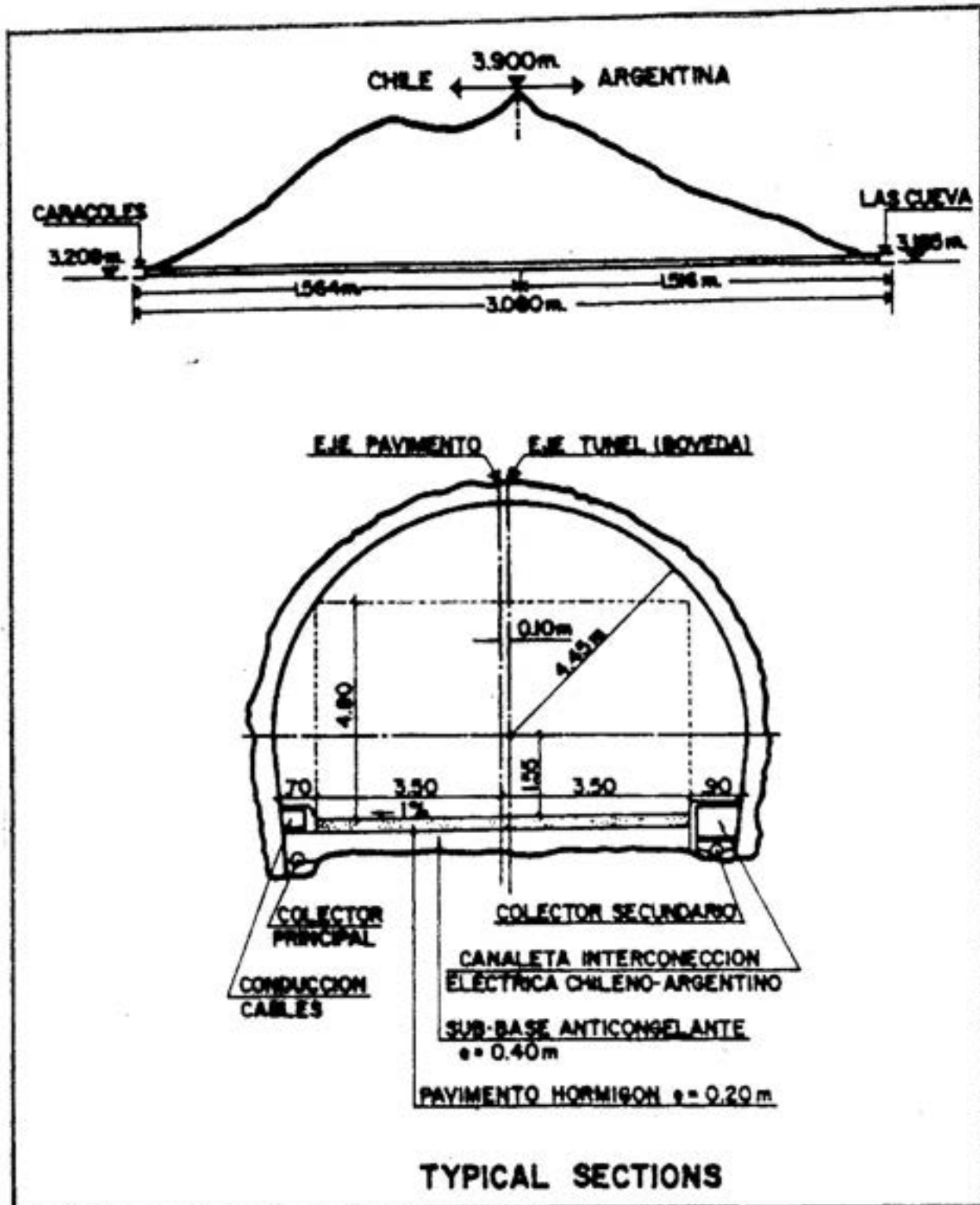


Fig. 28. Tunnel Cristo Redentor.

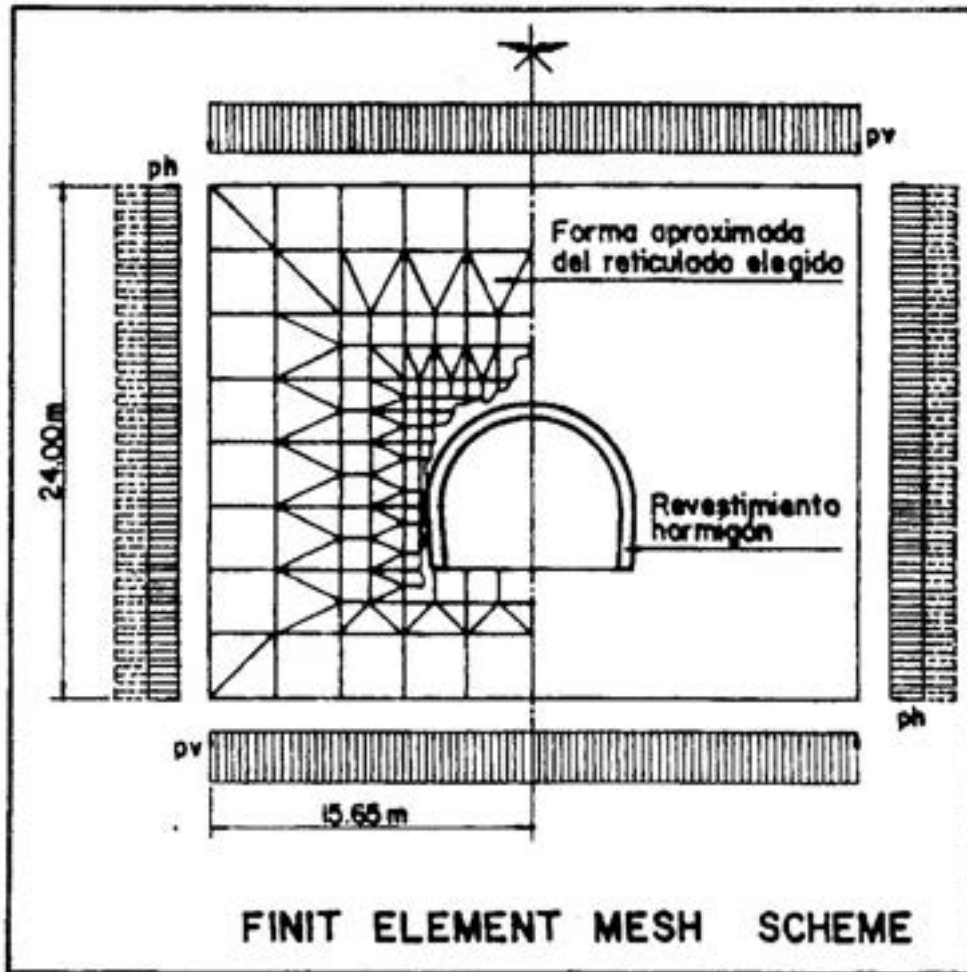


Fig. 29. Esquema de la malla de elementos finitos.



Fig. 30. Vista del tunel en el talus.

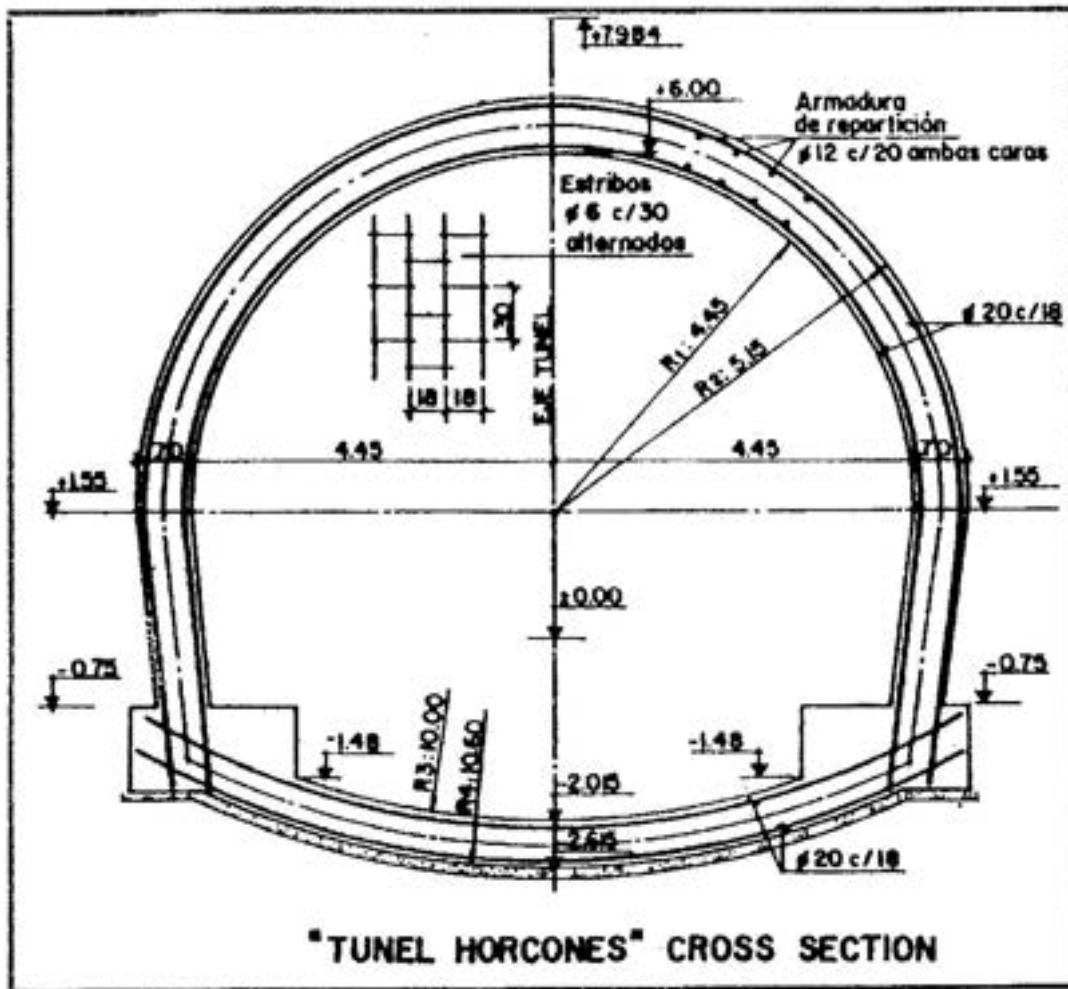


Fig. 31. Sección del Tunel Horcones.

líticos y numéricos que se desarrollan mediante cálculo computacional), y muchas veces ponen de manifiesto la insuficiencia de los conocimientos ingenieriles disponibles, y la importancia del "arte" y/o "experiencia ilustrada" de los hombres que dirigen y construyen estas obras.

Excavaciones

La ejecución de excavaciones obliga a verificar la estabilidad de las paredes laterales y del fondo, y constituyen un amplio campo de aplicación de la Geotecnia. En particular, quiero traer aquí el caso de una gran excavación realizada a principios de los '80 en La Plata, para la construcción del Nuevo Teatro Argentino.

Estas diapositivas (*nota 1*) muestran la gran excavación -que ocupa una manzana de forma cuadrada de unos 115 m de lado por unos 22 a 24 m de profundidad. Se emplearon anclajes pasivos excavados con una pequeña inclinación para facilitar el hormigonado y armadura suficiente para sustentar los empujes laterales. La ejecución se realizaba al mismo ritmo que se avanzaba en la excavación, uniéndose verticalmente los anclajes mediante columnas de H^{PA} que funcionaban como vigas verticales sobre apoyos elásticos. La Figura 34 ilustra sobre lo anterior. En el entrepaño, de 2,5 m de ancho, se colocaba malla de acero y se completaba la piel de soporte con hormigón proyectado de 3" de espesor. Toda esta estructura temporaria de soporte se pudo ejecutar con un equipo mínimo,

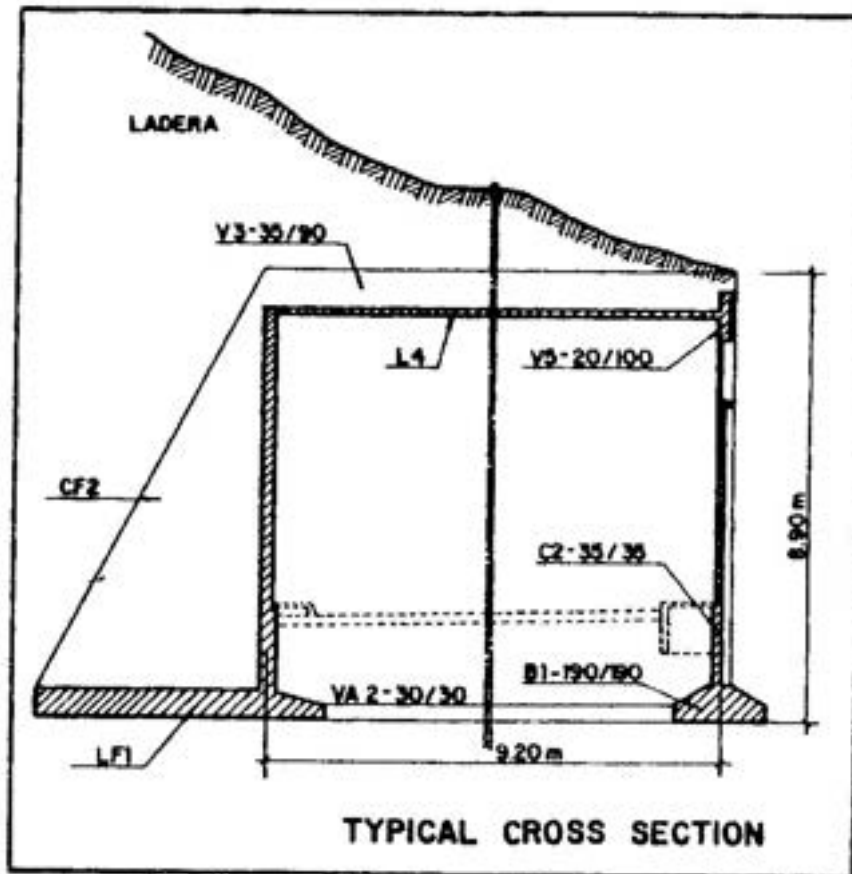


Fig. 32. Sección típica.



Fig. 33. Vista del tunel artificial.

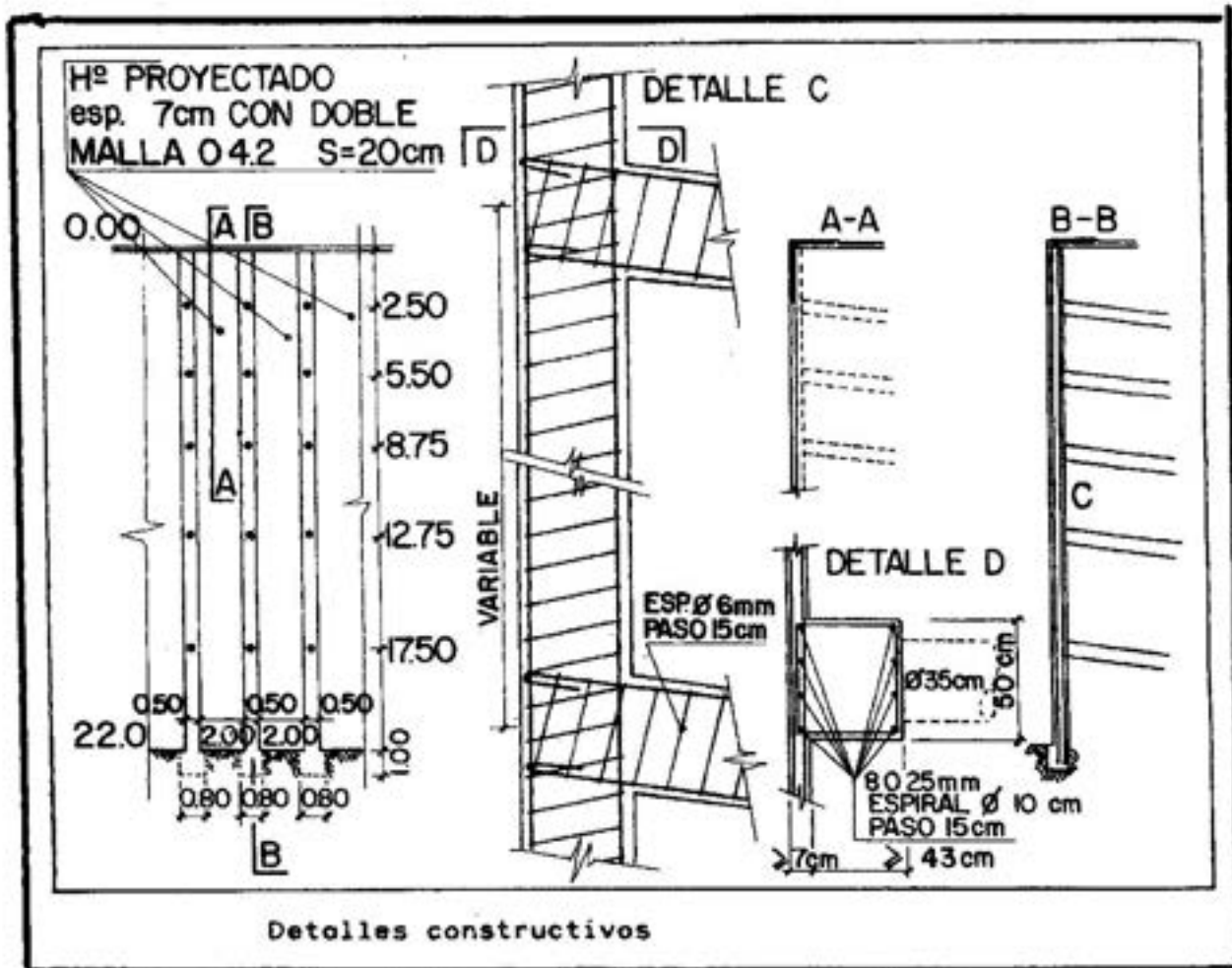


Fig. 34. Estructura temporaria de sostenimiento del Nuevo Teatro Argentino, en La Plata.

en forma relativamente muy económica y con una respuesta de la interacción suelo-estructura, muy ajustada a las previsiones teóricas consideradas en el diseño. La obra tuvo una gran importancia afectiva para quien habla, porque en el mismo solar y en la hermosa sala del viejo teatro lírico destruido por el incendio del '77, había vivido en mis años estudiantiles la música, el baile clásico y las operas inolvidables del arte universal.

Presas

La geotecnia también se ocupa de las estructuras constituidas por materiales sueltos; los ejemplos típicos son los terraplenes o pedraplenes y las presas. En ambos casos deberán considerarse los problemas derivados

de la interacción con los suelos o rocas de la fundación y de la resistencia y deformabilidad propia de la estructura misma. Las de mayor responsabilidad, y también las de mayor volumen, son las presas, que se diferencian de los terraplenes en que sobre una de los paramentos actúa permanentemente el agua embalsada. Debido a esta característica, el agua percola a través de los materiales permeables. Las presas deben cumplimentar, al menos, dos requerimientos fundamentales: estanqueidad y estabilidad. Esta última requiere que el comportamiento mecánico e hidrodinámico sea satisfactorio. La estanqueidad, por su parte, que el volumen de agua embalsada que escurre a través de la presa, fundación y estribos resulte menor a los valores establecidos en el proyecto.

Las presas de materiales sueltos se diseñan y construyen según diferentes topologías pero, en general, por razones económicas, se trata de emplear en la mayor medida los materiales locales disponibles.

En las diapositivas que se muestran (*nota 1*) se aprecian distintas vistas de la obra de Salto Grande en diferentes etapas de la construcción; esta presa es relativamente baja sobre un gran río de llanura. La parte central es de hormigón, con el vertedero entre las dos usinas hidroeléctricas laterales gemelas, una del lado uruguayo y otra del lado argentino; la obra se apoya sobre los basaltos de las coladas extremas del escudo brasileño. El dique se completa con presas de materiales sueltos a ambos lados de la obra de hormigón. Del lado argentino hay una esclusa de navegación, que es una estructura importante de H²A^o y que está localizada en una zona intermedia de la presa de tierra y escollera.

La geotecnia, con el nombre de Mecánica de Rocas, se aplica ampliamente durante las fases operativas que incluyen las grandes excavaciones necesarias para ejecutar las estructuras de hormigón, analiza su estabilidad temporaria e interviene en el diseño de las obras que permiten el control de las presiones del agua durante la vida útil de las estructuras. Con el nombre de Mecánica de Suelos se aplica en todos los aspectos de la cimentación y ejecución de los terraplenes de materiales empleados en la construcción. Un comentario: cuando ejecutábamos la "presa alta" del lado uruguayo, que tiene un "núcleo" de arcilla ancho, se produjo la rotura de Teton Dam, otra presa de núcleo ancho, y hubo una gran inquietud entre los ingenieros y que me afectaba directamente por ser el proyectista y el asesor durante todas las etapas constructivas. Pero afortunadamente habíamos tomado el recaudo de tratar en forma integral y cuidadosamente la roca basáltica en contacto con el núcleo para evitar el "arrastre" del material fino a través de las grietas y diaclasas del macizo natural. Este tratamiento se mostró de satisfactorio comportamiento, y luego de más de 20 años de operación del embalse no se han registrado inconvenientes. Para ciertos casos específicos, la teoría y la experiencia ha mostrado como necesarios estos

tratamientos. Tal vez los problemas que se presentaron en el Chocón se hubieran podido evitar con un tratamiento previo de las areniscas de fundación del núcleo de arcilla.

Entre las obras recientes presentaré dos presas cuya morfología son típicas, ambas en la provincia de San Luis y en las que he podido actuar en forma directa: la primera, ya construida y en carga -Río Grande-, y la segunda, en avanzado estado de construcción -Nogolí-.

En la Figura 35 se presentan las características fundamentales de Río Grande, y en la Figura 36, los asentamientos máximos medidos en correspondencia con la sección de mayor altura luego de llenar el embalse. A este tipo de presas se las denomina "de enrocadas con núcleo central". Como se aprecia en el corte correspondiente, los materiales se gradúan desde el núcleo constituido con fragmentos de rocas producto de voladuras en canteras localizadas en las cercanías de la obra. En este tipo de presas modernas los materiales se colocan en capas de espesor conveniente y son compactados con equipos que transmiten cargas estáticas o dinámicas para lograr altas densidades. Es fundamental que los materiales contiguos cumplan las condiciones granulométricas establecidas en las "leyes de filtros" para asegurar la estabilidad hidrodinámica, y que los fragmentos de rocas del espaldón aguas arriba -que están sometidos a la acción permanente del agua embalsada- sean suficientemente pesados para absorber la energía del oleaje. Además, en correspondencia con el apoyo de los materiales finos con la roca de cimentación, debe procederse a un cuidadoso tratamiento de consolidación e impermeabilización del macizo para evitar problemas de erosión interna en el contacto y disminuir las pérdidas de agua por filtración. La Figura 37 resume datos característicos de la presa de Nogolí. Esta también es una presa de enrocadas, pero los mismos están constituidos por los aluviones gruesos, con gravas y arenas, naturales transportados por el río y depositados en las cercanías del emplazamiento. La retención del agua del embalse se logra mediante una placa de hormigón armado apoyada sobre el espaldón agua arriba que se prolonga en la parte inferior mediante un "plin-

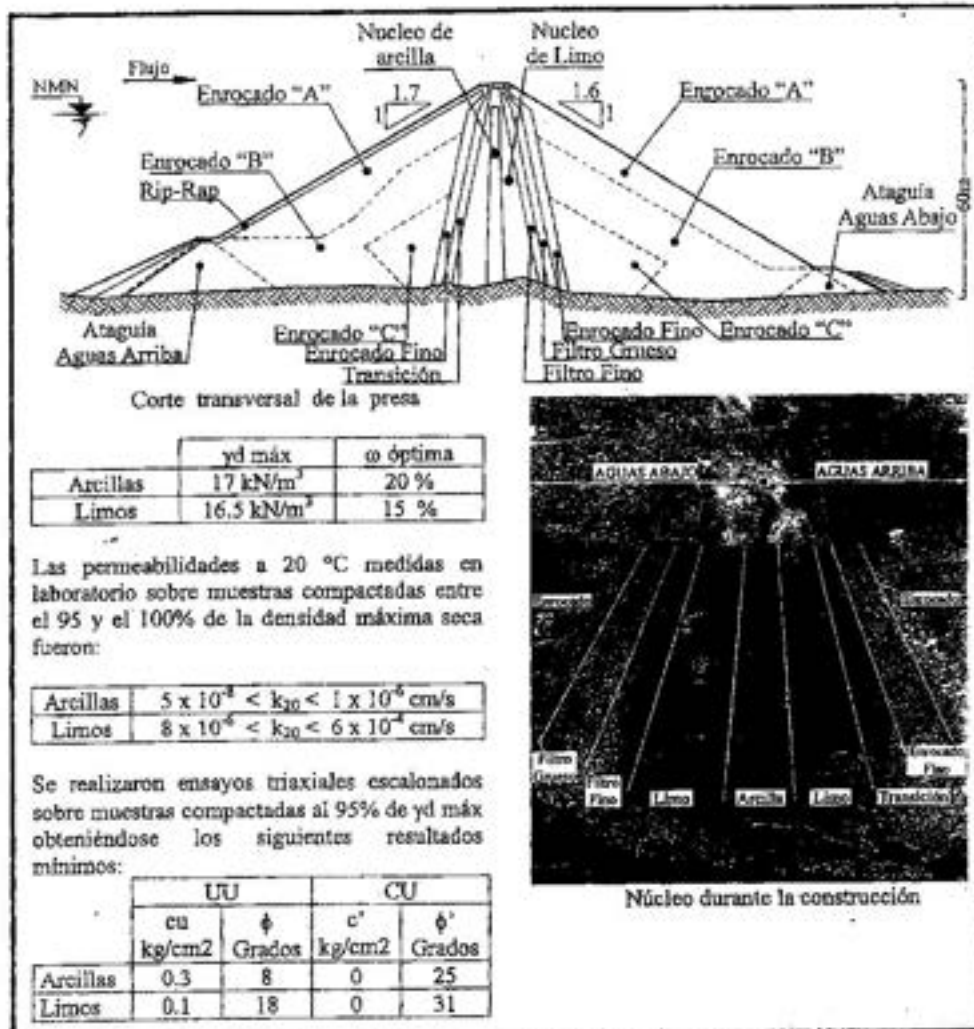


Fig. 35. Presa en el Río Grande, Pcia. de San Luis.

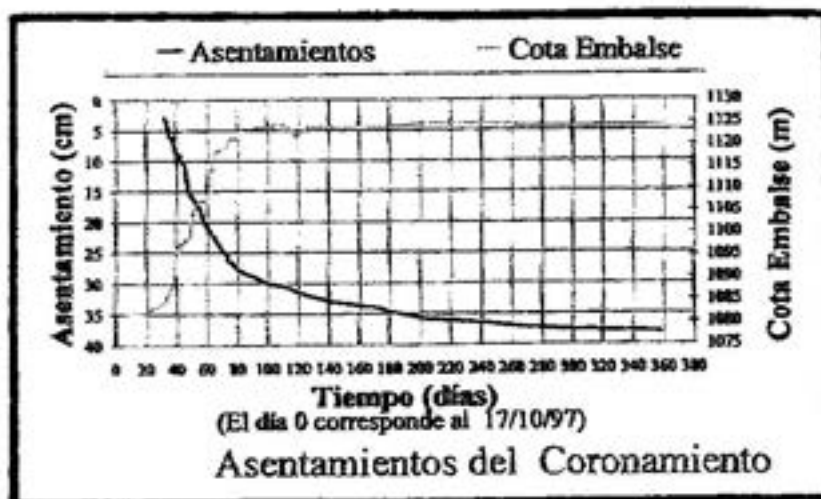


Fig. 36. Primer llenado.

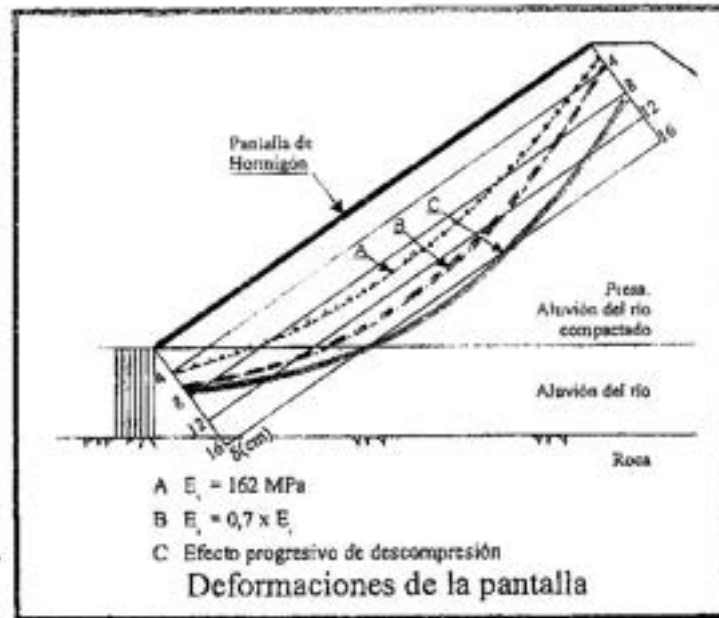


Fig. 38. Estimaciones de la deformación de la pantalla de H^oA^o.

to". Este zócalo está anclado directamente en la roca en la zona de los estribos, y en un núcleo de hormigón de cierre, cementado a la roca en la parte central de la presa. La roca en donde se apoya el plinto y cirre profundo está tratada con inyecciones de consolidación e impermeabilización. El cuerpo del terraplén bien compactado está drenado adicionalmente con chimeneas y soleras filtrantes. La estimación de la deformación de la pantalla de hormigón armado bajo la acción del agua del embalse se muestra en la Figura 38.

Ambas presas están localizadas en áreas de moderada actividad sísmica, por lo que se deben efectuar evaluaciones de la deformación residual del terraplén para el caso que ocurra el evento; en el actual estado del arte se dispone de métodos simplificados suficientemente confiables para las estimaciones correspondientes. En zonas de alta y muy alta actividad sísmica se emplean diversos métodos de cálculo que incluyen diferentes teorías sobre el comportamiento dinámico de los materiales, la interacción con las fundaciones e influencias de fallas, la relación con la morfología de la garganta y la respuesta del terraplén a las fuerzas que hipotéticamente actúan sobre los materiales involucrados.

Este es un tema actualmente de investigaciones teóricas y validaciones experimentales de amplio desarrollo.

Conclusiones

Podemos decir entonces que la Geotecnia, siendo una parte de la Ingeniería Civil, requiere, para su aplicación eficaz, de la permanente investigación sobre las propiedades mecánicas e hidráulicas de los materiales que emplea -en su condición "natural" o previamente manipulados, transformados y colocados- y cuyos estudios se efectúan indistinta o conjuntamente "in situ", en el laboratorio y en el gabinete de análisis. Esta característica intrínseca a la actividad geotécnica, obliga a una permanente revisión y reexamen de lo que se considera como "el estado del arte" en la especialidad, e introduce una necesaria dinámica en la operatoria de sus aplicaciones, poniendo de manifiesto lo que es común en la ciencia teórico-experimental: las conclusiones que se tienen por "ciertas", siempre son provisionarias y que, sin negar la existencia de la verdad objetiva, debemos ser conscientes de la precariedad de nuestro conocimiento y de la necesidad de perfeccionarlo.

Agradecimientos

En primer lugar, a mi esposa, por su comprensión, inteligencia y carácter, y a mis hijos, por su afecto y ayuda. Hoy está vivamente presente el recuerdo de mis padres, quienes formaron una familia abierta a las ideas y nos transmitieron su testimonio de una vida recta; a mi padre, por su rigor intelectual y su conducta moral, y a mi madre, por su afecto, sentido de la responsabilidad y amor por la música. También a mis hermanos, con quienes compartimos un ambiente pleno de inquietudes y alegrías. A mis maestros de Guaqueguay, en particular a don Anselmo Diorio, a quien siempre recordaré al frente de los tres últimos grados de mi escuela primaria, y a mis profesores de la escuela secundaria que me ayudaron en mi adolescencia. A mis profesores de la Universidad de La Plata que me enseñaron e ilustraron en las ciencias y en las artes de la ingeniería. A los Ings. Bolognesi y Gandolfo que me recomendaron para mi beca en España. A los Ings. Bolognesi y Moretto que me presentaron en Harvard, y con quienes durante catorce años compartimos esfuerzos profesionales y la atracción profunda por la geotecnia. En particular al Ing. Bolognesi, maestro riguroso que siempre exigió a sus discípulos dar de sí lo mejor. A mis estudiantes que dieron sentido a muchos de mis esfuerzos y que me enseñaron con sus preguntas de insobornable lucidez. A todos aquellos que hoy me acompañan en este acto de incorporación a la Academia, que es una de las mayores distinciones que puede recibir un universitario argentino. Y en particular, a mis amigos de Guaqueguay con quienes compartimos una parte de la vida, de los años de nuestra niñez y juventud y el sabor entrañable de nuestra tierra. Muchas gracias.

Bibliografía

- Bolognesi, A.J.L. (1975). Compresibilidad de los suelos de la formación Pampeano. 5° PCSMFE, Buenos Aires.
- Costes N.C., Carrier W.D., Mitchell J.K., Scott R.F. (1970). Apollo 11: Soil mechanics results. Journal ASCE SMFD, Vol. 96, N° SM6, Nov.
- Nuñez E., Micucci C.A., Vardé O.A., Bolognesi

- A.J.L., Moretto O. (1970). Contribución al conocimiento de los suelos loésicos. Estabilización de depósitos naturales. 2a. RAMSIF, Vol. 1, Córdoba, Argentina.
- Nuñez E. (1975). Suelos colapsables y preconsolidados por desecación. General Report Session II Special Soils, 5th PCSMFE, Buenos Aires.
- (1984). Caracterización de suelos. 8° Congreso SAMS, Neuquén, Argentina.
- (1986). Geotechnical conditions in Buenos Aires city. 5th International Congress of Engineering Geology, Buenos Aires.
- (1996). Túneles de sección circular en la formación pampeana. Boletín de la SAMS N° 29, Marzo.
- (1997). Esfuerzos y deformaciones en los problemas de interacción. Sesión IV, 1° COPAINGE, Asunción, Paraguay.
- (1999). Tanque sobreelevado apoyado sobre pilotes. XI CPMSIG, Foz de Iguazú, Brasil.
- Nuñez E., Micucci C.A. (1986). Cemented preconsolidated soils as a very weak rock. Proc. 5th Int. Congress of Eng. Geology, Buenos Aires.
- Nuñez E., Puy E. (1986). Contributo al progetto e costruzione di gallerie autostradali. Proc. Int. Congress on Large Openings, Firenze, Italy.
- Nuñez E., Trevisán S.J. (1997). How to continue La Plata cathedral. Geotechnical approach. Proc. Int. Symposium on Geotechnical Engineering for Preservation of Monuments and Historic Sites, Napoli, Italy.
- (1999). Main towers of La Plata city cathedral. Reinforcement of foundation. XI PCSMGE, Foz de Iguassu, Brazil.
- Nuñez E., Hernández Balat V., Suárez J.A., Bissio F., Mosquera G. (1999). Presa de enrocado en Río Grande. San Luis, Argentina. Memorias del XI CPMSIG, Foz de Iguazú, Brasil.
- (1999). Presa de aluviones naturales con pantalla de hormigón sobre el río Nogoli. San Luis, Argentina. Memorias del XI CPMSIG, Foz de Iguazú, Brasil.
- Sfriso A.O. (1996). Revestimiento de túnel circular. Comentario. Boletín de la SAMS N° 31, Nov.
- Terzaghi K. (1957). Opening address. Proc. Fourth Int. Conference on Soil Mech. and Found. Eng., Vol. III.

Manuscrito recibido y aceptado en diciembre de 2000.

PRESENTACIÓN DE LA DRA. ANGELA F. DANIL DE NAMOR COMO ACADÉMICA CORRESPONDIENTE EN GUILDFORD, SURREY, REINO UNIDO

Pedro J. Aymonino

Académico Titular de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Es para mí un privilegio y un placer presentar a la Dra. Angela Fátima Danil de Namor, que es la primera mujer que accedió a la condición de profesor en la Universidad de Surrey y una de las pocas profesoras en el Reino Unido, las que en número no pasan de la media docena.

Ella nació en Bahía Blanca y se graduó en la Universidad Nacional del Sur, sita en esa ciudad, con el título de Licenciada en Bioquímica, compartiendo el estudio con la atención de su esposo, Meli, aquí presente, y la crianza de sus dos hijos Omar y Cintia, de los que sólo esta última nos acompaña junto con su esposo.

Además, se desempeñó en esa Universidad como ayudante docente y de investigación.

En 1970, la familia se mudó a Guildford, Surrey, Inglaterra y al año siguiente ella obtuvo el título de Doctor en Filosofía (PhD).

Entre 1974 y 1977 actuó como miembro posdoctoral de investigación en el Departamento de Química de esa Universidad, con financiación de la firma Unilever. En 1977 fue nombrada "research officer" de tiempo completo, con obligaciones docentes.

En 1984 pasó a ser "lecturer", en 1996, "reader", y en este año en curso, profesor.

Ha dictado, en Guildford, cursos de química, electroquímica, termodinámica, química analítica general y del medio ambiente, química supramolecular y química de sistemas de solventes.

Desde 1988 es Directora del Laboratorio de Termoquímica, reconocido como uno de los principales del mundo en el tema. Actualmente es Directora de Programas de Posgrado y Vicedecana para Vínculos Académicos con Universidades Latinoamericanas, en su Universidad. En esta última función, ha establecido relaciones con investigadores de universidades de la Argentina (las nacionales de La Plata, Luján y del Sur), Brasil, Chile y Perú. En este último país ha puesto en marcha sendas maestrías en las universidades nacionales de San Agustín, en Arequipa y del Altiplano, en Puno y en la Católica de Santa María, también en Arequipa. Para eso tuvo el patrocinio del Consejo Británico y de la Administración de Desarrollo en Ultramar y, además, contó con la colaboración de miembros de la Universidad de Guildford y de otras universidades y de la industria del Reino Unido, así como también de la de Lund, en Suecia, quienes han dictado cursos y tomado exámenes. Como resultado de esa actividad, setenta jóvenes peruanos ya han realizado las maestrías.

Pero su actividad en Perú no se limita a la docente pues, en la Universidad Nacional de San Agustín, creó un grupo de investigación en química supramolecular para

Presentación realizada el 27 de agosto de 1999.

el que implementó un laboratorio adecuado a sus necesidades. Además, recibe en su laboratorio a jóvenes peruanos para iniciarse en la investigación y realizar sus doctorados.

La tarea de investigación de la Prof. Namor, en colaboración con grupos de Perú, se extiende a la Argentina (Bahía Blanca y La Plata), Brasil (San Carlos) y Chile (Santiago) y también uno de España, a través de un programa sobre química supramolecular y más explícitamente, sobre ligandos macrocíclicos para el diseño de nuevos materiales destinados al reconocimiento y extracción de metales, apoyado por el denominado Grupo de Investigación Europeo-Latinoamericano, del que ella es fundadora y presidenta. Parte de ese programa está financiado por la Comunidad Europea, como es el caso del convenio que la Prof. Namor tiene con algunos de nosotros, el Prof. J. Costamagna, de Chile, aquí presente y colegas de universidades de Perú, Inglaterra y España.

La Prof. Namor ha dirigido y codirigido una veintena de tesis doctorales, número considerable teniendo en cuenta la naturaleza de la temática que desarrolla. En muchos casos, se trata de alumnos extranjeros, muchos sudamericanos y, en particular, peruanos, debido, en este último caso, a las fuertes relaciones recién mencionadas que la Dra. Namor mantiene con universidades de Perú.

Precisamente, en reconocimiento a esa actividad, ha sido designada profesora honoraria de las Universidades de San Agustín, del Altiplano y Santa María.

Ha publicado alrededor de 100 trabajos en las revistas de química más reputadas, número por cierto considerable dada la meticulosidad, laboriosidad, paciencia y tiempo que exige la realización de determinaciones confiables en el campo de la termodinámica.

Además, ha actuado como editora de diversas obras relacionadas con sus temas de trabajo y es asesora y árbitro para la Comunidad Europea, la Fundación Internacional de Ciencia, el Consejo Chileno de Investigaciones, Fomec (Argentina) y revistas internacionales de primera línea, de su especialidad.

Ha organizado y presidido reuniones científicas nacionales e internacionales y dictado conferencias plenarias en congresos y, por invitación, en centros académicos de diversos países.

La Prof. Namor ha recibido, en 1991 y 1995, el premio Franzosini otorgado por la IUPAC (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada), en mérito a las importantes contribuciones realizadas por su Laboratorio.

Ha actuado intensa y fructíferamente en comisiones de la IUPAC.

El tema principal de trabajo de la Prof. Namor es la química supramolecular, fundamentalmente en sus aspectos preparativos, termodinámicos y electroquímicos, que incluyen la influencia de solventes sobre electrolitos y sus reacciones y el estudio de reacciones de formación y disociación de complejos.

Finalmente, cabe hacer notar que la Prof. Namor es la segunda mujer que se incorpora a esta Academia en toda su larga historia, habiendo sido la primera y muy recientemente, la Dra. Mariana Weissmann, como miembro titular. De las dos, además del delicado y distinguido toque femenino que le aportan a la Academia, son de esperar importantes contribuciones al desenvolvimiento de la institución que, aun en el caso de la Prof. Namor, a pesar de vivir en Inglaterra, seguramente no habrán de ser pocas, conocidas sus dotes personales y especialmente su permanente interés en lo académico, su rigurosa formación e intensa actividad en ese ámbito, su interés por su país natal abonado por los frecuentes viajes que realiza a la Argentina y a la laboriosidad y ejecutividad que la caracterizan.

Ha sido para mí un privilegio presentar a una personalidad tan distinguida como es la Prof. Namor, a quien le expreso mis congratulaciones por la tarea que realiza en pro de la química y los químicos de Latinoamérica y le auguro un futuro pleno de éxito y realizaciones. Finalmente, le reitero a la Prof. Namor la bienvenida a esta Academia y el agradecimiento anticipado por lo que seguramente habrá de hacer por ella.

SUPRAMOLECULAR CHEMISTRY: THERMODYNAMIC ASPECTS

Angela F. Danil de Namor

Laboratory of Thermochemistry, Department of Chemistry,
University of Surrey, Guildford, Surrey GU2 5XH, UK.

Resumen

Un resumen de las actividades del Laboratorio de Termoquímica en el campo de la Química Supramolecular con particular referencia a la termodinámica de procesos de formación de complejos con cationes en diferentes medios es presentado.

La relevancia de estos estudios sobre diferentes áreas es demostrada con ejemplos representativos.

Palabras clave: Química supramolecular, termodinámica, procesos en solución.

Abstract

A summary of the activities of the Thermochemistry Laboratory in the field of Supramolecular Chemistry with particular reference to the thermodynamics of cation complexation processes in different media is given.

The relevance of these studies in several areas is demonstrated with representative examples.

Key words: supramolecular chemistry, thermodynamics, solution processes.

Introduction

Supramolecular Chemistry as stated by Lehn is *'the chemistry of the intermolecular bond, being concerned with the structures and functions of chemical species of greater complexity than the molecules themselves'* [1, 2]. However the notable ex-

pansion of this area in the last three and half decades has required a continuous revision of the definition of Supramolecular Chemistry as given by Lehn [3]. Through this paper macrocycles are considered as molecules characterised by holes or cavities and these are referred as hosts while guests are ionic and neutral species. The hosts are neutral and therefore these are non-electrolytes in solution.

The roots of Supramolecular Chemistry date back to the end of the 19th century, beginning of the twentieth century

Conferencia pronunciada en su incorporación como Académica Correspondiente en Guildford, Surrey, Reino Unido, el 27 de agosto de 1999.

when fundamental concepts such as coordination, recognition and fixation were introduced by Werner [4], Fischer [5] and Ehrlich [6] respectively. The beginning of Supramolecular Chemistry took place with the realisation that alkali-metal cations were selectively complexed by natural [7] and synthetic [8] macrocyclic ligands. It was however the discovery of synthetic macrocycles in the late sixties, early seventies which triggered the extraordinary development of this area of research. Since then Supramolecular Chemistry has developed to an extent that it is considered today as one of the most active areas of research. Thus the pioneering work by Pedersen (crown ethers) [9], Lehn (cryptands) [1] and Cram (spherands) [10] was acknowledged with the Nobel Prize Award in 1987.

Thermodynamic aspects of Supramolecular Chemistry. Objectives

The synthetic developments in the field of Supramolecular Chemistry have been greatly motivated by the interest in finding ligands which are able to interact selectively with one species relative to another in a given medium. Quantitative assessments of selectivity have been made and these are based on the stability constant ratios of their complexes in a given solvent and at a given temperature. However such assessments requires accurate thermodynamic data, the derivation of which is by no means trivial particularly for processes involving ionic species. Thus for a given cation, M^{n+} , and a given ligand, L, to give a 1:1 metal-ion complex, $M^{n+}L$ in a given solvent, s, the complexation process may be represented by eq. 1

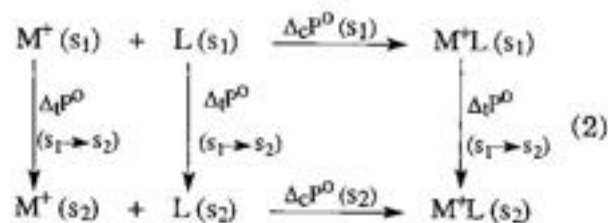


The formulation of eq. 1 [11] not only requires an investigation of the composition of the complex but also requires knowledge regarding whether the free and the complex electrolytes are predominantly in their ionic forms in solution as demanded by eq. 1. Although information regarding the behaviour of the free metal cation salts

in different solvents is available in the literature [12, 13], this has been often ignored. In contrast, knowledge regarding the solution properties of macrocycle based electrolytes in different solvents is very limited [11]. Therefore it can be safely stated that a great deal of thermodynamic data involving ionic species are based on the assumption that if the free metal-ion salt is fully dissociated in a given medium, the same behaviour is expected for the complex metal salt since this is formed by a large cation and as such is unlikely to interact with the anion. Although this may be often the case, the validity of such assumption needs to be experimentally verified in order to fulfil the requirements of eq.1 which explicitly demands that the free and the complex cations are predominantly as ionic species in solution. These have been recently discussed by the author [11].

Distinctive features of our Laboratory relative to others worldwide in this field involve investigations on

i) the medium effect on the complexation process (eq. 1) by the thermodynamic characterisation of the reactants (the metal cations, M^+ and the ligand, L) and the product (metal-ion complex, M^+L) participating in the binding process [14]. This statement is illustrated in the following thermodynamic cycle introduced by us in 1977 [15]. In this case, univalent cations are considered



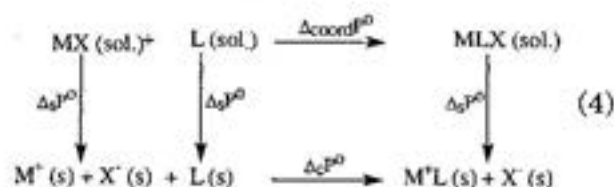
In eq. 2; $\Delta_c P^0$ ($P^0 = G^0, H^0, S^0$) are the thermodynamic parameters of complexation in a reference solvent (s_1) and other solvent (s_2) where $\Delta_t P^0$ are the corresponding data for the transfer of the free cation, the ligand and the metal-ion complex from s_1 to s_2 .

Accordingly, the relationship between complexation and transfer thermodynamics is shown in eq. 3

$$\Delta_c P^\circ (s_1) - \Delta_c P^\circ (s_2) = \Delta_t P^\circ (M^+) (s_1 \rightarrow s_2) + \Delta_t P^\circ (L) (s_1 \rightarrow s_2) - \Delta_t P^\circ (M^+L) (s_1 \rightarrow s_2) \quad (3)$$

This equation unambiguously demonstrates that the medium effect on the complexation process is determined by the differences in solvation of the reactants and the product [11].

ii) the coordination process ($\Delta_{\text{coord}} P^\circ$) [16,17] referred to the reactants and the product in their pure physical state as shown in eq. 4



In eq. 4; $\Delta_s P^\circ$ are the thermodynamics of solution of the free (MX) and the complex metal-ion salt (MLX) and the ligand (L).

Coordination data have proved to be a useful mean to check the accuracy of the thermodynamic values involved in the cycle since for a given system, $\Delta_{\text{coord}} P^\circ$ should be the same (within the experimental error) independently of the solvent from which these are derived. In addition, $\Delta_{\text{coord}} P^\circ$ is dependent on the counter-ion constituent of the salt and as such it has been possible to evaluate the anion effect on the process shown in eq. 4 [17]. Another important point to stress is that related with the difficulties associated with the determination of the thermodynamics of cation complexation process in low dielectric media. In these media, extensive ion-pair formation takes place and therefore additional processes besides complexation are involved. Therefore the data obtained are not referred to a well defined process. In this situation, combination of coordination and solution data can lead to the calculation of complexation data in low dielectric medium.

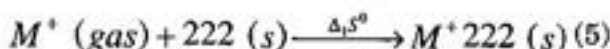
iii) the factors which contribute to the selective extraction of metal cations from aqueous solutions to an organic phase in the presence and in the absence of the macrocycle [18, 19].

Some of the areas covered are now briefly described. These include synthetic macrocycles (cryptands, crown ethers, calixarenes and their lower rim derivatives) and natural macrocycles such as cyclodextrines. Representative ligands are shown in Fig. 1. These contributions will be described in chronological order.

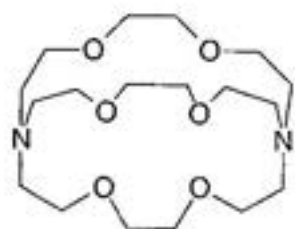
1. Thermodynamics of cryptands and metal cations

Cryptands are macrobicyclic ligands characterised by the presence of a three dimensional hydrophilic cavity lined with oxygens and nitrogen donor atoms as shown in Fig. 1. The size of this cavity is determined by the size of the bridges connecting the nitrogen atoms. It is the presence of the intramolecular cavity, the distinctive feature of cryptands relative to crown ethers (holes) and consequently, cation complexes with the former ligand (cryptand) are much more stable than cation coronand complexes [20, 21].

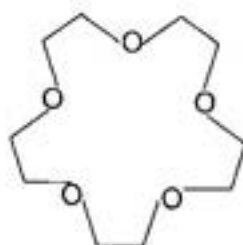
The availability of complexation Gibbs energies [22-25], enthalpies and entropies [26-31] for univalent cations and cryptand 222 (222) in a wide variety of dipolar aprotic solvents including those characterised by their low mutual solubility in water (which can be therefore used for the direct partitioning of electrolytes) led to the calculation of the entropy, $\Delta_1 S^\circ$ for the process described by eq. 5 [32-34]



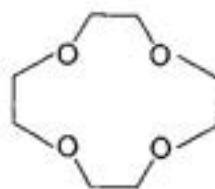
This is essentially the transfer of the cation from the gas phase to the solvated cryptand to form the solvated cryptate, $\text{M}^+ 222$ in the appropriate solvent. The $\Delta_1 S^\circ$ values in the various dipolar aprotic solvents (N,N-dimethylformamide, dimethylsulphoxide, propylene carbonate, acetonitrile, nitromethane) were found to be



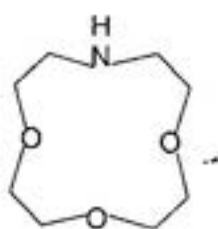
Cryptand 222



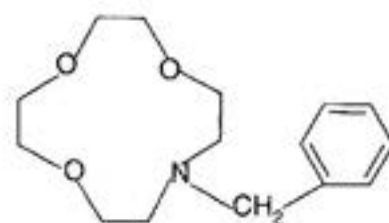
15-crown-5



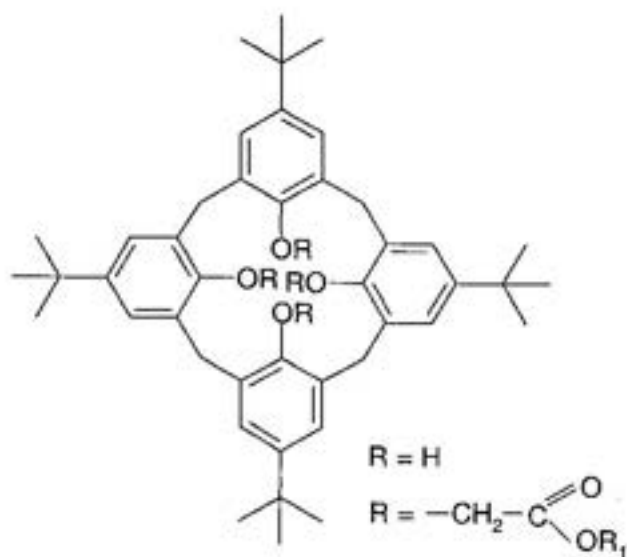
12-crown-4



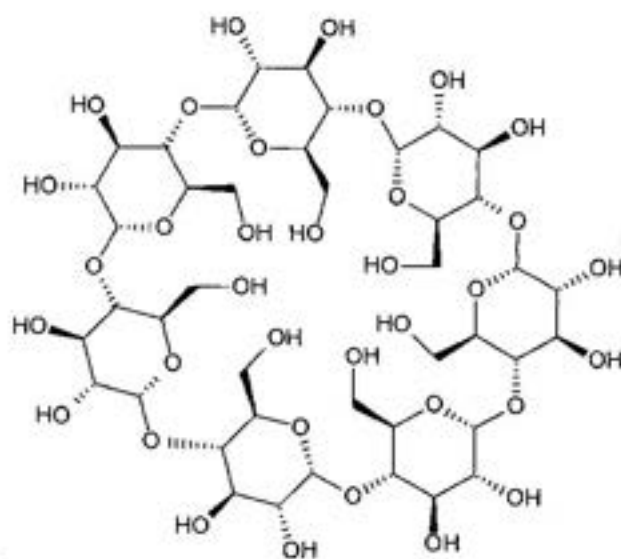
1-aza-12-crown-4



1-benzyl-1-aza-12-crown-4



Lower Rim *p*-*tert*-butylcalix(4)arene and its derivative



β -Cyclodextrin

Fig. 1. Representative Macrocycles.

constant. Since $\Delta_i S^\circ$ may be equalled to the contribution of both, the solvation entropy of the cation, $\Delta_{solv} S^\circ$ and the entropy of complexation of the same cation with the ligand, $\Delta_c S^\circ$ (eq. 6),

$$\Delta_i S^\circ = \Delta_{solv} S^\circ + \Delta_c S^\circ \quad (6)$$

It follows that the following correlation holds,

$$\Delta_c S^\circ = \text{constant} - \Delta_{solv} S^\circ \quad (7)$$

Thus, a linear correlation between the $\Delta_c S^\circ$ values and $\Delta_{solv} S^\circ$ in non-aqueous solvents (dipolar aprotic solvents) was shown (Fig. 2).

The important points derived from this correlation are summarised as follows.

(i) Fig. 2 essentially shows agreement between two alternative extrather-

modynamic (the $\text{Ph}_4\text{AsPh}_4\text{B}$ convention [35] and the cryptand convention [36]) means of estimating entropies of transfer of ions from water to different solvents. The validity of eq. 7 for non-aqueous solvents, mainly dipolar aprotic solvents, allows the calculation of entropies of solvation for alkali metal and silver cations (and therefore $\Delta_i S^\circ$) from entropies of complexation data between these cations and cryptand 222 and vice versa.

(ii) The correlation found was not so expected, since there is information in the literature on the formation of 'exclusive' complexes between some cryptands and some metal cations [37]. It is expected that cation desolvation occurs upon complexation. However there are degrees of desolvation. These findings unambiguously demonstrated that these univalent cations are almost fully desolvated when entering the cavity of the macrocycle and it is on this basis that a linear correlation is found. This was indeed the first quantitative correlation ever shown between entropies of solvation and entropies of complexation in these systems.

Further work carried out with cryptand 222 and bivalent and trivalent cations led us to the conclusion that the effective shielding effect of the ligand for univalent cations in dipolar aprotic media appears to weaken considerably for bivalent (Ba^{2+}) cations and breaks completely for some of the lanthanide cations [38]. As far as bivalent and trivalent cations are concerned further experimental work needs to be carried out in order to confirm these findings.

2. Effect of cyclodextrins on the transfer of drugs (substituted sulfonamides) from water to chloroform [39]

As shown in Fig. 1 cyclodextrins are macrocycles constituted by glucose units and characterised by a hydrophobic cavity which is able to form inclusion complexes with a large variety of guests. Particular emphasis has been placed on the applications of cyclodextrins in the pharmaceuti-

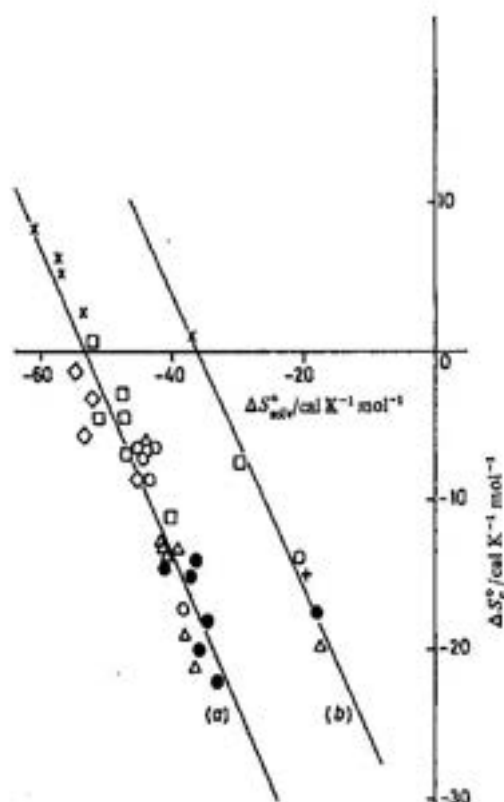


Fig. 2 Linear correlation between entropies of complexation of cryptand 222 with metal ions and entropies of solvation of these ions (a) in non-aqueous solvents and (b) in water. x, Li^+ ; □, Na^+ ; ○, K^+ ; △, Rb^+ ; ●, Cs^+ ; □, Ag^+ ; +, Tl^+ .
1 cal = 4.184 J

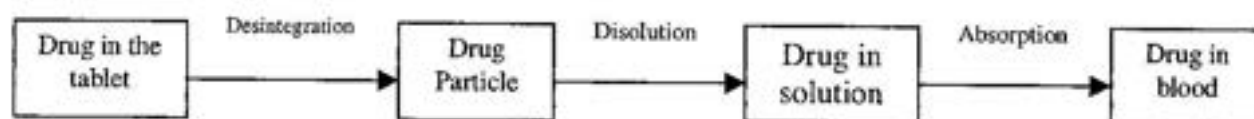


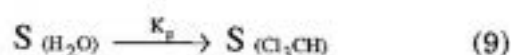
Fig. 3. Drug Bioavailability

cal industry [40]. An interesting aspect is that related to the solubility enhancement observed for slightly soluble drugs by the addition of cyclodextrins (nontoxic macrocycles). If the different steps involved in the bioavailability of a drug are considered (see Fig. 3), an important one is that related to the transfer across the absorption barrier. The effect of cyclodextrins on the transfer of *N*'-substituted sulfonamides (S) was investigated in the water-chloroform solvent system. It is only on the basis of its low dielectric constant that chloroform has been often used as a representative of the membrane. The fact that (i) no complexation appears to take place between cyclodextrin and these drugs in chloroform and (ii) the solubility of the complex (S-CD) in chloroform was approximately the same as that of the drug in this solvent, it was concluded that the overall transfer process involves two steps

(i) the dissociation of the sulfonamide - cyclodextrin complex in water



(ii) the partition of the drug from water to chloroform.



Therefore $K_{ex} = 1/K_d \times K_p$. Since $K_p > K_{ex}$ it was then concluded that from the thermodynamic view point, sulfonamides are more favourably transferred in the absence of β -cyclodextrin than in its presence. Indeed the advantage of increasing the drug solubility and the disadvantage of decreasing the absorption of the drug by the addition of cyclodextrins needs to be

carefully considered to achieve the bioavailability of the drug.

Other studies involving cyclodextrins are these concerning the interaction of these ligands with anions constituents of antigenic determinants. This work demonstrated the formation of inclusion or axial type of complexes in water while equatorial or lid type of complexes were suggested in *N,N*-dimethylformamide [41].

3. Thermodynamic, structural and conductimetric studies of electrolytes relevant in lithium battery technology

Considerable attention has been focused in recent years on the solution chemistry of lithium electrolytes due to their wide range of biological [42] and industrial applications [43, 44]. Major international efforts are competitive in the development of rechargeable lithium batteries particularly those based on the 'rocking chair' concept [45-49] as an environmentally friendly and safer alternative to metallic lithium and the more conventional lead acid and nickel cadmium systems. For either system considered (metallic lithium or the rocking chair system) a major problem in their development is that related to electrolyte solutions [50]. For metallic lithium battery systems, the use of an inert solvent (non-protic) of medium or low permittivity brings about problems related to low solubilities and low conductivities due to the formation of ion pairs (non-conducting species) and in some cases dimers. Rocking chair systems are concentration cells in which lithium is the only ion transported and where metallic lithium is replaced by lithiated carbon or the intercalate $LiTiS_2$. Although similar problems to

those found in metallic lithium battery are found with these systems, an additional advantage of the latter is that more aggressive aprotic solvents can be used. In an attempt to overcome the problems associated with electrolyte solutions, macrocycles were explored. Indeed the large variety of neutral macrocycles produced in the last thirty five years [1, 2], many of them able to interact with alkali-metal cations including lithium has opened the possibility of exploring the use of these new electrolytes in the development of lithium batteries. However the isolation of the metal-ion complex salts requires information regarding the stability of complex formation in the appropriate medium. Therefore we proceeded with the thermodynamic characterisation of these systems. The crown ethers ligands selected for these studies were those shown in Fig. 1 and the electrolytes considered were those containing cations of relatively large size (lithium coronand) and highly polarisable anions such as hexafluoroarsenate, AsF_6^- , tetrafluoroborate, BF_4^- and trifluoromethanesulfonate, CF_3SO_3^- . Based on this information which showed that the complexation of lithium and crown ethers in solvents relevant to battery technology was strong enough (stability constant of $\sim 10^4$) to be isolated, we proceeded with the structural (^1H and ^{13}C NMR in CD_3CN) and thermochemical characterisation of these new electrolytes [51, 52].

Table 1 lists representative data for the standard enthalpies of solution of lithium and lithium coronand salts in acetonitrile and in propylene carbonate at 298.15 K. Standard enthalpies of solution result from the contribution of the solvation process (exothermic) and that of the crystal lattice (endothermic). As far as lattice enthalpies for ionic solids containing the same anion are concerned, it is expected that as the size of the cation increases (in going from lithium to lithium coronand) the amount of heat supplied to break up the solid decreases. On this basis and provided that in the solid no specific interactions occurs between the ligand and the anion, the heat associated with the crystal lattice process for the uncomplex lithium salt is expected to be considerably larger (more endothermic) than that of the lithium coronand salt. The data in Table I reflect that while the dissolution of the uncomplexed salt takes place with a release of energy (exothermic process), the reverse is true for the lithium coronand salts. We found these findings striking since they provided a strong indication that the complexed salts are much less solvated than the free lithium salt and therefore the implications of these results on the conductivity of these electrolytes (an important aspect to consider in the development of lithium batteries) could be foreseen. Thus Fig. 4 shows the conductimetric titration

Table I. Standard Enthalpies of Solution of Lithium and Lithium Coronand Salts in Acetonitrile and Propylene Carbonate at 298.15 K

Compound	— $\Delta_s H^\circ / \text{kJ mol}^{-1}$ * —	
	Acetonitrile	Propylene Carbonate
LiCF_3SO_3	-15.59	-12.50
[Li 15C5] CF_3SO_3	9.17	13.34
[Li 12C4] CF_3SO_3	15.69	20.74
[Li 1A12C4] CF_3SO_3	14.66	18.74
[Li 1BA12C4] CF_3SO_3	18.96	22.50

Abbreviations; 15C5: 15-crown-5; 12C4: 12-crown-4; 1A12C4: 1-aza-12-crown-4; 1BA12C4: 1-benzyl-1-aza-12-crown-4 * From refs. 51 and 52.

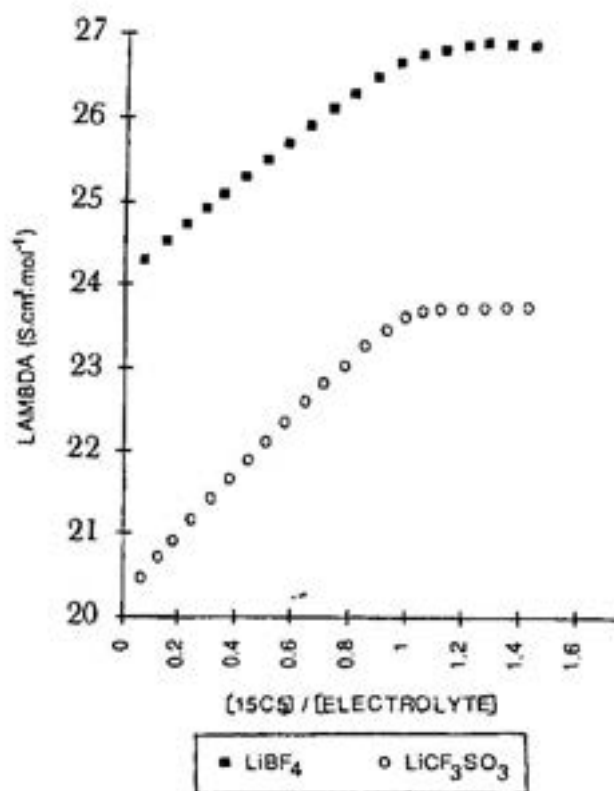


Fig. 4. Conductimetric curves for the titration of lithium (trifluoroborate and trifluoromethanesulphonate as counter-ions) and 15 crown 5 in propylene carbonate at 298.15 K.

curves for the titration of LiCF_3SO_3 and LiBF_4 with 15 crown 5 in propylene carbonate. These results unambiguously demonstrate that as the equilibrium position is shifted by the addition of the macrocycle as to favour the formation of the less solvated electrolyte (lithium coronand) a considerable increase in conductance is observed as predicted from thermochemical data. Within this context, it is important to emphasise the relevance of fundamental thermodynamics in the selection of macrocyclic based electrolytes for use in battery technology.

4. Calixarene Chemistry.

Calixarenes (products of the base-induced condensation of *p*-substituted phenols and formaldehyde) and their derivatives have received considerable attention

in recent years to an extent that several books and review articles have been published [53-56]. The current widespread interest in calixarenes is due to several factors. Among these are the remarkably simple way used for the synthesis of the parent compounds and the possibility of obtaining a large variety of derivatives by lower and upper rim functionalisation of the parent compounds. Among these macrocycles, calix(4)arenes are of particular interest. Indeed, these ligands in their 'cone' conformation are characterised by the presence of two cavities: one hydrophobic situated between the benzene rings and able to interact with neutral species (Fig. 5) while the other is hydrophilic and able to interact with ionic species. It is indeed the presence of hydrophilic and hydrophobic regions which makes these macrocycles suitable hosts for neutral and ionic species. The thermodynamics of calixarene chemistry has been reviewed [11] by us in 1998.

Calixarenes have found a wide range of applications. A good account on the industrial uses of these macrocycles prior to 1992 has been given by Perrin and Harris [57].

Our contribution in this area involves

i) The interaction of parent calixarenes with amines [58-60].

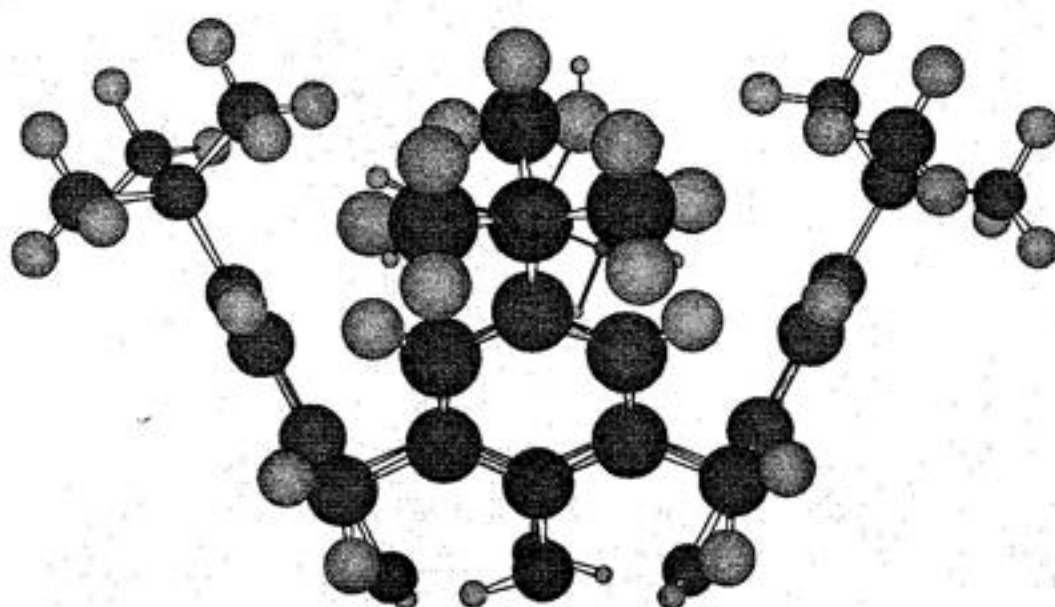
ii) Detailed thermodynamic information on calixarene ester derivatives and alkali-metal cations [16-18, 61].

iii) Synthesis, characterisation (^1H NMR and X ray diffraction studies) and complexing properties of lower rim calixarene derivatives containing aliphatic and alicyclic amines as pendent arms [62, 63] (Fig. 6), mixed functional groups (Fig. 7) [64-66] and more recently partially functionalised calix(4)arenes (Fig. 8) [67].

iv) Solution thermodynamics of pyridinocalix(4)arenes (Fig. 9) and monovalent cations [68,69] The crystal structure of the monoacetonitrile sodium complex of **9a** is shown in Fig. 10.

v) Complexation thermodynamics of calixarene derivatives and lanthanide cations [70]

Hydrophobic Region



Hydrophilic Region

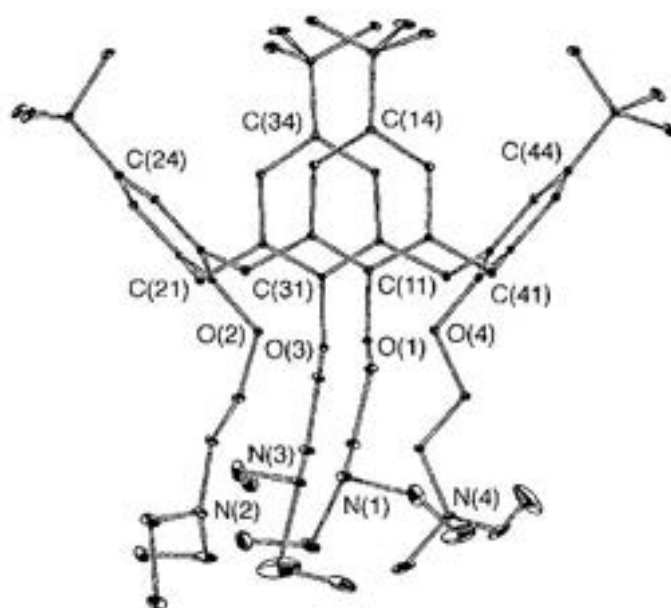
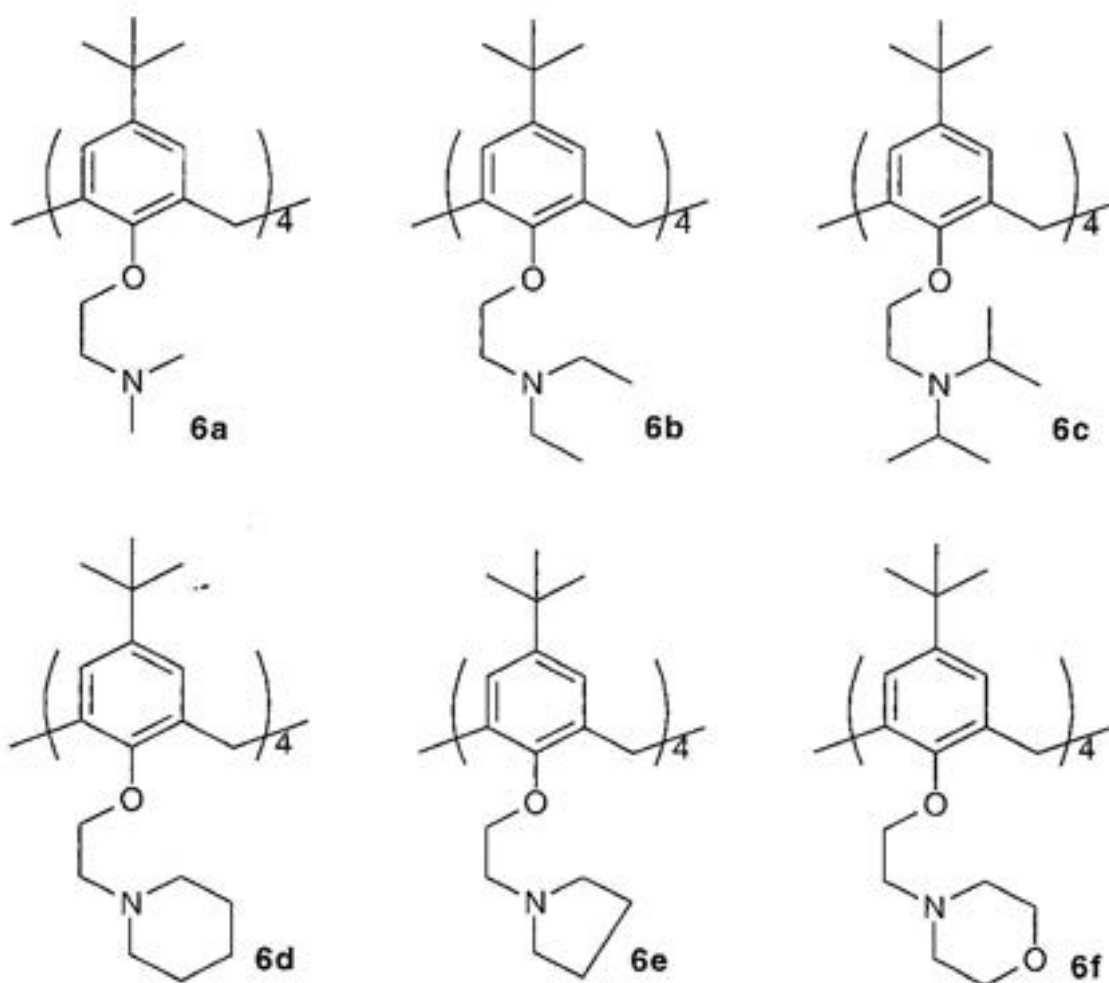
Fig. 5. Calixarenes.

vi) Quantitative assessments of the individual processes involved in the extraction of alkali-metal and silver cations from aqueous solution to the non-aqueous phase in the presence and absence of calix(4)arene derivatives [18, 19].

As far as the thermodynamics of these systems are concerned, there are misleading statements in the literature either because the medium selected for these measurements was not suitable or unawareness of the limitations of the methodology used in the derivation of thermodynamic data and these have been extensively discussed by our group [11].

Eq. 3 has been extensively used to determine the factors which contribute to the selective behaviour of calixarene deriva-

tives for metal cations. It has been demonstrated that in analysing the medium effect on the interaction of these macrocycles with metal cations, the differences in solvation of the reactants and the product must be carefully considered. This is exemplified by inserting the appropriate thermodynamic quantities in eq. 2. In doing so, two solvent systems (MeCN - MeOH and MeCN - DMF) are considered as shown below. For the interpretation of the data, the relationship shown in eq. 3 is considered. This equation implies that the optimum conditions for higher stability in s_2 ($\Delta_c G^\circ$ more negative) relative to s_1 requires a solvent (s_2) which is a better solvator for the metal-ion complex (negative $\Delta_c G^\circ$ from s_1 to s_2) and a poorer solvator for the ligand and the free



Crystal Structure of 6b (Ref.63)

Fig. 6. Calix(4)arene Derivatives Containing Aliphatic and Alicyclic Amines as Functional Groups.

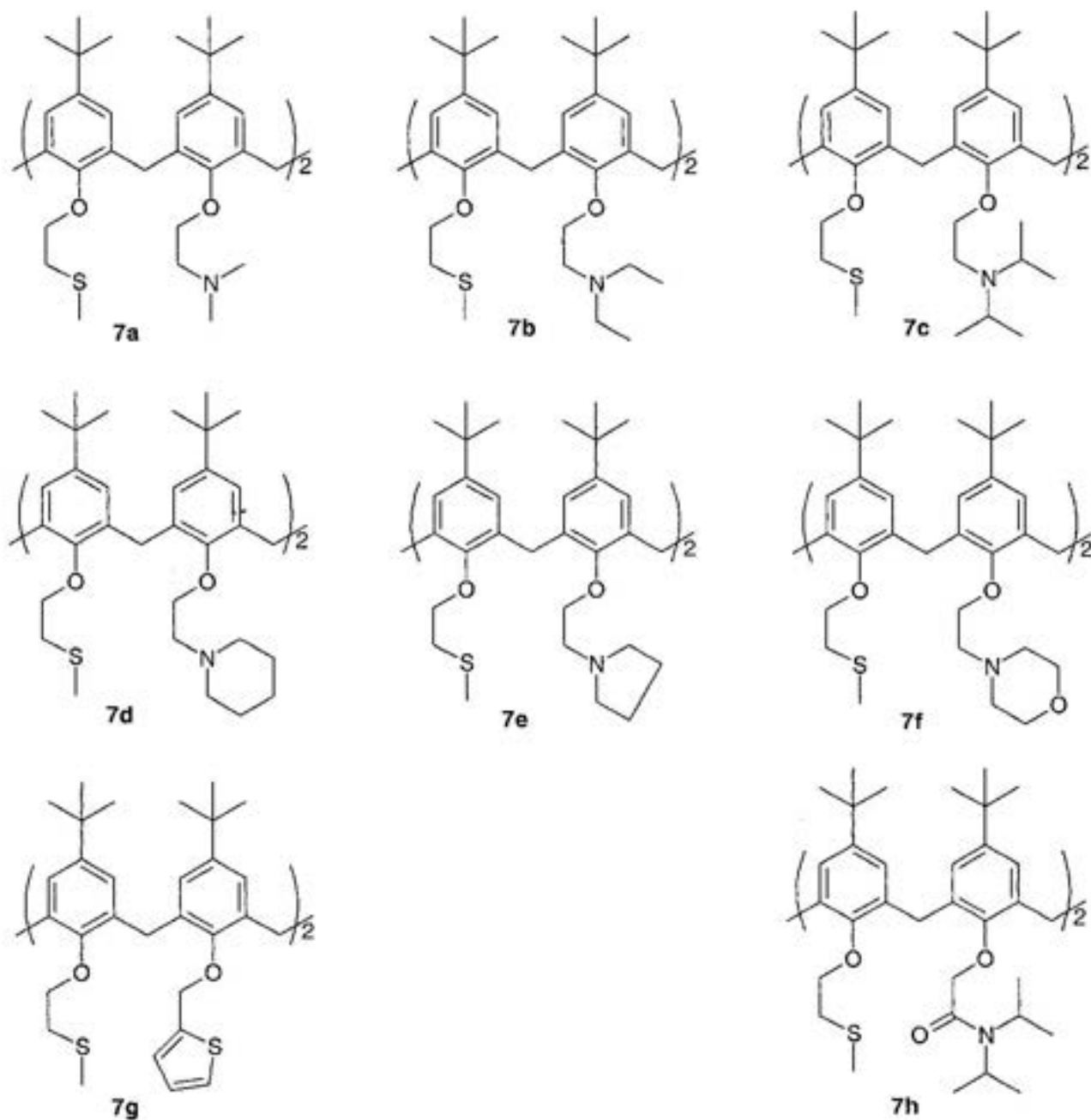
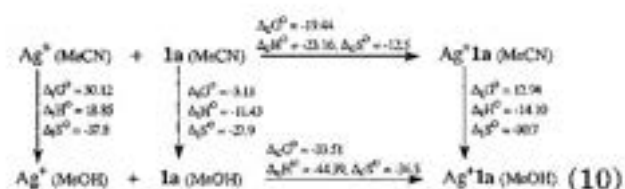


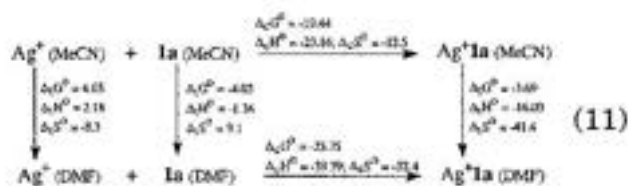
Fig. 7 Calix(4)arene Derivatives with Mixed Functional Groups.

metal cation [positive ΔG° ($s_1 \rightarrow s_2$)] than the reference solvent (s_1)

MeCN - MeOH^a



MeCN - DMF^a



In eqs 10 and 11, ΔG° and ΔH° values are given in kJ mol^{-1} while the units of ΔS° values are $\text{JK}^{-1} \text{mol}^{-1}$

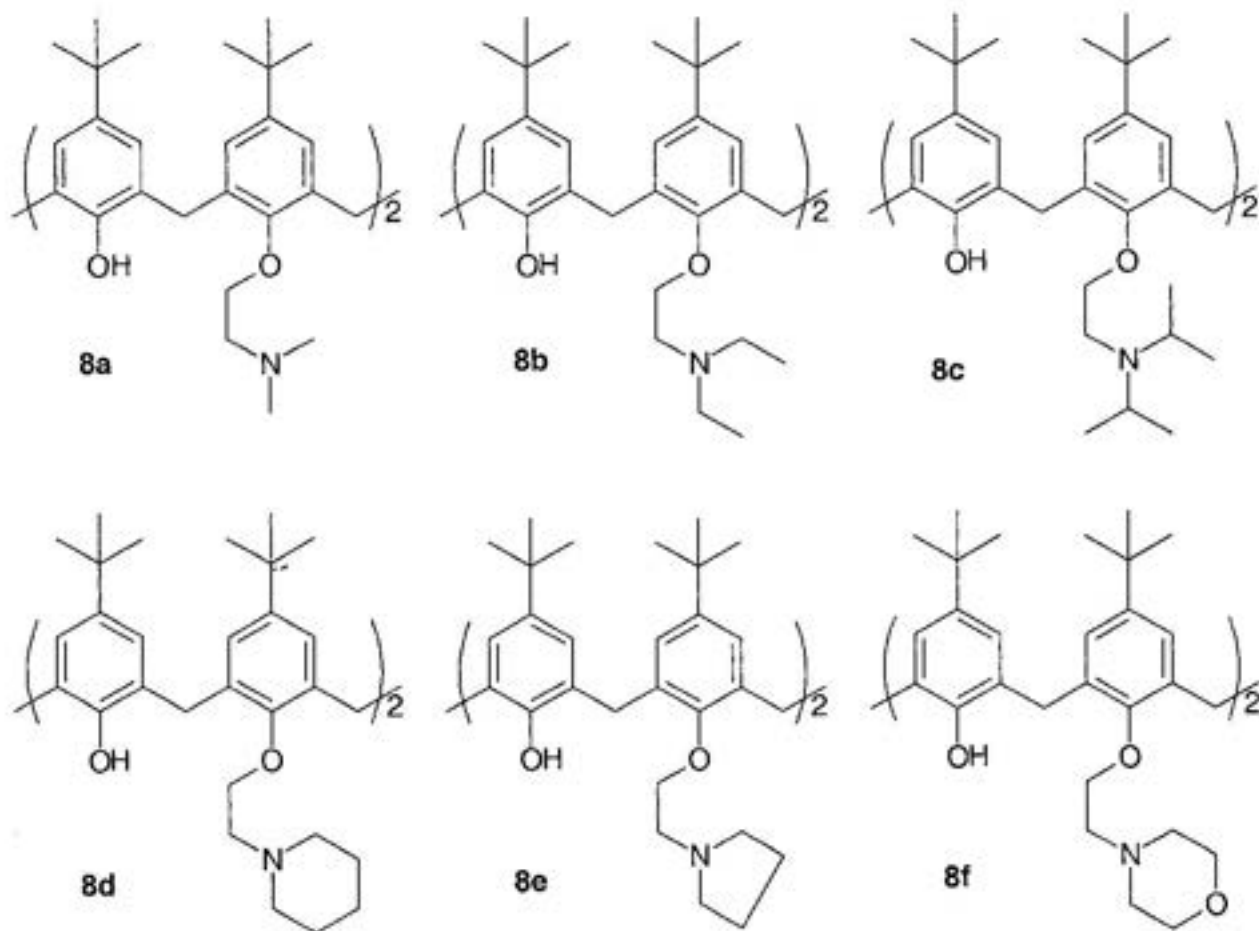


Fig. 8. Partially Functionalised Calix(4)arene Derivatives.

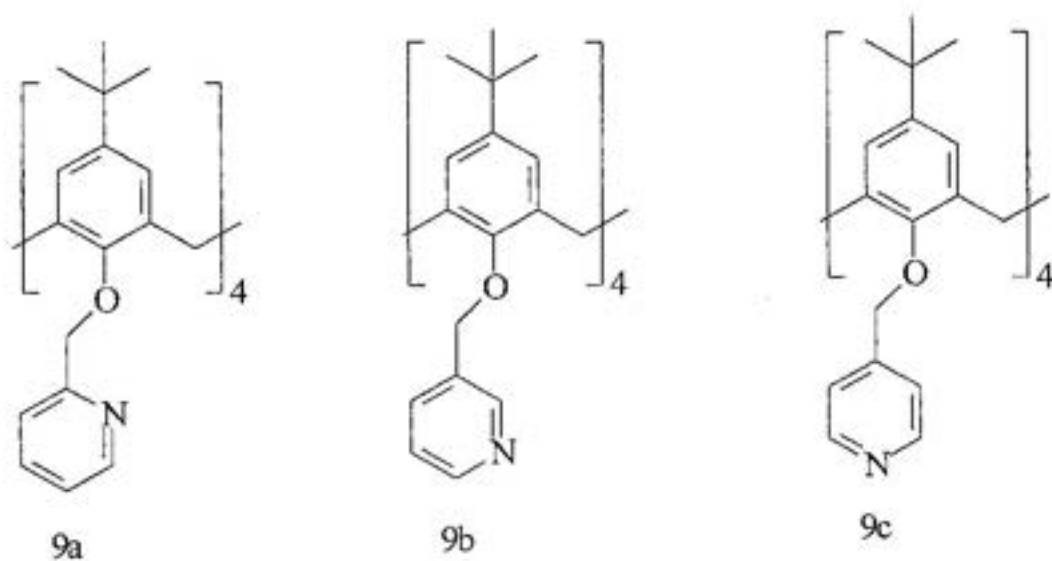


Fig. 9. Pyridinocalix(4)arene Derivatives.

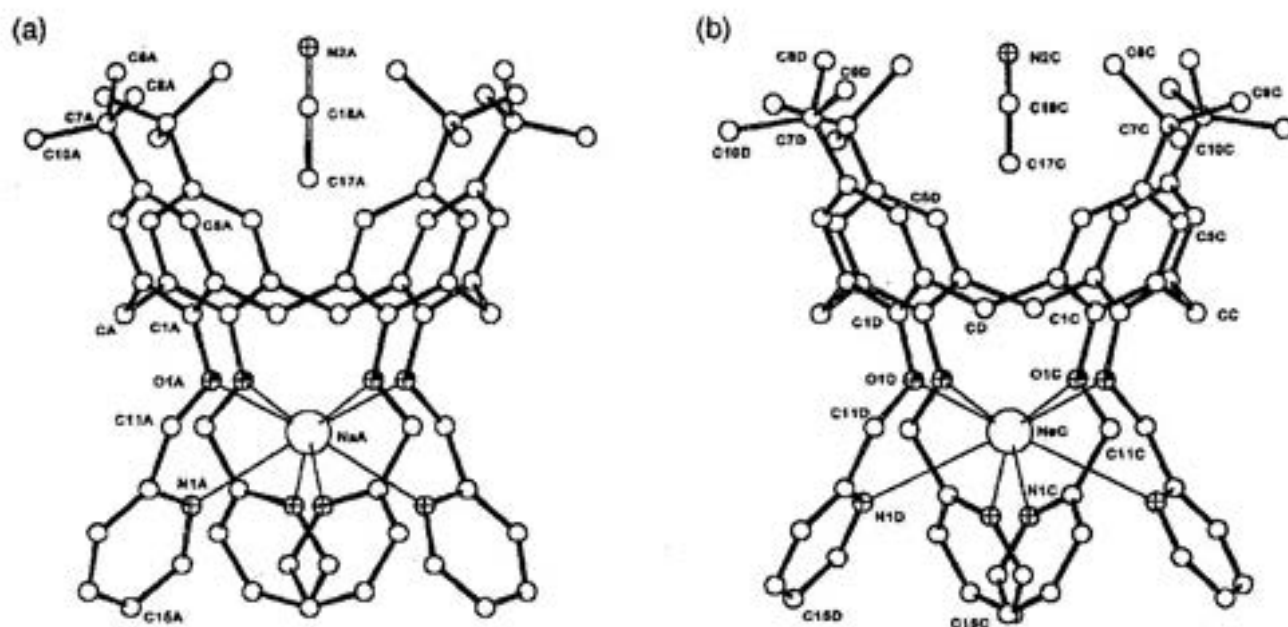


Fig. 10. (a) Side views of one of two independent sodium and acetonitrile complex of 9a sited on a fourfold crystallographic axis and (b) Side view of the complex sited on a twofold axis [Ref. 68].

As far as the MeCN – MeOH solvent system is concerned, in terms of Gibbs energies, the higher stability in MeOH relative to MeCN is controlled by the lower solvation of the free cation in the former solvent relative to the latter. Taking into account eq. 3 it follows that the higher solvation of the ligand and the lower solvation of the metal-ion complex in MeOH with respect to acetonitrile contribute unfavourably to the stability of the complex in this solvent relative to acetonitrile.

In terms of enthalpies, the transfer value for the metal-ion complex from MeCN to MeOH is similar to that of the ligand. These findings do not necessarily imply that the thermochemical origin of solvent-metal ion complex interactions is necessarily similar to that of the ligand in these media. However, the data unambiguously demonstrates that the higher solvation of the metal-ion complex in MeCN relative to MeOH, which contrasts with that of the ligand (the opposite is observed) is entirely due to the greater loss of entropy of the former relative to the latter in moving from MeCN to methanol.

Quite a different picture emerges when the MeCN-DMF solvent system is considered. Unlike for the system involving MeOH, the ΔG° value for the free cation from MeCN to DMF is relatively small indicating that these solvents do not offer a differentiating medium for this cation. Since the ligand contribution does not favour complexation in DMF, the slightly higher stability of complex formation in this solvent is due to both; the higher solvation of the metal-ion complex in DMF relative to MeCN and the lower solvation of the silver cation in DMF with respect to MeCN.

The above examples demonstrate that the medium alters the stability of the complex in a selective manner which is not only dependent on the solvation of the free cation (as it is often assumed) but it is the result of the changes in solvation that the reactants and the product undergo upon complexation in the various solvents.

It goes without saying that a detailed interpretation of the thermodynamics associated with the complexation processes involving macrocycles and guest species requires very accurate data. A suitable

Table II. Enthalpies of coordination in kJ mol⁻¹ derived from solution and complexation data in different solvents at 298.15 K

Solvent	$\Delta_c H^\circ$ AgClO ₄	$\Delta_c H^\circ$ 7b	$\Delta_c H^\circ$ Ag7bClO ₄	$\Delta_c H^\circ$	$\Delta_{\text{coord}} H^\circ$
MeOH	-14.22	12.93	26.10	-44.39	-71.78
EtOH	-19.18	11.68	28.56	-36.34	-72.40
MeCN	-47.50	24.36	25.77	-23.16	-72.07
DMF	-51.19	23.02	3.89	-39.39	-71.45

Data from refs. 63 and 66.

mean of checking the reliability of thermodynamic data is provided by the calculation of the thermodynamics of coordination (see eq. 4) [17, 52] which as stated above, these data should be the same independently of the solvent from which these are derived. Table II shows enthalpies of coordination for the system involving AgClO₄ and 7b derived from four different solvents through eq. 4. Excellent agreement is found between these set of data which clearly reflect the accuracy of the data.

Final remarks

Although the above discussion has been mainly centered on thermodynamic aspects of macrocyclic chemistry, our research covers a wide range of activities, the main goal is the introduction of these ligands into polymeric frameworks for the production of recyclable materials for the removal of ionic and neutral species of environmental concern from natural sources. I should also emphasise that collaborative research with other institutions in the UK and abroad has been very rewarding. Within this context, I gratefully acknowledge the financial support provided by the European Union, the EPSRC (UK), the US Army (USA), Zeneca (UK) and The British Council (UK). This support has allowed the development of extensive links with other institutions in the UK, Europe and Latin America. As far as the latter is concerned, the outcome of these links is well documented [71-74].

Particular thanks are due to my own institution, the University of Surrey, UK, my

coworkers whose names appear in the list of references and my postgraduate students (past and present) for their enthusiastic and positive attitude to research.

References

- [1] J. M. Lehn, Nobel Lecture, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 1989, **27**, 89.
- [2] J. M. Lehn in "Supramolecular Chemistry", VHC; Weinheim, Germany, 1995.
- [3] J. W. Steed; J. W. Atwood in "Supramolecular Chemistry"; J. Wiley & Sons; Chichester, UK, 2000
- [4] A. Werner, *Zeitsch T. Anorg. Chem.*, 1893, **3**, 267.
- [5] E. Fischer, *Ber Deutsch Chem Ges*, 1894, 2985.
- [6] P. Ehrlich, *Studies on Immunity*, Wiley, NY, 1906.
- [7] C. Moore and B. C. Pressman, *Biochem. Biophys. Res. Commun.*; 1964, **15**, 562.
- [8] C. J. Pedersen, *J. Am. Chem. Soc.*; 1967, **89**, 2495, 7017.
- [9] C. J. Pedersen, Nobel Lecture, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*; 1988, **27**, 1923.
- [10] D. J. Cram, Nobel Lecture, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*; 1988, **27**, 1009.
- [11] A. F. Danil de Namor, R. M. Cleverley, M. L. Zapata-Ormachea; *Chem. Rev.*; 1998, **98**, 2495.
- [12] *Physical Chemistry of Organic Solvent Systems*; Eds. A. K. Covington and T. Dickinson, Plenum Press, NY, 1973.
- [13] *Nonaqueous Solution Chemistry*; D. Popovich and R. P. T. Tomkins, J. Wiley & Sons, NY, 1981.
- [14] A. F. Danil de Namor; *Pure & Appl. Chemistry*; 1993, **65**, 193.
- [15] M. H. Abraham, A. F. Danil de Namor, W. H. Lee, *J. Chem. Soc.; Chem. Comm.*; 1977, 893.

- [16] A. F. Danil de Namor, E. Gil, M. A. Llosa Tanco, D. A. Pacheco Tanaka, L. E. Pulcha Salazar, R. A. Schulz, J. Wang; *J. Phys. Chem.*; 1995, **99**, 16770 and 1995, **99**, 16781
- [17] A. F. Danil de Namor, E. Gil, M. A. Llosa Tanco, D. Kowalska, J. Villanueva-Salas, R. A. Schulz; *J. Chem. Soc. Faraday Trans.*, 1998, **94**, 3111.
- [18] A. F. Danil de Namor, F. J. Sueros Velarde, A. R. Casal, A. Pugliese, M. T. Goitia, M. Montero, F. Fraga López; *J. Chem. Soc.; Faraday Trans.*, 1997, **93**, 3995.
- [19] A. F. Danil de Namor, M. T. Goitia, A. R. Casal, F. J. Sueros Velarde, M. I. Barja Gonzalez, J. A. Villanueva-Salas, M. L. Zapata Ormachea, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 1999, **1**, 3633.
- [20] R. M. Izatt, K. Pawlak, J. S. Bradshaw, R. L. Bruening; *Chem Rev.*; 1995, **95**, 2529 and references therein.
- [21] B. G. Cox; H. Schneider in "Coordination and Transport Properties of Macrocyclic Compounds in Solution", Elsevier, Amsterdam, 1992.
- [22] B. G. Cox, D Knap, H. Schneider, *J. Phys. Chem.*, 1980, **84**, 320.
- [23] B. G. Cox, J. Garcia Rosas, H. Schneider, *J. Am. Chem. Soc.*; 1981, **103**, 1384.
- [24] B. G. Cox, Ng van Truong; H. Schneider, *J. Am. Chem. Soc.*; 1984, **106**, 1273.
- [25] J. Gutknecht, H. Schneider, J. Stroka, *Inorg. Chem.*, 1978, **17**, 3326.
- [26] A. F. Danil de Namor, L. Ghouseini; *J. Chem. Soc.; Faraday Trans I*; 1984, **80**, 2349.
- [27] M. H. Abraham, A. F. Danil de Namor; R. A. Schulz; *J. Chem. Soc., Faraday Trans. I.*, 1984, **80**, 1323.
- [28] A. F. Danil de Namor, L. Ghouseini, *J. Chem. Soc.; Faraday Trans. I.*, 1985, **81**, 781.
- [29] A. F. Danil de Namor, L. Ghouseini, W. H. Lee, *J. Chem. Soc.; Faraday Trans. I.*, 1985, **81**, 2495.
- [30] A. F. Danil de Namor, L. Ghouseini, T. Hill, *J. Chem. Soc.; Faraday Trans. I*, 1986, **82**, 349.
- [31] A. F. Danil de Namor, F. Fernandez Salazar, P. Greenwood, *J. Chem. Soc.; Faraday Trans. I.*, 1987, **83**, 2663.
- [32] A. F. Danil de Namor, H Berroa de Ponce, *J. Chem. Soc.; Faraday Trans. I.*, 1988, **84**, 1671
- [33] A. F. Danil de Namor, *J. Chem. Soc.; Faraday Trans.*; 1988, **84**, 2441.
- [34] A. F. Danil de Namor, F. Fernandez Salazar, *J. Chem. Soc.; Faraday Trans. I*, 1988, **84**, 3539.
- [35] B. G. Cox, G. R. Hedwig, A. J. Parker, D. W. Watts; *Aust. J. Chemistry*, 1974, **27**, 477.
- [36] S. Villermaux, J-J. Delpuech; *J. Chem. Soc. Chem. Comm.* 1975, 478
- [37] E. Mei, A. I. Popov, J. L. Dye, *J. Am. Chem. Soc.*; 1977, **99**, 6532.
- [38] A. F. Danil de Namor, D. Kowalska, *J. Phys. Chem.*, 1977, **101**, 1643.
- [39] A. F. Danil de Namor, D. A. Pacheco Tanaka, L. Nuñez Regueira, I. Gomez Orellana, *J. Chem. Soc.; Faraday Trans.*; 1992, **88**, 1665.
- [40] J. Szejtli in "Molecular Entrapment and Release Properties of Drugs by Cyclodextrins. Controlled Drug Bioavailability."; Ed. V. F. Smolen, L. A. Ball, J. Wiley, 1985, 365.
- [41] A. F. Danil de Namor, R. Traboulsi, D. F. V. Lewis; *J. Am. Chem. Soc.*; 1990, **112**, 8442.
- [42] Symposium Proceedings "Power Sources for Biomedical Implantable Applications and Ambient Temperature Lithium Batteries", Eds. B. Owens, N. Margalit, *Electrochemical Society*, Princeton, NJ, 1980.
- [43] Symposium Proceedings "Electrode Materials and Processes for Energy Conversion and Storage"; Eds. J. D. E. McIntire, S. Srinivasan, F. G. Will, *Electrochemical Soc.*; Princeton; NJ, 1977.
- [44] J. C. Krieger, *Chem. Eng. News*, 1992, **70**, 17.
- [45] B. Scrosati, *Electrochim. Acta*, 1981, **26**, 1559.
- [46] S. Tobishima, M. Arakawa, J. Yamaki, *J. Electrochim. Acta*, 1990, **35**, 383.
- [47] M. Armand in "Materials for Advanced Batteries", Eds. D. W. Murphy, J. Brookhead, B. C. H. Steele, Plenum Press, New York, 1980.
- [48] B. Scrosati, *J. Electrochem. Soc.*; 1992, **139**, 2776.
- [49] T. Nagoura, K. Tazawa, *Prog. Batteries Sol. Cells*, 1990, **9**, 20.
- [50] J. T. Dudley; D. P. Wilkinson, G. Thomas, R. Le Vae, S. Woo, H. Blom, H. Horwath, M. W. Juzkow, B. Denis, P. Juric, P. Aghakian, J. R. Dahn, *J Power Sources*, 1991, **35**, 59.
- [51] A. F. Danil de Namor, M. A. Llosa Tanco, M. Salomon, J. C. Y. Ng, *J. Phys. Chem.*; 1994, **99**, 11796.
- [52] A. F. Danil de Namor, J. C. Y. Ng, M. A. Llosa Tanco, M. Salomon, *J. Phys. Chem.*, 1996, **100**, 14485.
- [53] C. D. Gutsche in "Monographs in Supramolecular Chemistry, Ed. J. F. Stoddart, The Royal Society of Chemistry, London, 1989.
- [54] *Calixarenes. A Versatile Class of Macrocyclic Compounds*; Eds. J. Vicens, V. Böhmer, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht,

- The Netherlands, 1991.
- [55] *Calixarenes: 50th Anniversary: Commemorative Volume*; Eds. J. Vicens, Z. Asfari, J. M. Harrowfield, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1994.
- [56] C. D. Gutsche, *Aldrichim. Acta*, 1995, **28**, 3.
- [57] R. Perrin, R. Lamartine, M. Perrin, *Pure Appl. Chem.*, 1993, **65**, 1549.
- [58] A. F. Danil de Namor, M. T. Garrido Pardo, L. Muñoz, D. A. Pacheco Tanaka, F. J. Sueros Velarde, M. C. Cabaleiro, *J. Chem. Soc., Chem. Comm.*, 1992, 855.
- [59] A. F. Danil de Namor, J. Wang, I. Gomez Orellana, F. J. Sueros Velarde, D. A. Pacheco Tanaka, *J. Inclusion Phen. Mol. Recognit. Chem.*, 1994, **19**, 971.
- [60] A. F. Danil de Namor, M. T. Garrido Pardo, D. A. Pacheco Tanaka, F. J. Sueros Velarde, J. D. Cardenas García, *J. Chem. Soc., Faraday Trans. (Special issue)*, 1993, **89**, 2727.
- [61] A. F. Danil de Namor, M. L. Zapata Ormachea, O. Jafou, N. Al Rawi, *J. Phys. Chem.*, 1997, **101**, 6772.
- [62] A. F. Danil de Namor, F. J. Sueros Velarde, M. C. Cabaleiro, *J. Chem. Soc., Faraday Trans.*; 1996, **92**, 1731.
- [63] A. F. Danil de Namor, F. J. Sueros Velarde, R. G. Hutcherson, O. E. Piro, E. E. Castellano, *J. Chem. Soc., Faraday Trans.*, 1998, **94**, 1237.
- [64] A. F. Danil de Namor, R. G. Hutcherson, F. J. Sueros Velarde, A. Alvarez-Larena, J. L. Brioso, *J. Chem. Soc.; Perkin Trans I.*, 1998, 2933.
- [65] A. F. Danil de Namor, M. L. Zapata-Ormachea, R. G. Hutcherson, *J. Phys. Chem.*, 1998, **102**, 7839.
- [66] A. F. Danil de Namor, M. L. Zapata-Ormachea, *J. Phys. Chem.*, 1999, **103**, 366.
- [67] A. F. Danil de Namor, J. Villanueva-Salas, 1999, unpublished results.
- [68] A. F. Danil de Namor, O. E. Piro, L. E. Pulcha Salazar, A. F. Aguitar Cornejo, N. Al-Rawi, E. E. Castellano, F. J. Sueros Velarde, *J. Chem. Soc., Faraday Trans.*, 1998, **94**, 3097.
- [69] A. F. Danil de Namor, E. E. Castellano, L. E. Pulcha Salazar, O. E. Piro, O. Jafou, *Phys. Chem. Chem. Phys.*; 1999, **1**, 285.
- [70] A. F. Danil de Namor, O. Jafou (work in progress).
- [71] A. F. Danil de Namor, *Chemistry International IUPAC*, 1991, **13**, 219.
- [72] A. F. Danil de Namor, *Chemistry and Developing Countries*, (150th Anniversary of the Royal Society of Chemistry). Conf. Proceedings, 153. Eds. D. J. Coomber, S. S. Langer and J. M. Pratt. Commonwealth Science Council and Royal Society of Chemistry, 1992, ISBN 08 509 2395 6.
- [73] A. F. Danil de Namor, K. B. Nolan, B. G. Cox, A. Medina Cruz, Ed. C. Kessler, *International Scientific Cooperation, Consolidation Report of Activities, 1987-1990*. E. C. Andean Pact Countries. Office for Official Publications of the E. C., Luxembourg, CEC, 1993, **39**, ISBN 92 826 4547 9.
- [74] A. F. Danil de Namor, *International Newsletter on Chemical Education, IUPAC*, 1995, **44**, 16.

Manuscrito recibido y aceptado en abril de 2001.

PRESENTACIÓN DEL DR. FRANCISCO E. BARALLE COMO ACADÉMICO CORRESPONDIENTE EN TRIESTE, ITALIA

Eduardo G. Gros

Presidente de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
hasta su fallecimiento, el 12 de junio de 2001.

La Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales tuvo su origen en un decreto del gobernador de la provincia de Buenos Aires, Mariano Acosta, del 26 de marzo de 1874. Por éste se determinaba, mediante la reglamentación de la Instrucción Secundaria y Superior, la constitución y el funcionamiento de los cuerpos que formarían la Universidad de Buenos Aires. Y la Academia era parte de ésta.

Recién en 1926, por decreto del presidente de la Nación, Marcelo T. de Alvear, adquiere autonomía como institución civil con sus propios estatutos y disposiciones reglamentarias.

Esta Academia sufrió, como todas, las consecuencias de la ley 14007/50 y su reglamentación por decreto 7500/52, una de cuyas ordenanzas condujo a que nuestra Academia quedara reducida a sólo 9 miembros, por lo cual no pudo funcionar.

En 1955, el decreto ley 4362/55 restableció su autonomía, reglamentando que podía contar con no más de 40 miembros titulares, pero con un número ilimitado de miembros correspondientes, quienes pueden tener cualquier nacionalidad pero con residencia en el exterior o en el país, pero en este último caso fuera del radio metropolitano.

Entiendo que para cualquier científico, el ser invitado a formar parte de esta corporación como miembro titular o aun correspondiente, como es este caso, puede llegar a ser motivo de satisfacción personal, pero el sentimiento es recíproco, pues para nosotros representa un gran orgullo que famosos miembros elegidos de la comunidad científica se unan a nuestras filas confiándonos con su aporte, calidad científica y prestigio.

Tal es el propósito que nos reúne en estos momentos.

La incorporación de una personalidad como la del Dr. Francisco Baralle nos llena de placer, y a título personal, me llena de enorme motivo de satisfacción y orgullo.

Francisco Ernesto Baralle es porteño. Nació en Buenos Aires en 1943 y en sus estudios universitarios se orientó por la química, logrando su título de Licenciado en Ciencias Químicas en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires, en 1966.

Lo conocí en 1967 cuando se unió a nuestro grupo con el objetivo de obtener su título doctoral, lo cual logró en 1969, también en esa casa de altos estudios. Durante el período que actuó en nuestra Facultad se desempeñó con dedicación exclusiva como ayudante de primera (1967-1968) y jefe de trabajos prácticos (1968-1970), ambos en el Departamento de Química Orgánica.

Pero la verdadera vocación de Baralle

Presentación realizada el 29 de octubre de 1999.

no estaba dentro de la Química Orgánica (aun tan fuertemente volcada a la bioorgánica, como eran nuestros estudios sobre biosíntesis de productos naturales), sino que apuntaba mucho más hacia la bioquímica.

Sin embargo, a pesar de sus inclinaciones, durante unos años más siguió relacionado con temas de química orgánica, ya que en 1970 y 1971, con una beca del Instituto Italo-Latinoamericano trabajó en el Istituto Superiore di Sanità, en Roma, cuyo director era en aquellos tiempos el Dr. Marini-Bettolo, especialista en productos naturales y miembro de esta Academia.

A su regreso de Roma, entre 1971 y 1974 se desempeñó como jefe de Investigación Químicas en el entonces Instituto Nacional de Farmacología y Bromatología, cuyo director era el Dr. Marcelo Vernengo, contribuyendo a trabajos ya no biosintéticos, sino de aislamiento y caracterización de alcaloides. Además era jefe de trabajos prácticos de química orgánica, pero no en nuestra Facultad, sino en la de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires.

Cuando pudo, el Dr. Baralle abandonó la química orgánica, y en 1974, con una beca del Consejo Británico, se instaló en el Laboratorio de Biología Molecular de la Universidad de Cambridge, donde permaneció hasta 1980; desde 1974 a 1976 con la mencionada beca, y luego como investigador en el referido Laboratorio y como tutor de bioquímica en el Clare College de esa Universidad.

A partir de 1980 se trasladó a Oxford, donde permaneció hasta 1987 como profesor de Patología Química en la Escuela de Patología Sir William Dunn y como fellow del Magdalen College, ambos de la Universidad de Oxford.

Durante parte de este período -1984 a 1987- se desempeñó también como profesor visitante en el Departamento de Ciencias Biomédicas de la Facultad de Medicina y Cirugía de la Universidad de Nápoles, en Italia.

Resulta importante remarcar que en 1984 había obtenido el título de Doctor en Medicina por esa Universidad.

Ya pasada su etapa en el Reino Uni-

do, entre 1987 y 1990 actuó como profesor visitante en el Departamento de Ciencias Biomédicas de la Facultad de Medicina y Cirugía de la Universidad de Brescia, y desde 1988 a 1990, como director científico del Instituto Seroterápico Milanés "S. Belfanti", en Milán.

A partir de 1990 obtuvo el cargo de director del Centro Internacional para Ingeniería Genética y Biotecnología, de Trieste, en Italia, posición que aún mantiene y que comparte, desde 1993, con un cargo de profesor visitante del Departamento de Patología de la Facultad de Medicina y Cirugía de la Universidad de Trieste.

El Dr. Baralle ha realizado una amplia publicación de sus resultados originales aparecidos en revistas internacionales de primerísima línea -para los entendidos, revistas con índice de impacto de dos cifras- y además ha publicado un importante número de trabajos de revisión.

Se ha mantenido permanentemente ligado a colegas argentinos, con periódicas estadas en nuestro medio para el dictado de cursos, fundamentalmente en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires y en centros dependientes de la misma, como el INGEPI y el Instituto de Investigaciones Bioquímicas "Dr. Luis F. Leloir".

Su constante apoyo a nuestros estudiantes graduados y no graduados le ha valido el reconocimiento de nuestra Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, que en 1993 lo designó profesor honorario.

Ese mismo año, la Fundación Konex lo distinguió con el premio Konex de Platino en la rama Genética y Citología.

Nuestra Academia no podía estar ajena a reconocer los méritos de un compatriota que, como Baralle, contribuye a que la parte científica de nuestro país sea un poco más conocida en el exterior, invitándolo a unirse a esta corporación. Pero por otra parte, como ya lo expresé, somos también parte interesada por el honor que nos dispensa contar entre nuestras filas a un científico destacadísimo como Baralle.

DE LA QUÍMICA DE LOS PRODUCTOS NATURALES A LA MEDICINA MOLECULAR: ¿UN TRAYECTO ATÍPICO?

Francisco E. Baralle

International Centre for Genetic Engineering and Biotechnology (ICGEB). Padriciano 99,
(34012) Trieste, Italy. Tel. +39-040-3757337, Fax: +39-040-3757361, E-mail: baralle@icgeb.trieste.it.

Resumen

En este trabajo, luego de una breve tentativa de justificar cambios abruptos de temas de investigación, se describen los recientes progresos en el estudio de las alteraciones del procesamiento del pre-mRNA del Cystic Fibrosis Transmembrane Regulator (CFTR) y los fenotipos patológicos producidos por dichas alteraciones.

En las formas monosintomáticas de fibrosis quística (CF) variaciones de secuencias polimórficas $(TG)_m/T_n$ adyacentes al exón 9 en el "3' splice site" producen una mayor exclusión de este exón resultando en altas proporciones de proteína CFTR no funcional. La acción combinada de factores de *splicing* y una nueva proteína, TDP43, induce exclusión del exón 9. Nuestros estudios han identificado la secuencia $(UG)_m$ como el objetivo de TDP43 en el CFTR pre-mRNA y los elementos denominados Exon Splicing Enhancer (ESE), Exon Splicing Silencer (ESS) e Intron Splicing Silencer (ISS) como los responsables de la exclusión del exón 9 inducida por los factores de *splicing*. La variabilidad de individuo a individuo y en distintos tejidos, de las concentraciones de TDP43 y de los factores de *splicing* determina la penetración parcial del locus $(TG)_m/T_n$ en la fibrosis quística. La importancia clínica y biológica de esta observación es demostrada claramente por el fenotipo severo visto en pacientes con variaciones extremas de este genotipo y por la posibilidad de revertir el efecto deletéreo inhibiendo la síntesis celular de TDP43 mediante oligonucleótidos antisentido.

Palabras clave: Fibrosis quística; RNA splicing; complejos RNA-proteína.

Abstract

This work, after a short attempt to justify abrupt changes in research interests, describes recent progress in the study of alterations of the Cystic Fibrosis Transmembrane Regulator (CFTR) pre-mRNA processing and the pathological alterations derived from this phenomena.

In monosymptomatic forms of cystic fibrosis, variations in the $(TG)_m/T_n$ polymorphic repeats at the 3' end of intron 8 of the cystic fibrosis transmembrane regulator (CFTR) gene are associated with the exclusion by the splicing machinery of exon 9. This results in

high proportions of a non-functional CFTR protein. The combined action of splicing factors and a new protein, TDP43, induces exclusion of exon 9. Our studies have shown that the sequence (UG)_m is the target for TDP43 binding in the CFTR pre-mRNA. Furthermore, additional cis-acting elements were identified such as an Exon Splicing Enhancer (ESE), an Exon Splicing Silencer (ESS) and an Intronic Splicing Silencer (ISS). These sequences are responsible of the negative effect of the splicing factors on exon 9 inclusion. Tissue levels and individual variability of splicing factors would determine the penetrance of the (TG)_mT_n locus in monosymptomatic forms of cystic fibrosis. The clinical and biological relevance of this finding *in vivo* is clearly demonstrated by the severe phenotype of CF patients carrying extreme variations of the genotype and by the possibility of preventing the deleterious exon 9 skipping by inhibiting the synthesis of TDP43 using antisense oligonucleotides.

Key words: Cystic fibrosis; RNA splicing; RNA-protein interactions.

Introducción

En la primera parte de mi presentación deseo describir brevemente una carrera académica no exactamente típica: el trayecto de un químico en productos naturales hacia la biología molecular y las bases moleculares de las patologías humanas. Este camino metodológico se inició poco antes del nacimiento de la ingeniería genética -unos 25 años atrás- y se desarrolló en la aplicación de esta tecnología de investigación al estudio de los procesos patológicos humanos. Particular atención dedicaremos a algunas enfermedades hereditarias, como la fibrosis quística, que nos proveerá un ejemplo de modelo científico que, partiendo de observaciones clínicas particulares, nos lleva al análisis de los mecanismos moleculares de la expresión génica a la definición de las alteraciones presentes en los pacientes, y una vez comprendidas éstas, a la intervención terapéutica específica con fármacos sintéticos.

Completé mi licenciatura en química con un fuerte interés en los problemas biológicos y en la medicina. Sin embargo, mis primeros pasos en la investigación fueron en un campo relativamente alejado de estos temas, en cuanto decidí aprovechar la oportunidad de hacer un doctorado en biosíntesis de productos naturales (alcaloides en plantas y esteroides en anfibios) que me ofreció el Dr. Eduardo Gros, recién llegado de su actividad posdoctoral en Estados Unidos y uno de los más jóvenes y activos investigadores del De-

partamento de Química Orgánica de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires. Su grupo, al final de los años 60 (Figura 1), fue el ambiente ideal para reafirmar en forma definitiva mi vocación para la investigación. El aprendizaje del método científico y la satisfacción estética y científica de mi trabajo de tesis sobre la biosíntesis de cuscohigrina e hyosciamina en *Atropa belladonna* fue el motor y la base sobre la cual desarrollé mi carrera académica hasta el presente.

Los pasos sucesivos fueron a través de la bioquímica a la biología molecular y a la asistencia a la Facultad de Medicina de la Universidad de Buenos Aires, culminando mi prolongada vida estudiantil con la convalidación de mi título de médico en la Universidad de Nápoles. En los párrafos siguientes describiré brevemente estas etapas.

Química de los productos naturales: Biosíntesis de cuscohigrina

La Figura 2, tomada de mi tesis doctoral, muestra esquemáticamente el camino desde la unidad básica de AcetylCoA al alcaloide cuscohigrina. Nuestro trabajo [Baralle F.E. y E.G. Gros, 1969 a y b] demostró que el C1 y C2 de acetyl CoA daban origen a los átomos de carbono de la cadena central del alcaloide. En una segunda etapa se demostró que el anillo heterocíclico se origina a través de la ciclación del amino ácido ornitina y pudimos demostrar conclusivamente que el

átomo de N contenido en el heterociclo derivado del N δ de la ornitina y no del N α [Baralle F.E. y E.G. Gros, 1969 c].

Bioquímica y el paso a la biología molecular

Por un período, mi obsesión con la biología y la bioquímica tuvo un fugaz desahogo en el Instituto de Investigaciones Bioquímicas de la Fundación Campomar, donde me ocupé del mecanismo de traducción de proteínas en el laboratorio del Dr. Israel D. Algranati, iniciándome en las técnicas de biología molecular bajo la valiosa guía de Nélica González. Le siguieron breves aventuras en la farmacología y luego en la bioquímica. En el laboratorio del Dr. Luis F. Leloir usé un poco de mi experiencia en química orgánica para preparar extractos de lípidos hepáticos, material de partida para la purificación del dolichol, de gran fama posterior. Esta limitada experiencia fue de gran utilidad para eventualmente, con la ayuda de César Milstein, llegar al MRC Laboratory of Molecular Biology, de Cambridge, donde inicié mi carrera en biología molecular a través de la química orgánica, sintetizando oligonucleótidos que luego usé para determinar la primera secuencia completa de un RNA mensajero celular eucariote: el mRNA de la β globina (Figura 3) [Baralle F.E., 1977 a]. Este trabajo fue seguido de la determinación de la estructura primaria de los mRNA de β globina en distintas especies y su papel en la regulación de la traducción del mRNA [Baralle F.E., 1977 b y c; Baralle F.E. y G.G. Brownlee, 1978] y por la determinación de la secuencia completa de todos los componentes del gen de la β globina humana [Proudfoot N.J. y F.E. Baralle, 1979; Baralle F.E., 1980, Lawn R.M., 1980; Slightom J.L., 1980; Spritz R.A., 1980; Efstratiadis, A., 1980].

En 1980 obtuve los puestos de Profesor de Patología en la Sir William Dunn School of Pathology y de Medical Tutor en el Magdalen College, ambos institutos de la Universidad de Oxford. En esos años había completado la convalidación de mis estudios médicos y estaba fuertemente motivado a trabajar en las aplicaciones de la biología molecular a la patología humana. En 1981 iniciamos

nuestros estudios sobre las bases genéticas de las enfermedades cardiovasculares, en particular las dislipidemias, y fuimos los primeros en describir polimorfismos genéticos asociados a hiperlipidemia, en particular en los genes codificantes por las apolipoproteínas AI, CIII e AIV (Figura 4) [Rees A., 1983].

El funcionamiento correcto de los genes Apo AI y Apo AIV permite mantener niveles plasmáticos satisfactorios de la lipoproteína de alta densidad (HDL), una partícula lipoproteica involucrada en el transporte inverso del colesterol y por tanto asociado a una protección contra las enfermedades cardiovasculares. Se observó que una variación de la secuencia nucleotídica creaba un nuevo sitio de corte de la enzima de restricción SstI o Sac (S*) produciendo variantes polimórficas (indicados como 3.2 y 4.2 en la Figura 4) de la dimensión del fragmento SstI derivado de la región 3' del gen de Apo AI. Esta diferencia se visualiza usando la técnica de Southern blot (Figura 4B), con la que se estudió la distribución de este polimorfismo en poblaciones de individuos normales y en pacientes hiperlipémicos y se demostró una asociación del polimorfismo Sst 3.2 con hipertrigliceridemia [Rees A., 1983].

En esa época se unió a nuestro grupo, en Oxford, un brillante posdoc, el Dr. Alberto Kornblihtt, quien desarrolló un proyecto explorando los aspectos moleculares de la síntesis de la matriz extracelular y que además fue uno de los primeros estudios que demostró el procesamiento diferencial del pre-mRNA (alternative splicing) [Kornblihtt A.R., 1983; Kornblihtt A.R., 1984 a y b; Kornblihtt A.R., 1985 y Vibe-Pedersen K., 1984].

En la Figura 5 puede verse que de una compleja fase de procesamiento del pre-mRNA resulta una molécula de fibronectina, que si bien es codificada por un solo gen, puede tener 20 secuencias distintas. Las funciones de adhesión celular, complejamiento con el colágeno, interacción con la fibrina, etc., pueden ser modificadas o moduladas según el procesamiento diferencial del pre-mRNA. El caso más claro es la ausencia en una de las isoformas generadas por un *splicing* alternativo de un sitio de unión a las células (LVD) en la región III CS.

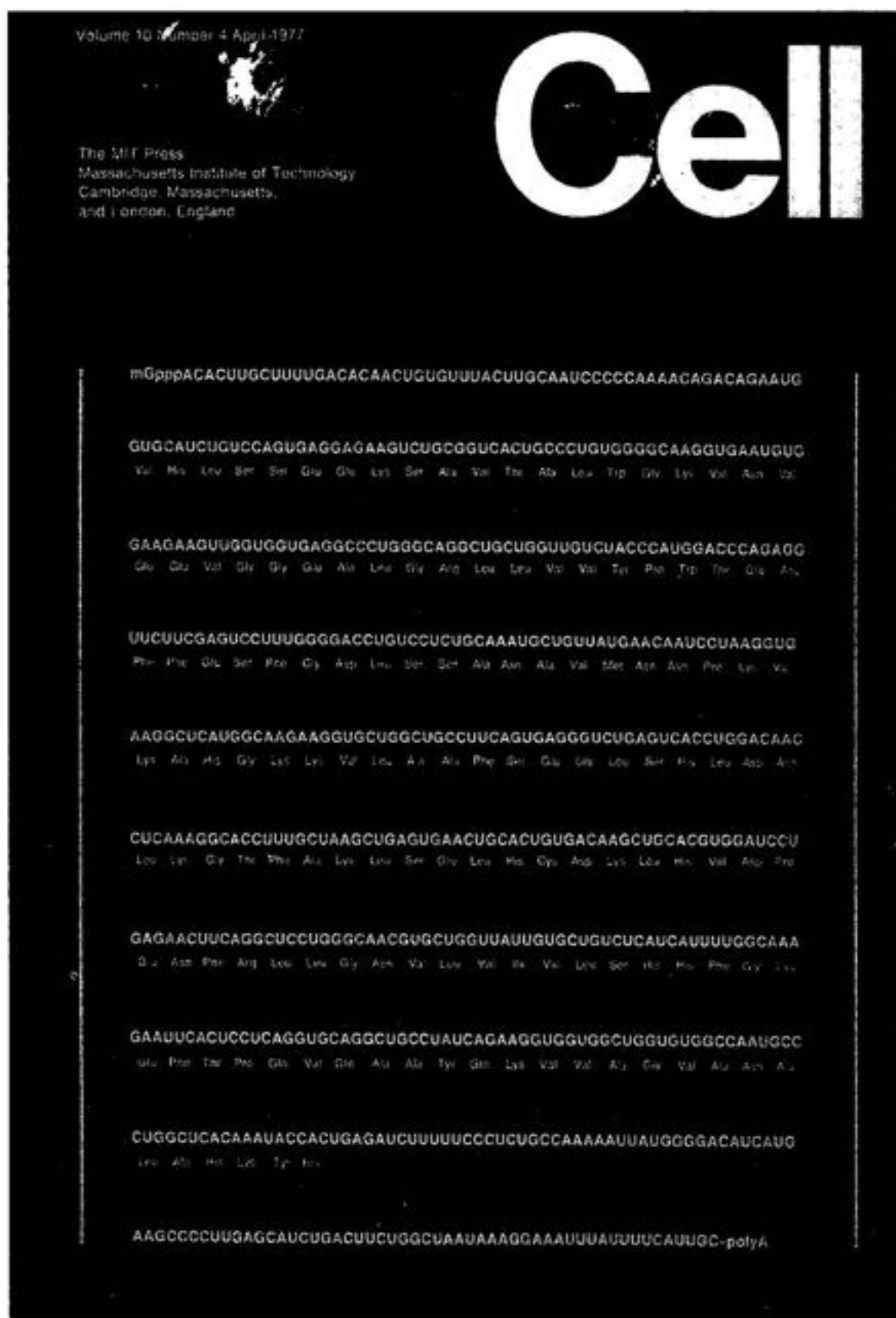


Fig. 3. La secuencia completa del mRNA de la β -globina de conejo, la primera estructura primaria de un RNA mensajero celular eucariote.

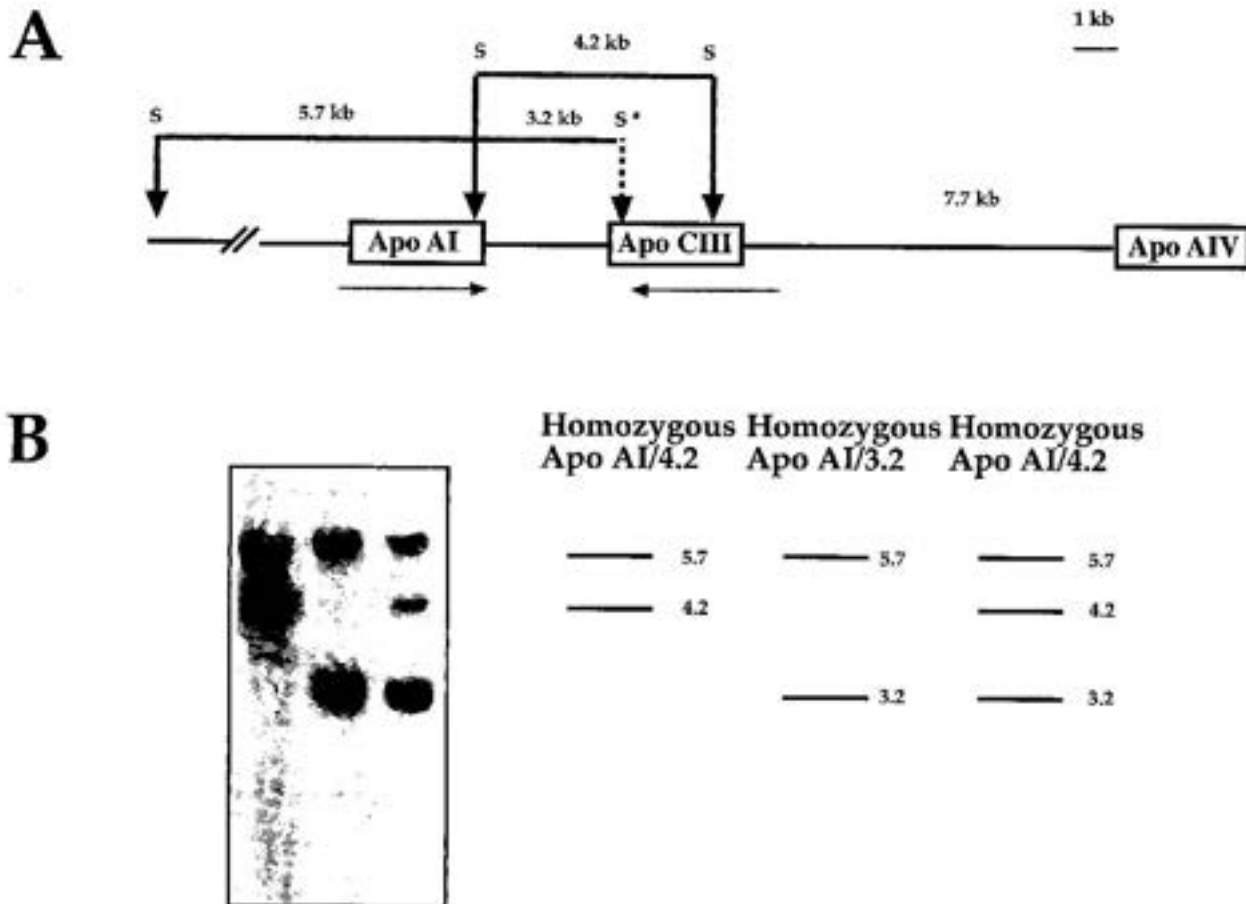


Fig. 4. A) Esquema de la región del cromosoma 11 humano donde se encuentra el cluster de los genes codificantes por las apolipoproteínas AI, CIII y AIV. B) La secuencia 3' del gen de ApoAI presenta variaciones individuales que resultan en dos posibles fragmentos de restricción que se evidencian por la técnica de Southern blot, el fragmento de 4.2 Kb (calle 1) o de 3.2 Kb (calle 2) o el respectivo heterocigota (calle 3).

Medicina molecular

El paso de Oxford a Trieste fue concomitante con grandes desarrollos en las aplicaciones de la biología molecular a la medicina (nacimiento de la medicina molecular), y deseo dedicar la última sección de esta presentación a nuestros estudios actuales que combinando la química, la biología molecular, la patología y la medicina nos han permitido hacer grandes progresos en la comprensión de ciertos aspectos patogenéticos de las enfermedades hereditarias, y en particular de la fibrosis quística (CF) y enfermedades relacionadas.

El gen que codifica por el Cystic Fibrosis Transmembrane Regulator (CFTR) fue identificado en 1989 como la causa de la fi-

brosis quística, la enfermedad hereditaria más frecuente en la población caucásica [Rommens J.M., 1989; Riordan J.R., 1989 y Kerem B., 1989]. Nuestro interés se centra en un aspecto particular de la función de este gen, que es el procesamiento anómalo del exón 9 del CFTR pre-mRNA. Este fenómeno es peculiar del gen humano, ya que otros mamíferos no presentan un *splicing* diferenciado del exón 9 [Rozmahel R., 1997 y Niksic M., 1999].

Las Figuras 6A y 6B muestran esquemáticamente la estructura de la proteína CFTR y su respectivo mRNA. El *splicing* del exón 9 del CFTR produce un mRNA que codifica por una proteína CFTR no funcional. La regulación de este *splicing* alternativo no conservado evolucionariamente es muy compleja e involucra varios segmentos regulatorios

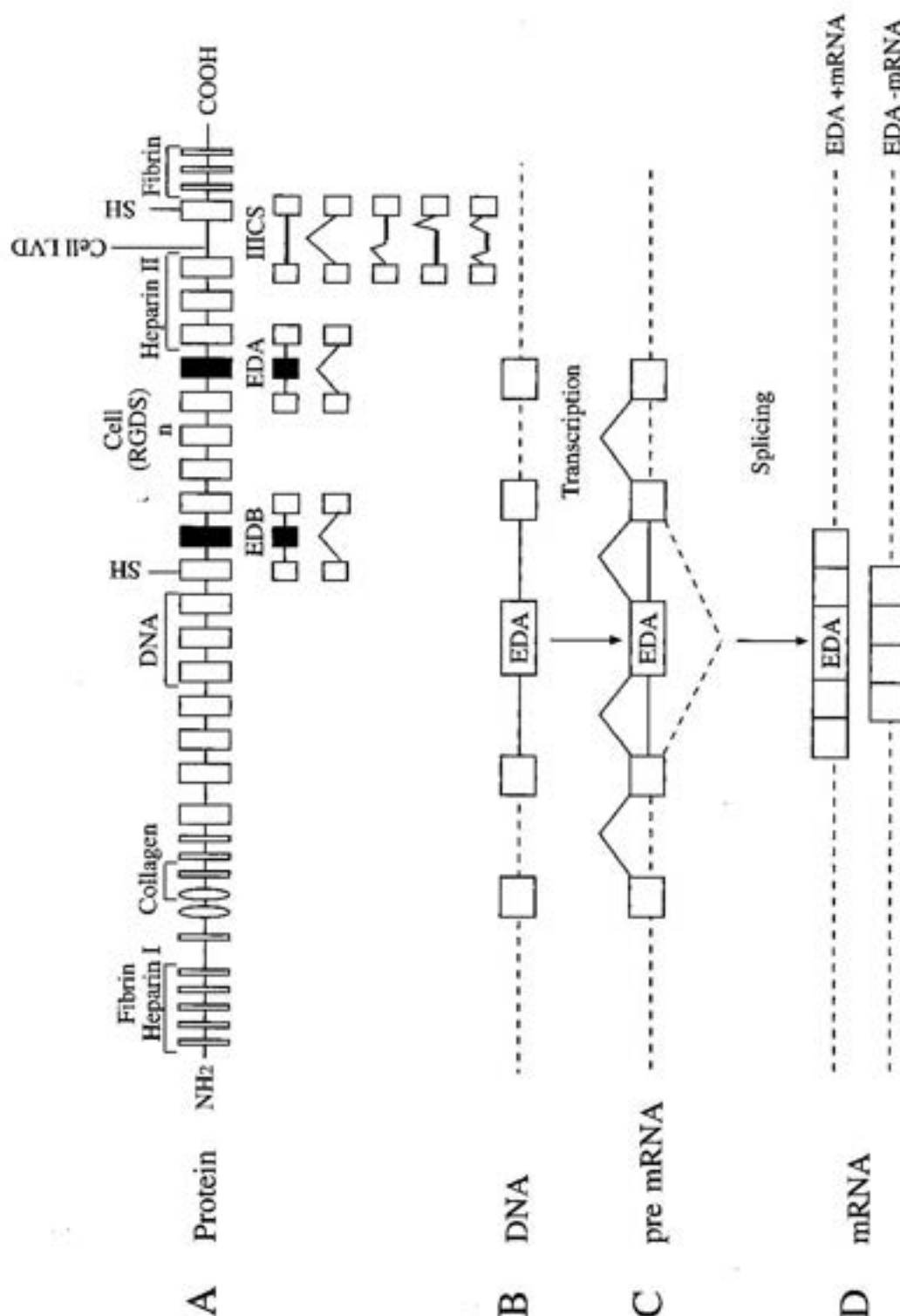


Fig. 5. A) Molécula de fibronectina, una proteína esencial de la matriz extracelular. Las repeticiones internas de tipo I, II y III están representadas respectivamente por rectángulos pequeños, óvalos y rectángulos grandes. Las zonas de procesamiento alternativo son oscuras y las interacciones conocidas de cada zona de la molécula están indicadas en la parte superior de la figura. B) Esquema de la región del EDA del gen de la fibronectina. C) El pre mRNA mensajero puede ser procesado de varios modos, en el caso del EDA una homología de tipo III puede ser incluida (línea llena) o excluida (línea punteada). D) mRNAs maduros que codifican por fibronectina EDA+ (tipo celular) y EDA- (tipo plasmático).

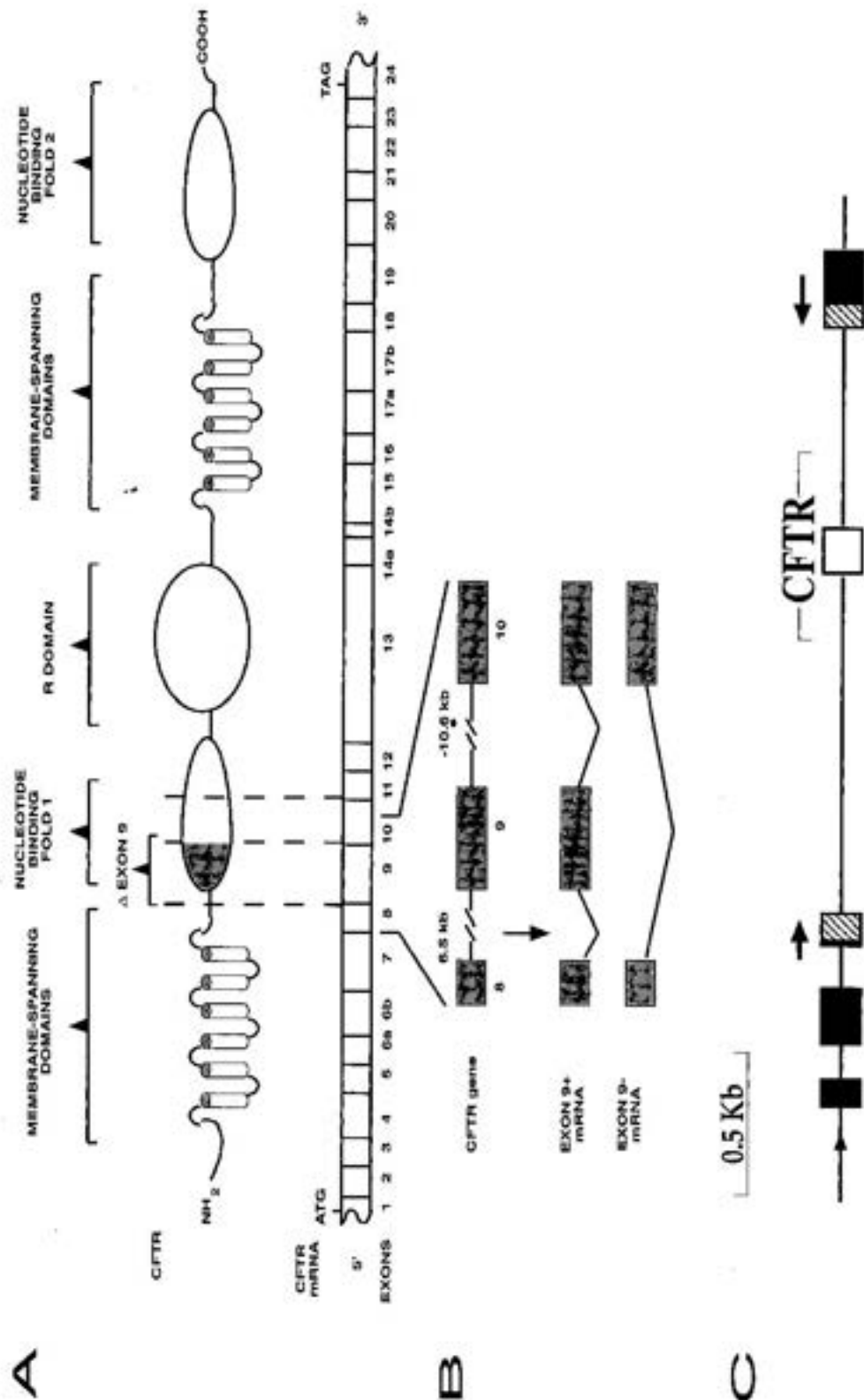


Fig. 6. A) Esquema de la proteína Cystic Fibrosis Transmembrane Regulator (CFTR). La función de las distintas regiones de la molécula está indicada en la parte superior de la figura. B) Esquema del procesamiento alternativo del exón 9 humano que cuando no es incluido codifica por una proteína no funcional. C) Minigen CFTR: ■ secuencias del gen de α globina □ secuencias del gen CFTR.

e interacciones RNA-proteína. La falta de proporciones variables del exón 9 en el CFTR mRNA ha sido asociado con las formas llamadas fibrosis quística monosintomáticas, entre las cuales se encuentran la ausencia congénita del *vas deferens* (CBAVD), pancreatitis, poliposis nasal, bronquiectasia y alergia broncopulmonar aspergilósica. La Figura 6C muestra esquemáticamente el minigen utilizado como modelo en todos nuestros experimentos. Como el gen completo de CFTR es de un tamaño que lo hace poco manejable, hemos introducido la región de interés en un gen de α -globina que es mucho más pequeño y nos permite manipularlo con facilidad. El minigen CFTR tiene una pauta de *splicing* idéntica al gen endógeno cuando se lo introduce en células en cultivo por transfección.

El gen de CFTR presenta, en la región del exón 9, una serie de características estructurales particulares de la especie humana (Figura 7A). Entre ellas, nuestra investigación ha identificado el polimorfismo (TG)_m/T_n, un *intronic splicing silencer* (ISS) y secuencias exónicas, *enhancer* (ESE) y *silencers* (ESS) del *splicing*. Las regiones polimórficas (TG)_m/T_n, donde "m" varía de 9 a 13 y "n" de 3 a 9, están asociadas a un mayor número de moléculas de mRNA procesadas aberrantemente (9-). Efectivamente, la cantidad de mRNA sin el exón 9 es directamente proporcional a "m" e inversamente proporcional a "n". La Figura 7B muestra la relación del porcentaje de CFTR mRNA 9- con fenotipos patológicos. Es evidente un aumento de pacientes con CBAVD o pancreatitis en aquellos individuos con un valor menor o igual a 5. Cabe destacar, asimismo, que no todos los portadores de genotipo T5 presentan características patológicas. Esta variabilidad de la penetración fenotípica del polimorfismo T5 y de las otras mutaciones indicadas en la Figura 7, pueden ser explicados a través de las interacciones de estas secuencias con proteínas nucleares involucradas en el procesamiento del pre-mRNA. Efectivamente, la secuencia UG/U (la versión RNA de T/TG) es el objetivo de una interacción con una nueva llegada al mundo del RNA *processing*, la proteína TDP43, identificada en nuestro laboratorio como el componente celular que se une espe-

cíficamente a la secuencia (UG)_m, cuando m es \geq que 6, inhibiendo el *splicing*, sobre todo en presencia de U5.

En la Figura 8 se muestra un experimento diseñado para estudiar la interacción RNA-proteína usando la técnica de estabilización covalente por UV. Es clara la diferencia entre el comportamiento de las moléculas de RNA: aquellas que no poseen la secuencia (ug) 11 no son capaces de ligar la proteína indicada por la flecha en la Figura 8B. Esta proteína fue identificada como TDP43 [Buratti E., 2001], un factor nuclear cuya propiedad de interactuar con RNA no había sido descrita previamente. Experimentos funcionales también demostraron que esta proteína tiene un efecto inhibitorio sobre el *splicing* normal. Efectivamente, altas concentraciones de TDP43 aumentan la cantidad de CFTR mRNA 9- [Buratti E., 2001].

La identificación funcional de los elementos regulatorios de *splicing* ubicados en el exón y en el intrón del minigen CFTR exón 9 fue llevada a cabo utilizando la técnica de delección o mutagénesis selectiva [Buratti E., 2001 y Pagani F., 2000] y probando la funcionalidad de los mutantes por transfección de los minigenes en células en cultivo acompañados, como indica la Figura 9, con un plásmido que expresa altas cantidades del factor de *splicing* SF2/ASF. El CFTR mRNA fue extraído de estas células y su composición respecto al exón 9 fue analizada por RT-PCR [Buratti E., 2001 y Pagani F., 2000]. La banda superior contiene el exón 9; es evidente que la sensibilidad a la inhibición de *splicing* por ASF/SF2 depende de la presencia combinada de secuencias exónicas e intrónicas. De este modo se identificaron un *exonic splicing enhancer* (ESE), un *exonic splicing silencer* (ESS) y un *intronic splicing silencer* (ISS). De particular interés es la secuencia ISS, que es el compañero anómalo del factor de *splicing* ASF/SF2. En el caso del exón 9 de CFTR, el factor SF2 tiene paradójicamente un efecto inhibitorio (Figura 9), mientras que su función habitual es la de estimular la inclusión de los exones donde su secuencia de reconocimiento está presente.

Finalmente todavía está en estudio el efecto de las mutaciones dentro del exón 9

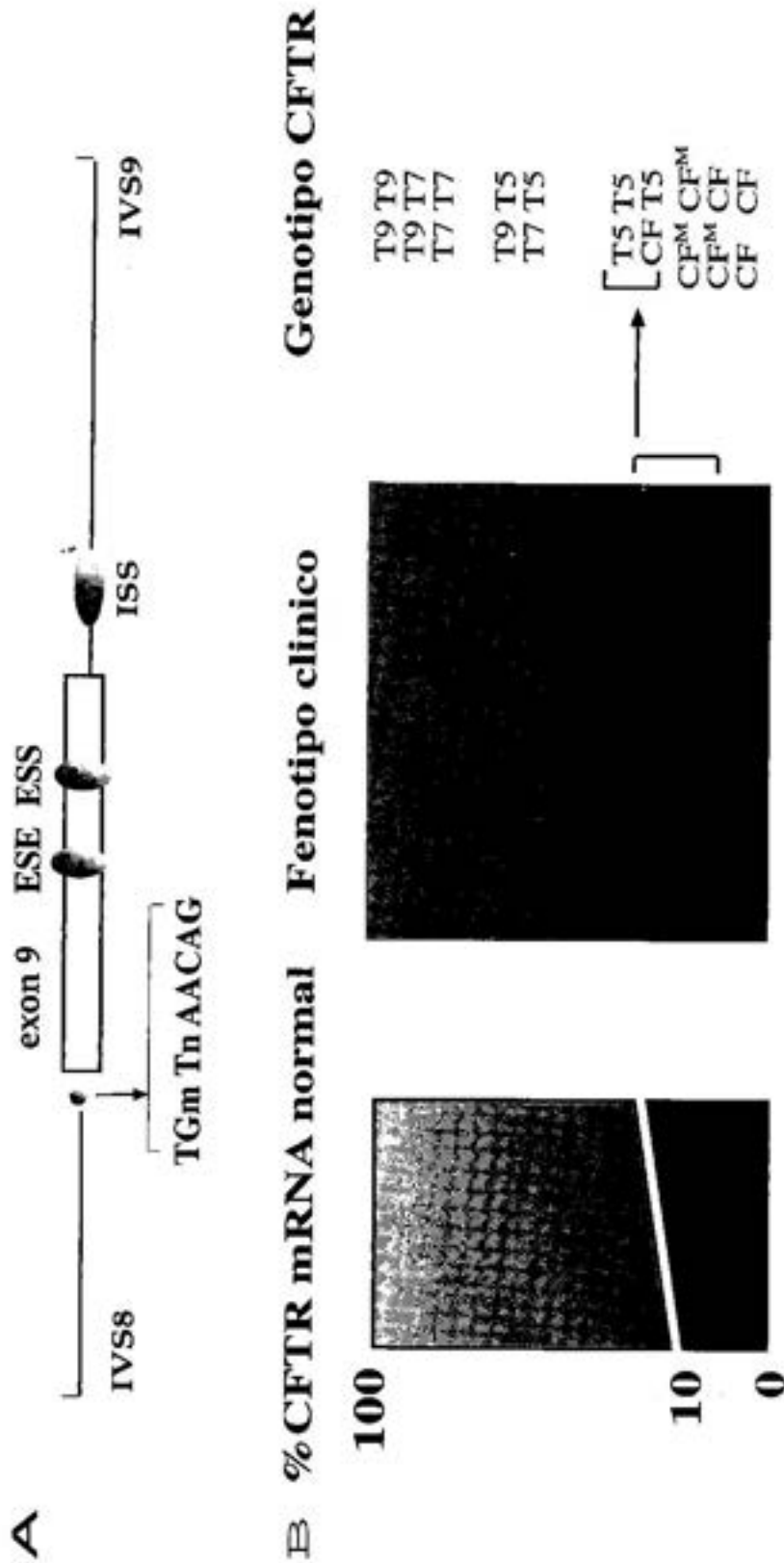
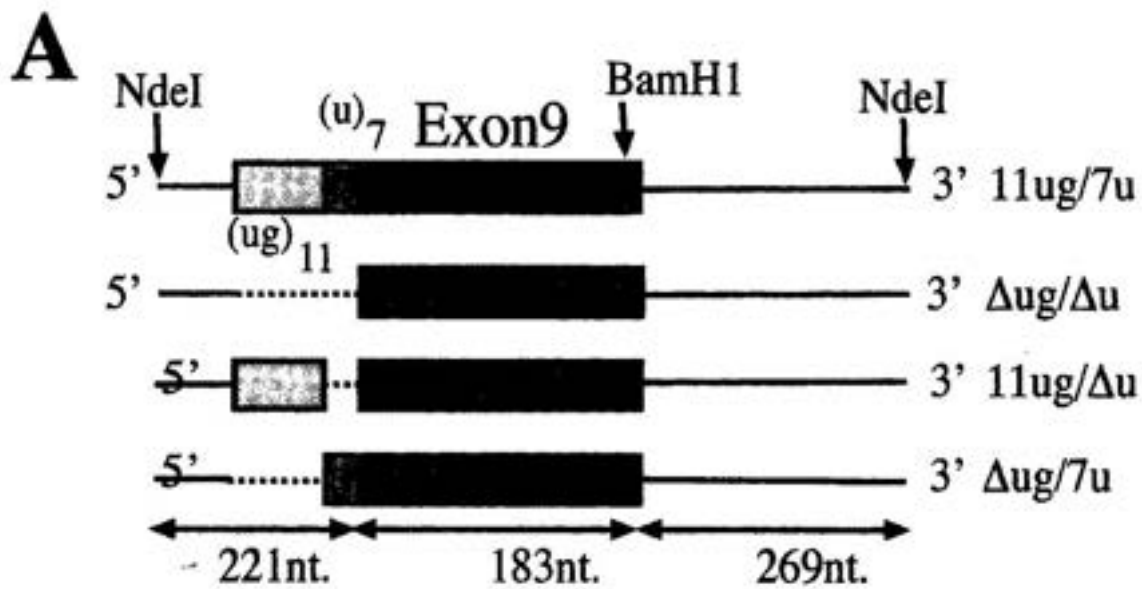


Fig. 7. A) Estructura detallada de la región del exón 9 y secuencias intrónicas adyacentes. ESE: Exonic splicing silencer, ISS: Intronic splicing silencer. B) Relación del porcentaje de CFTR mRNA 9' y el fenotipo clínico. PS: Suficiencia pancreática. PI: Insuficiencia pancreática.



B

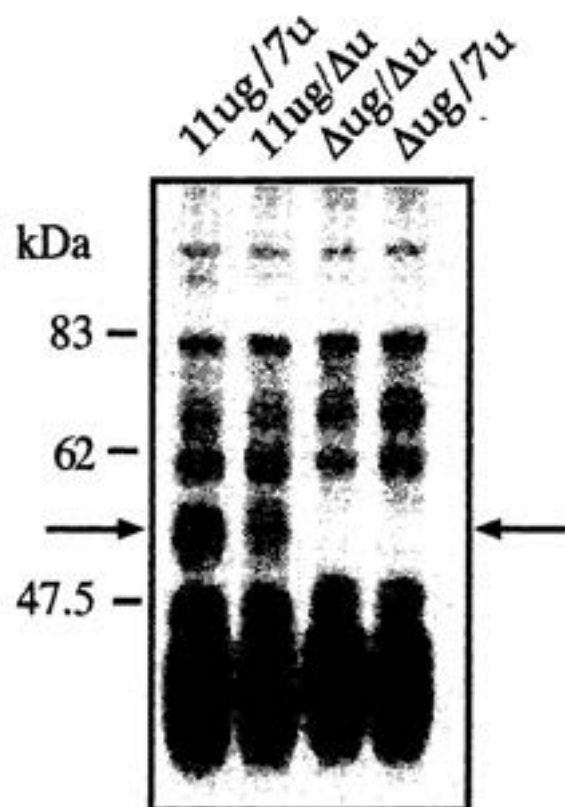
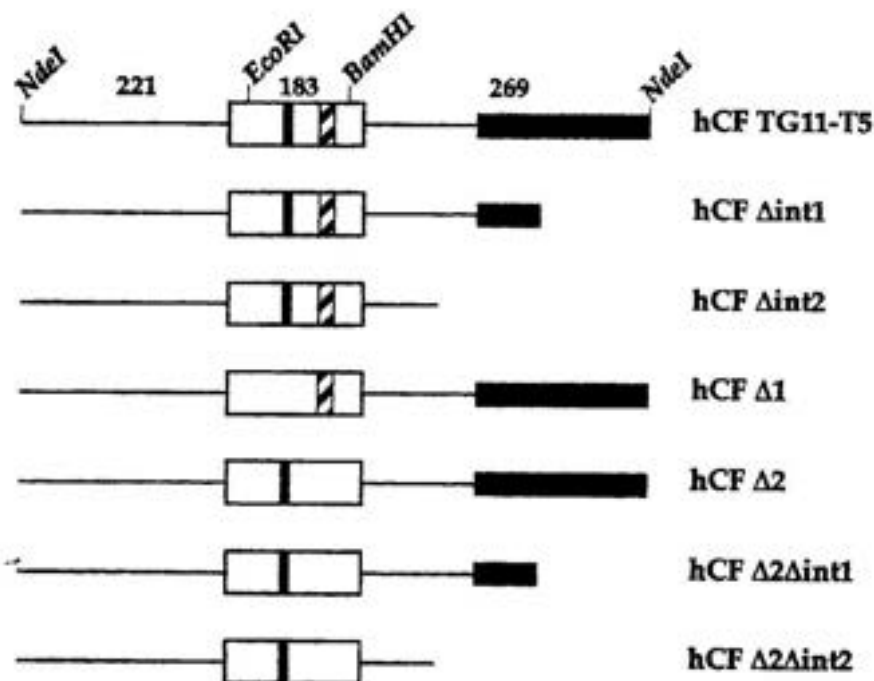


Fig. 8. Análisis de las interacciones RNA-proteína: Minigenes artificiales que contienen la región del CFTR exón 9 y secuencias intrónicas adyacentes fueron mutagenizados selectivamente en el polimorfismo (TG)_m/T_n del 3' splice site y luego transcritos *in vitro*. Los RNA resultantes están representados esquemáticamente en el panel A, el *wild type* (11ug/7u), la doble delección de (u)_n y (ug)_m (Δug/Δu), la delección de u_n (11ug/Δu) y la delección de ug_m. Estos RNAs fueron utilizados en experimentos de UV *cross linking* con extractos nucleares (Δug/7u) para detalles de la técnica ver ref. 25). Un análisis de los complejos RNA-proteína resultantes se muestra en el panel B.

A



B

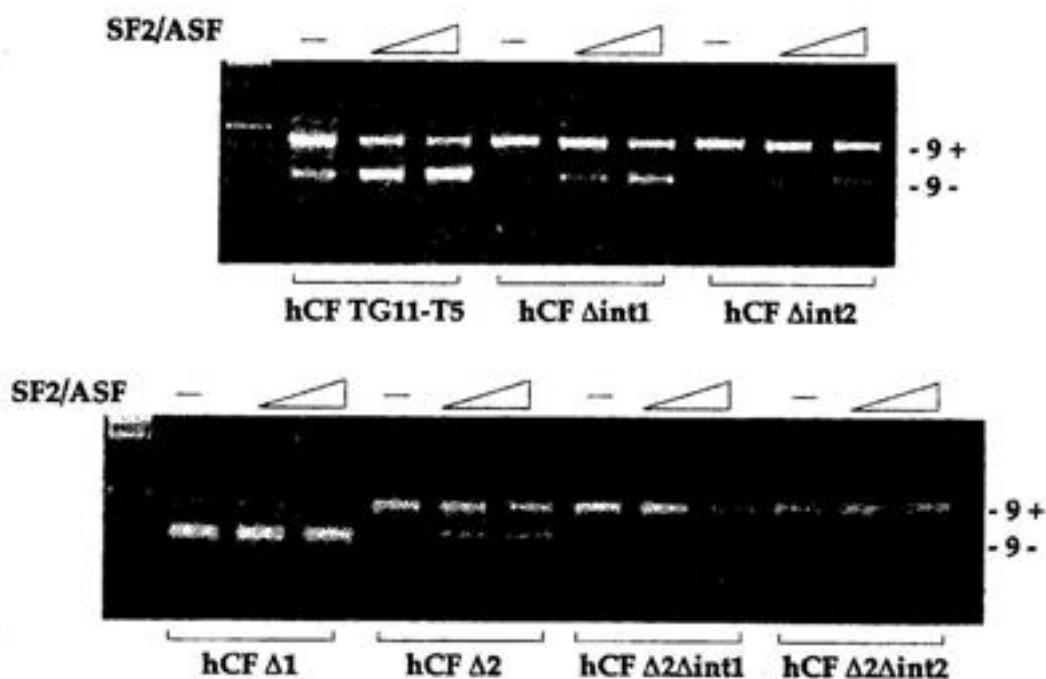


Fig. 9. Elementos regulatorios involucrados en el *splicing* alternativo del exón 9 del CFTR pre-mRNA: A) Esquema de los minigenes utilizados en el experimento indicando el *exonic splicing enhancer* (ESE) ■, *exon splicing silencer* (ESS) ▤ e *intronic splicing silencer* (ISS) ■. B) Experimentos de funcionalidad *in vivo*: Los minigenes fueron introducidos en células en cultivo y luego de 28 horas el RNA fue extraído y analizado por RT-PCR. Los fragmentos resultantes fueron analizados por separación electroforética que permite diferenciar la banda 9+ de la banda 9- y en base a ellas cuantificar las cantidades relativas de ambos mRNAs.

sobre el *splicing*. Este fenómeno es extremadamente interesante porque es natural sospechar que mutaciones que cambian el aminoácido van a ser la causa del problema funcional de la proteína, pero no es tan obvio considerar que mutaciones en la secuencia codificante pueden también causar el efecto patológico a través de un aumento del *splicing out* del exón 9. En la Figura 10 se muestran las mutaciones en la secuencia codificante que han sido descritas en el exón 9 y cual de ellas afecta el RNA *processing*. La mutación A455E es particularmente interesante porque se presenta en pacientes con síntomas clínicos serios a edad muy temprana, pero también se la ha encontrado en sujetos de más de 60 años sin problemas clínicos significativos. La proteína mutada ha sido estudiada y presenta un grado de funcionalidad aceptable. Nuestra interpretación es que la mutación causa un *splicing out* del exón 9 que cambia de tejido a tejido y de individuo a individuo, dependiendo de las concentraciones de *splicing factors* y TDP43 que son sujetas a variaciones considerables en la población. Las mutaciones G424S, I444S y A455E se encuentran en secuencias exónicas que representan *enhancers* y *silencers* de *splicing* y nos dan una nueva óptica para ver las mutaciones, donde el cambio de la secuencia aminoacídica es banal, pero el cambio de la secuencia nucleotídica causa un problema radical para el RNA *splicing* que resulta en una delección de un exón completo.

¿Qué tiene de medicina esta biología molecular? El conocimiento preciso del mecanismo patológico molecular nos permite identificar cuál es el objetivo para una eventual intervención terapéutica. Efectivamente, el hecho que TDP43 inhibe el *splicing* nos da la pista a seguir. La inhibición de la síntesis de esta proteína con consecuente disminución de su concentración en el núcleo celular debería resultar en una mayor inclusión de exón 9 y por lo tanto en una mayor cantidad de CFTR mRNA 9+ que se traduce en una proteína funcional.

Un método ampliamente usado para la inhibición de la síntesis de proteínas específicas es el antisentido RNA o DNA. Efectivamente, la introducción en la célula de se-

cuencias complementarias a las codificantes que se encuentran en el mRNA resulta en el bloqueo de las funciones de esta molécula y, en consecuencia, en la inhibición de la síntesis de proteínas [Agrawals S., 2000].

Una vez más, la experiencia del inicio de mi carrera en la síntesis orgánica fue de gran valor en este tipo de experimentos, ya que el antisentido es simplemente un oligonucleótido sintético de tamaño variable, en promedio alrededor de 30 nucleótidos, que es modificado mediante el reemplazo del grupo O=P por S=P para extender su vida media intracelular (Figura 11).

Estos oligonucleótidos pueden ser agregados al medio de cultivo, y las células los internalizan o son introducidos en los tejidos *in vivo*. Una vez dentro de las células se aparean específicamente con el objetivo mRNA complementario. Esta hibridización obstruye físicamente el funcionamiento del ribosoma y/o activa la RNAasaH endógena, una enzima que degrada específicamente el mRNA en regiones doble hélice. La destrucción del mRNA y la obstrucción de la función del ribosoma resultan en la inhibición de la síntesis de la proteína codificada por el mRNA. En nuestro caso hemos visto que la interacción de la proteína TDP43 con la secuencia (GU)_m en el 3' *splice site* del exón 9 del CFTR pre-mRNA resulta en la exclusión de este exón y una mayor proporción de proteína CFTR no funcional, y por lo tanto, síntomas clínicos de CF. Al menos en células en cultivo, este problema puede ser resuelto con el sistema antisentido [Buratti E., 2001]. En la Figura 12A se indica el sitio de complementariedad en el CFTR mRNA de 4 oligonucleótidos fosfotiolatos antisentido que fueron usados en experimentos *in vitro* en células de derivación hepática transfectadas con el minigen CFTR que utilizamos para estudiar el *splicing* alternativo del exón 9 (Figura 6C). Después de 28 horas de tratamiento, las células fueron cosechadas, extraídos el mRNA y proteína y analizados, respectivamente, por RT-PCR (Figura 12B) y *western blot* (Figura 12C). Es evidente el aumento de CFTR mRNA exón 9+ que codifica por la proteína CFTR funcional (Figura 12B). El efecto del antisentido es confirmado por la disminución de la cantidad de

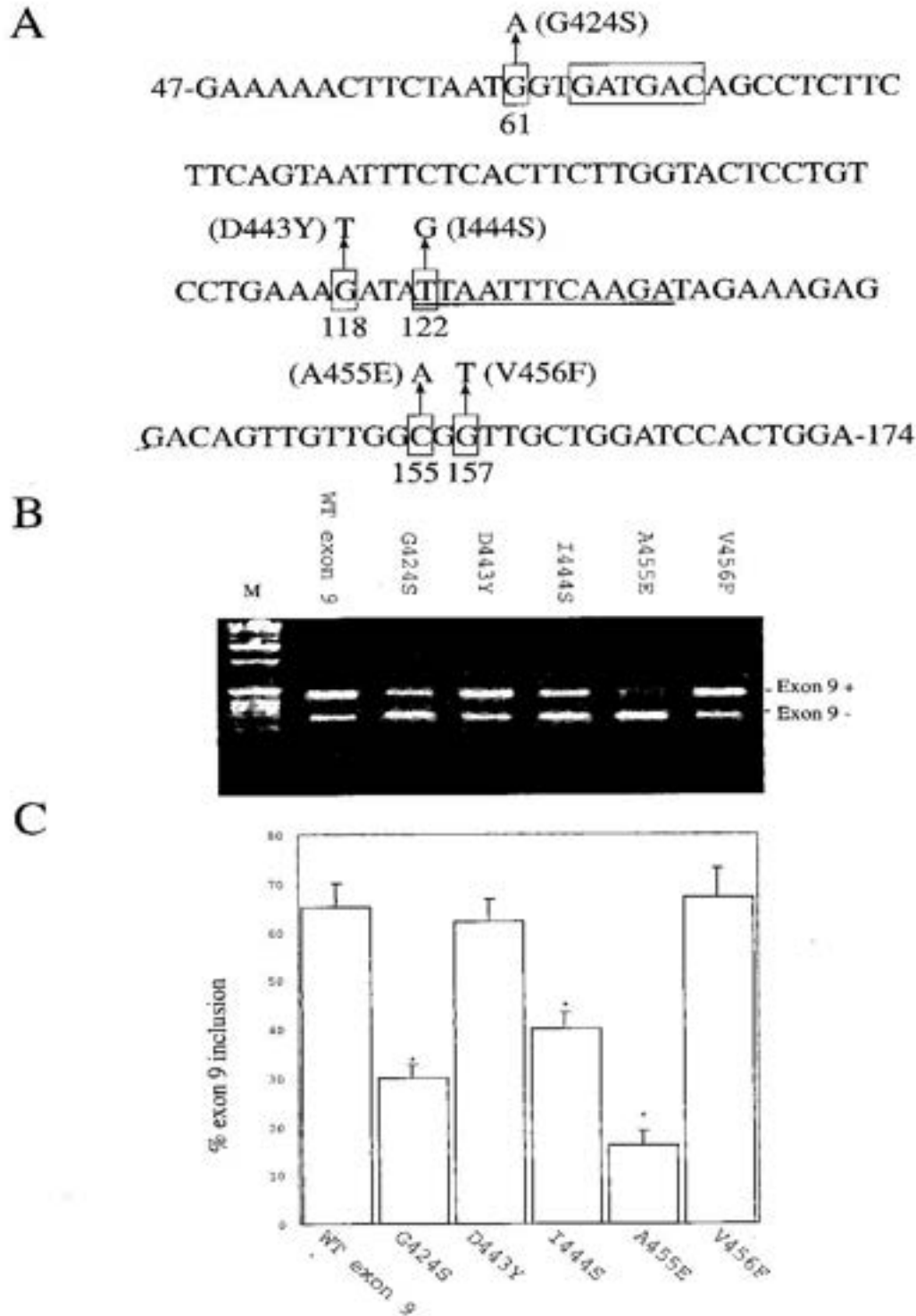


Fig. 10. A) Secuencia del exón 9 indicando mutaciones descritas en individuos con fibrosis quística de características clínicas variables. B) Análisis *in vivo* del pre-mRNA *splicing*. Es evidente el efecto diferenciado de las mutaciones exónicas. En particular mientras que el minigen *wild type* produce 80-85% de mRNA exón 9+, el minigen portador de la mutación A455E, que se diferencia en una sola base, produce sólo 10% de mRNA exón 9+. C) Representación esquemática del porcentaje de exón 9+ CFTR mRNA estimado, cuantificando las bandas 9+ y 9- del gel en el panel B.

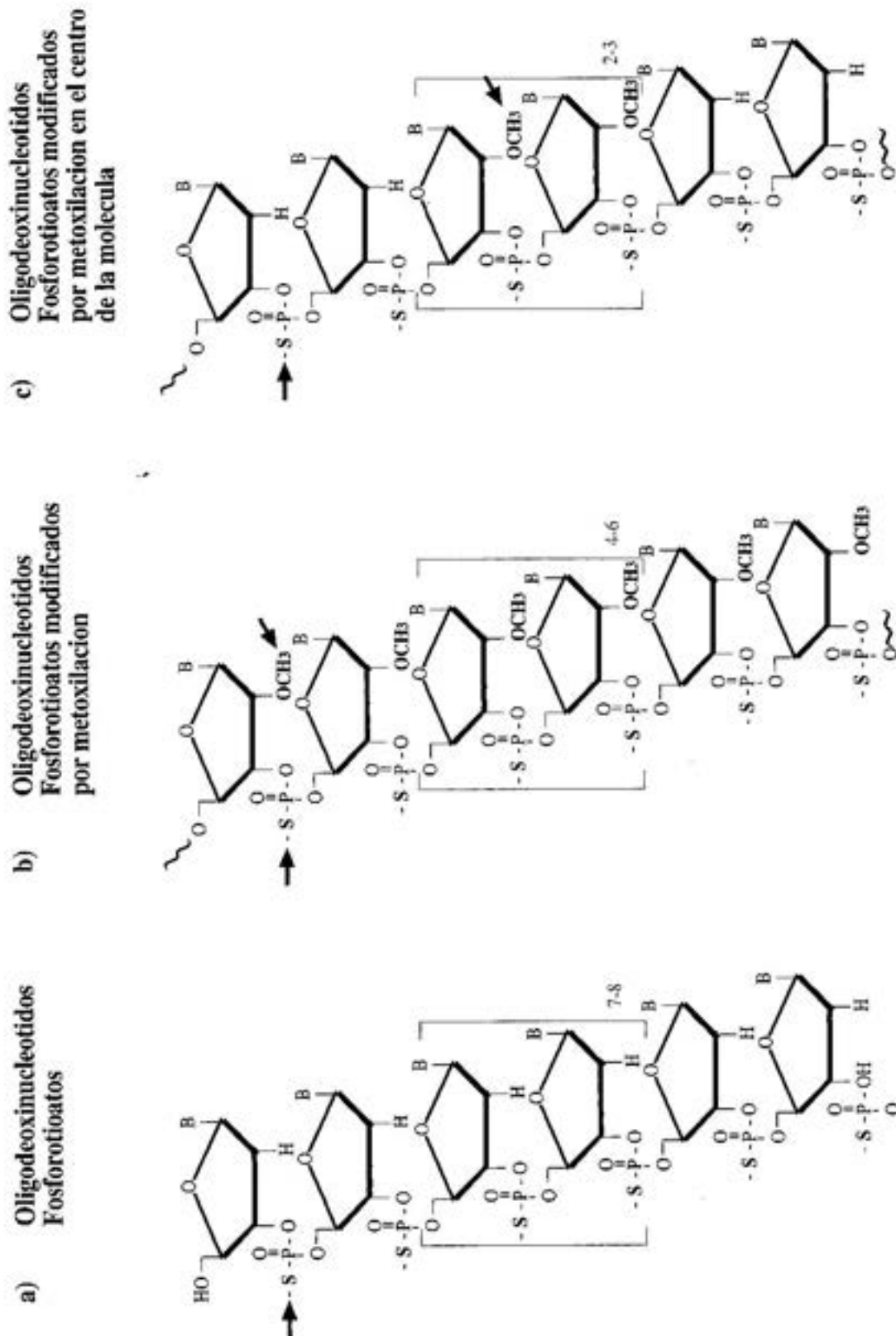


Fig. 11. Estructura de los oligodeoxinucleótidos fosforitatos. Modificaciones químicas adicionales pueden ser introducidas como la metilación del anillo ribosa para aumentar la especificidad del antisense y su vida media intracelular.

proteína TDP43 vista por *western blot*, que es paralela al aumento de CFTR mRNA 9+ (Figura 12C). Podemos decir que si encontráramos el modo de introducir el antisentido o una molécula orgánica con propiedades similares en los tejidos de un individuo con CF derivada del problema de *splicing* del exón 9 [Buratti E., 2001], tendríamos un tratamiento efectivo y específico para este tipo de fibrosis quística. Este último experimento nos lleva a completar el círculo donde la química, la biología molecular y la medicina se encuentran y nos indican un posible camino terapéutico para aliviar los efectos de una enfermedad hereditaria.

Quisiera terminar con una reflexión sobre el valor de la ciencia pura que en este período parece siempre más en peligro de perder apoyo a favor de proyectos de transferencia inmediata. Los experimentos descriptos precedentemente fueron iniciados porque nos interesaba el conocimiento de la estructura del mRNA y de los mecanismos de procesamiento del pre-mRNA. No obstante este inicio poco auspicioso, desde el punto de vista de su aplicabilidad inmediata, podemos sin duda decir que se ha contribuido a comprender el mecanismo patogénico de una enfermedad, a racionalizar el tratamiento y a proyectar nuevas herramientas farmacológicas para un tratamiento más eficiente. Este es un caso simple e inconcluso, pero si observamos la producción científica encontraremos abundantes ejemplos mucho más claros e importantes, que indican, sin lugar a duda, que el valor social de la ciencia no es principalmente su valor práctico. La investigación de base vale mucho más que su retorno económico hipotético directo. Su valor fundamental es la creación de una competencia técnica científica colectiva que permite adquirir y difundir innovación en el tejido social. En otras palabras, los contenidos específicos y los temas concretos de la investigación científica son de importancia secundaria. La práctica de la investigación científica de base garantiza a sus actores el mantenimiento de un alto nivel de calificación técnico-científica que, aunque dispar en las instituciones de enseñanza y formación, permiten finalmente el funcionamiento de un sistema industrial productivo, innovativo y en evo-

lución dinámica. La financiación nacional continua de la investigación científica es como la obtención de un boleto de entrada permanente al stock mundial de los conocimientos acumulados y no una inversión a corto plazo. Obviamente, hay que estimar correctamente el esfuerzo financiero que es razonable requerir a la comunidad en favor de la investigación científica de base.

Agradecimientos

Mi más profundo reconocimiento a mis maestros directos y a aquellos de los que he tratado de seguir el ejemplo: E. G. Gros, I. D. Algranati, M. J. Vernengo, H. N. Torres, L. F. Leloir, G. G. Browlee, F. Sanger, y a todos mis amigos, colaboradores y personal de los institutos en los que he trabajado.

Referencias

- Agrawal S. and E.R. Kandimalla, "Antisense therapeutics: is it as simple as complementary base recognition?". *Mol. Med. Today* 6, 72-81 (2000).
- Baralle F.E. and E.G. Gros, "Biosynthesis of cuscohygrine in *Atropa belladonna* from sodium acetate-1-¹⁴C". *Phytochemistry* 8, 849 (1969).
- Baralle F.E. and E.G. Gros, "Biosynthesis of cuscohygrine in *Atropa belladonna* from sodium acetate-2-¹⁴C". *Phytochemistry* 8, 853 (1969).
- Baralle F.E. and E.G. Gros, "Biosynthesis of cuscohygrine and hyosciamine in *Atropa belladonna* from DL- α -methyl-³H-ornithine and DL-d-N-methyl-³H-ornithine". *J. Chem. Soc. (D)* 721 (1969).
- Baralle F.E., "Complete nucleotide sequence of the 5' non-coding region of rabbit B-globin mRNA". *Cell* 10, 549-558 (1977).
- Baralle F.E., "Structure-function relationship of 5' non-coding sequence of rabbit α - and B-globin mRNA". *Nature* 267, 279-281 (1977).
- Baralle F.E., "Complete nucleotide sequence of the 5' non-coding region of human α - and B-globin mRNA". *Cell* 12, 1085-1095 (1977).
- Baralle F.E. and G.G. Brownlee, "AUG is the only recognisable signal sequence in the 5' non-coding regions of eukaryotic mRNA". *Nature* 274, 84-87 (1978).
- Baralle F.E., C.C. Shoulders and N.J. Proudfoot,

- "The primary structure of the human ϵ -globin gene". *Cell* 21, 621-626 (1980).
- Buratti E., T. Dörk, E. Zuccato, F. Pagani, M. Romano and F.E. Baralle, "Nuclear Factor TDP-43 and SR proteins promote *in vitro* and *in vivo* CFTR exon 9 skipping". *EMBO J.*, in press (2001).
- Efstratiadis A., J.W. Posakony, T. Maniatis, R.M. Lawn, C. O'Connell, R.A. Spritz, J.K. Driehl, B.G. Forget, S.M. Weissman, J.L. Slightom, A.E. Blechl, O. Smithies, F.E. Baralle, C.C. Shoulders and N.J. Proudfoot, "The structure and evolution of the human β -globin gene family". *Cell* 21, 653-668 (1980).
- Kerem B., J.M. Rommens, J.A. Buchanan, D. Markiewicz, T.K. Cox, A. Chakravarti, M. Buchwald and L.C. Tsui, "Identification of the Cystic Fibrosis gene: genetic analysis". *Science* 245: 1073-1080 (1989).
- Kornblihtt A.R., K. Vibe-Pedersen and F.E. Baralle, "Isolation and characterization of cDNA clones for human and bovine fibronectins". *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 80, 3218-3222 (1983).
- Kornblihtt A.R., K. Vibe-Pedersen and F.E. Baralle, "Human fibronectin: molecular cloning evidence for two mRNA species differing by an internal segment coding for a structural domain". *EMBO J.* 3, 221-226 (1984).
- Kornblihtt A.R., K. Vibe-Pedersen and F.E. Baralle, "Human fibronectin: cell specific alternative mRNA splicing generates polypeptide chains differing in the number of internal repeats". *Nucleic Acids Res.* 12, 5853-5868 (1984).
- Kornblihtt A.R., K. Umezawa, K. Vibe-Pedersen and F.E. Baralle, "Primary structure of human fibronectin: Differential splicing may generate at least 10 polypeptides from a single gene". *EMBO J.* 4, 1755-1759 (1985).
- Lawn R.M., A. Efstratiadis, C. O'Connell and T. Maniatis, "The nucleotide sequence of the human β -globin gene". *Cell* 21, 647-651 (1980).
- Niksic M., M. Romano, E. Buratti, F. Pagani and F.E. Baralle, "Functional analysis of cis-acting elements regulating the alternative splicing of human CFTR exon 9". *Hum. Mol. Gen.* 8: 2339-2349 (1999).
- Pagani F., E. Buratti, C. Stuani, M. Romano, E. Zuccato, M. Niksic, L. Giglio, D. Faraguna and F.E. Baralle, "Splicing factors induce Cystic Fibrosis transmembrane regulator exon 9 skipping through a nonevolutionary conserved intronic element". *J. Biol. Chem.* 275: 2141-21047 (2000).
- Proudfoot N.J. and F.E. Baralle, "Molecular cloning of human ϵ -globin gene". *PNAS* 76: 5435-5439 (1979).
- Rees A., C.C. Shoulders, J. Stocks, D.J. Galton and F.E. Baralle, "DNA polymorphism adjacent to the human apoprotein AI gene: relationship to hypertriglyceridaemia". *Lancet* (1), 444-446 (1983).
- Riordan J.R., J.M. Rommens, B. Kerem, N. Alon, R. Rozmahel, Z. Grzelczak, J. Zielenski, S. Lok, N. Plavsic, J.L. Cou, M.L. Drumm, M.C. Iannuzzi, F.S. Collins and L.C. Tsui, "Identification of the Cystic Fibrosis gene: cloning and characterisation of complementary DNA". *Science* 245: 1066-1073 (1989).
- Rommens J.M., M.C. Iannuzzi, B. Kerem, M.L. Drumm, G. Melmer, M. Dean, R. Rozmahel, J.L. Cole, D. Kennedy, N. Hidaka, M. Zsiga, M. Buchwald, J.R. Riordan, L.C. Tsui and F.S. Collins, "Identification of the Cystic Fibrosis gene: chromosome walking and jumping". *Science* 245: 1059-1065 (1989).
- Rozmahel R., H.H. Heng, A.M. Duncan, X.M. Shi, J.M. Rommens and L.C. Tsui, "Amplification of CFTR exon 9 sequences to multiple locations in the human genome". *Genomics* 45, 554-561 (1997).
- Slightom J.L., A.E. Blechl and O. Smithies, "Human fetal $\alpha\gamma$ - and $\alpha\delta$ -globin genes: complete nucleotide sequences suggested that DNA can be exchanged between these duplicated genes". *Cell* 21, 627-638 (1980).
- Spritz R.A., J.K. De Riel, B.G. Forget and S.M. Weissman, "Complete nucleotide sequence of the δ -globin gene". *Cell* 21, 639-646 (1980).
- Vibe-Pedersen K., A.R. Kornblihtt and F.E. Baralle, "Expression of a human α -globin/fibronectin gene hybrid generates two mRNAs by alternative splicing". *EMBO J.* 3, 2511-2516 (1984).

Manuscrito recibido y aceptado en abril de 2001.

II

ENTREGA DE LOS PREMIOS "ACADEMIA NACIONAL DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES" y "ERNESTO E. GALLONI"

- AÑO 1999 -

- Premio "MANUEL BALANZAT" en Matemática
al DR. JORGE E. SOLOMÍN

Premio "WOLFGANG MECKBACH" en Física Experimental
al DR. OSCAR E. MARTÍNEZ

Premio "JUAN MANUEL BARCALA" en Ingeniería Electrónica
al ING. ANTONIO A. QUIJANO

Premio "ORESTE MORETTO" en Ingeniería Geotécnica
al ING. JORGE A. SUÁREZ

Premio "RANWEL CAPUTTO" en Neuroquímica
al DR. ALEJANDRO F. DE NICOLA

Premio "VENANCIO DEULOFEU" en Química de Productos Naturales
al DR. OSCAR S. GIORDANO

Premio "HORACIO J. HARRINGTON" en Geología Estructural
al DR. EDUARDO A. ROSSELLO

Premio "ERNESTO E. GALLONI"
-instituido por la Sra. Nélida Pedretti de Galloni e hijos-
en Ingeniería Nuclear
al DR. DARÍO F. DELMASTRO

APERTURA DEL ACTO DE ENTREGA DE PREMIOS

Eduardo G. Gros

Presidente de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
hasta su fallecimiento, el 12 de junio de 2001.

La presente es la séptima oportunidad en que nuestra entrega de premios, uno de los actos anuales más importantes que realizamos, se lleva a cabo en este magnífico auditorio amablemente cedido por la Academia Nacional de Medicina, a la que deseo expresar mi profundo agradecimiento por su generosidad.

Nuestra Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales fue creada en 1874 por un decreto de Mariano Acosta, quien era gobernador de la provincia de Buenos Aires. Mediante ese decreto del 26 marzo 1874 se establecía la reglamentación de la Instrucción Secundaria y Superior por la cual se determinaba la constitución y el funcionamiento de los cuerpos que formarían la Universidad de Buenos Aires, siendo la Academia parte de ella.

Años más tarde, en 1926, por decreto del presidente de la Nación Marcelo T. de Alvear, la Academia se separó de la Universidad, adquiriendo autonomía como institución civil con sus propios estatutos y reglamentos.

Por la ley 14007/50 y su reglamentación por el decreto 7500/52, esta Academia, como todas las existentes en aquellos momentos, dejó prácticamente de funcionar, ya que una de las reglamentaciones limitaba a 60 años la edad que debían tener los académicos.

Por esa razón, esta Academia quedó con sólo 9 miembros, impidiéndole funcionar.

Su actividad fue retomada posteriormente a la emisión del decreto 4362/55, que restableció su autonomía.

La nuestra, tal como las restantes academias nacionales, tiene como finalidad el estudio y profundización de las ciencias para contribuir a su adelanto y perfeccionamiento con miras al bien común. Para ese propósito debe congregarse a personas conspicuas y representativas en el cultivo de las ciencias, con la finalidad de intensificar el estudio o el ejercicio de las mismas; promover el progreso de sus diferentes disciplinas; estimular la plenitud de las vocaciones intelectuales; difundir el fruto de sus trabajos; y enaltecer, en el país y en el extranjero, el prestigio de la cultura nacional.

Es evidente que para cumplir con muchos de esos propósitos es necesario contar con los recursos apropiados. Este hecho no siempre fue plenamente satisfecho, de tal manera que en ciertas etapas de su existencia la Academia tuvo un desarrollo muy modesto, haciendo imposible, en términos generales, llevar a la práctica diversos programas iniciados en los deseos y aspiraciones de sus miembros.

Es fácil comprender entonces que los esfuerzos de los miembros de la Academia para cumplir con algunos de los mandatos que le fueron encomendados, resultaron infructuosos por no contar con los medios materiales

Acto realizado el 12 de noviembre de 1999.

para llevarlos a cabo.

Sin embargo, varios de los propósitos que justifican su existencia han podido cumplimentarse, como contribuir, con modestia, al funcionamiento del internacionalmente renombrado Instituto de Botánica Darwinion; mantener nuestra propia Biblioteca; y editar publicaciones periódicas, como los "Anales", las "Monografías" y los boletines "Noticias", además de contar con nuestra propia página en la red internacional accesible por Internet.

Por otro lado, si recordamos que uno de nuestros deberes es estimular la plenitud de las vocaciones intelectuales y difundir el fruto de sus trabajos para enaltecer el prestigio de la cultura nacional, estamos ahora cumpliendo parte de ese mandato, ya que el acto de premiar tareas científicas significa otorgar el reconocimiento que merecen aquellos que, inadvertidamente para la mayoría de nuestra sociedad, empeñan su esfuerzo en el desarrollo de las ciencias y consecuentemente enaltecen el prestigio de nuestra cultura.

En esta acción de reconocer las labores de nuestros hombres y mujeres de ciencia, nuestra Academia tiene un antiguo historial: desde hace décadas instituyó y otorgó premios a destacados cultores de las ciencias que nos competen.

En 1927, el Consejo Deliberante de Buenos Aires instituyó el premio "Eduardo L. Holmberg" y encomendó a nuestra Academia su organización y discernimiento. Holmberg fue un naturalista de excelencia, fundador y director del Jardín Zoológico de Buenos Aires y miembro de esta corporación durante 47 años, desde 1890 hasta 1937.

En 1956 se estableció el premio "Cristóbal M. Hicken" en homenaje a otro distinguido botánico y fundador del ya mencionado Instituto de Botánica Darwinion, cedido por él a esta Academia en 1936.

En 1966 se crearon los premios "Angel Gallardo" y "Enrique Herrero Ducloux", en 1968 el premio "Teófilo Isnardi", en 1972 el premio "Enrique P. Villarreal" y en 1982 el último premio de este tipo, denominado "Alberto González Domínguez".

Y digo el último premio de este tipo, porque a partir de 1992 la Academia estable-

ció otra norma para sus premios. Se programó y adoptó que cada una de las tres Secciones que la forman -Matemática, Física y Astronomía; Ingeniería; y Ciencias Químicas, de la Tierra y Biológicas- puedan proponer hasta tres distinciones con la denominación y la orientación definida anualmente por cada una de ellas.

Como norma general se adoptó que esos premios, que llevan el nombre genérico de "Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales", conlleven, año a año, el nombre de algún académico, científico o tecnólogo de reconocido prestigio, físicamente desaparecido.

En la presente ocasión el premio en Matemática se denomina "Manuel Balanzat", en homenaje a quien fuera miembro titular de la Academia durante el período 1980 a 1994. Balanzat fue un destacado matemático y un hombre ejemplar con una vida austera consagrada al servicio de la ciencia y la sociedad.

El premio en Física Experimental tiene el nombre de "Wolfgang Meckbach", recordando a quien fuera académico correspondiente nacional entre 1982 y 1998. Conjuntamente con Balseiro y otros destacados científicos, Meckbach participó en la creación de un instituto de investigación y enseñanza en Bariloche. Tenía las dotes del maestro que es capaz de generar vocaciones y demostró su capacidad para adaptarse a los cambios generacionales.

El premio en Ingeniería Electrónica de denomina "Juan Manuel Barcala", recordando al brillante ingeniero mecánico electricista y a sus valiosos aportes a la investigación y al desarrollo tecnológico. Fue profesor emérito de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata y miembro de la Academia de Ingeniería de la Provincia de Buenos Aires.

El premio en Ingeniería Geotécnica lleva el nombre de "Oreste Moretto", por quien fuera miembro de esta Academia desde 1967 hasta 1997 y su presidente entre 1988 y 1992. El Dr. Ing. Moretto supo desarrollar conocimientos de vanguardia en tres disciplinas muy importantes dentro de la ingeniería: la mecánica de suelos, la ingeniería de fundaciones y

las teorías y aplicaciones del hormigón armado.

El premio en Neuroquímica se denomina "Ranwel Caputto" en honor del distinguido bioquímico que fuera académico correspondiente en Córdoba desde 1971 a 1994. Fue uno de los más íntimos colaboradores de Luis Federico Leloir en sus primeros años. Establecido en esa ciudad, se destacó por sus contribuciones a la química biológica, la biofísica, la genética molecular y la biotecnología.

El premio en Química de Productos Naturales recibe el nombre de "Venancio Deulofeu". El Dr. Deulofeu fue miembro titular de nuestra Academia entre 1946 y 1984, y presidente de la misma entre 1972 y 1976. Es considerado como uno de los pioneros en nuestro medio en realizar investigaciones en química orgánica y, en particular, en estudiar metabolitos secundarios presentes en vegetales del país. Sus resultados trascendieron nuestras fronteras.

El premio en Geología Estructural recibe el nombre de "Horacio J. Harrington" en homenaje a quien fuera miembro titular de esta corporación entre 1950 y 1973. Incursionó en casi todos los campos de la geología, evidenciando una profundidad y erudición poco común. En paleontología fue sin dudas una autoridad mundial.

En esta oportunidad, y como lo venimos haciendo desde 1994, se entregará además el premio "Ernesto E. Galloni", homenajeando a quien fuera miembro titular durante 37 años y presidente entre 1968 y 1972. Su labor docente, de investigación, de organización y divulgador de la ciencia, le brindó en su momento un destacadísimo lugar en el quehacer académico-universitario nacional. Este año el tema elegido para el premio fue la Ingeniería Nuclear, y deseo aclarar que el premio consiste en un diploma y la suma de u\$s 1.000 sobre la base de una donación de la Sra. Nélida Pedretti de Galloni e hijos, realizada para ese propósito y destinada a investigadores de hasta 35 años de edad.

Por otro lado, nos sentimos muy complacidos en informar que por primera vez haremos entrega de certificados de becas para estudiantes de la Universidad de Buenos Aires en Matemática y en Ciencias Biológicas.

Dichas becas reciben el nombre genérico de "In libris carpe rosam" y los fondos para las mismas provienen de la donación de Marcelo G. y Paulo D. Barroso Mastronardi. Como mencioné, las becas serán en Matemática y en Ciencias Biológicas y son asignadas a los mejores estudiantes en esas especialidades, menores de 22 años al momento de iniciarla. Se otorgan por períodos no menores de 1 año y con una retribución anual de \$ 7.200.

Esperamos poder continuar en esta senda brindando mayores posibilidades para que jóvenes virtuosos puedan dedicarse exclusivamente a sus estudios.

En este momento deseo agradecer la labor de los jurados constituidos para discernir cada uno de los premios como las becas que acabo de indicar. Para todos ellos nuestro agradecimiento por la desinteresada tarea que avala el prestigio de estos resultados presentados.

Todos sabemos que la inteligencia, para ser fecunda, necesita moverse con libertad dentro del orden que ella misma crea y sustenta; necesita del diálogo; necesita de la comunicación para dar testimonio de su contribución al desarrollo de las ciencias en general. Pero sólo con esta libertad no basta. Ella es una condición necesaria pero no suficiente. Es imprescindible tener los medios necesarios para desarrollar las ideas que puedan surgir en el ambiente de libertad.

Un investigador debe tener además una profunda vocación para sobrellevar los inconvenientes que la falta de apoyo puede ocasionar. Eso lo sabemos por haberlo vivido durante décadas de actividad en este quehacer.

Hacer investigación científica en nuestro medio es, por lo común, una tarea difícil, y no lo es sólo por los inconvenientes propios de abrir caminos vírgenes o recorrer otros poco explorados. Esos inconvenientes son propios de toda actividad de investigación científica y comunes en todas las latitudes del globo. Sin embargo, en ciertos países, las posibilidades de poder trabajar desahogadamente se ven facilitadas por las condiciones económicas que los rodean.

A ese respecto, en nuestro medio siempre han habido inconvenientes -de regular a

marcada importancia-, pero estamos observando que en estos últimos años los mismos tienden a mejorar gracias a la acción de entidades públicas, que entendiendo el problema, están haciendo grandes esfuerzos para paliarlos. Esperemos que ese accionar siga progresando, independientemente del organismo responsable que actúe.

Al margen de esos problemas, nuestros premiados de hoy, y afortunadamente muchos otros investigadores, trabajaron y trabajan arduamente y continuarán haciendo ciencia para constituirse en modelos de los jóvenes que siguen sus pasos.

Para todos ellos, mis calurosas felicitaciones.

REDES DE ESTACIONES DE TRABAJO EN COMPUTACION PARALELA

Antonio A. Quijano

Centro de Técnicas Analógico-Digitales (CeTAD), Facultad de Ingeniería,
Universidad Nacional de La Plata.
Grupo de Investigación en Procesamiento Paralelo (GIPP), Dto. de Coordinación de Investigación y Desarrollo, Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA).
quijano@ing.unlp.edu.ar

Resumen

Dada la firme tendencia actual hacia el uso de la computación paralela para lograr mayor velocidad y productividad en el procesamiento de información, se intenta aquí exponer sobre los principales tipos de arquitecturas paralelas MIMD actuales, centrando la atención, en razón de su buena relación costo/performance, en los multicomputadores formados por un conjunto («cluster») de estaciones de trabajo interconectadas por una red. La intención es discutir sobre la influencia de la **heterogeneidad** de los mismos sobre sus prestaciones, y para llegar a ello es necesario analizar las expresiones de evaluación del «speedup» o sea el aumento de velocidad de procesamiento que se obtiene por paralelismo. Se hace referencia a las leyes de Amdahl y Gustafson, se comentan las definiciones de rendimiento y costo, y se alude al conjunto de factores limitativos (el «overhead»), con la decisiva influencia del sistema de interconexión. Se pasa luego a analizar la comunicación por pasaje de mensajes y los medios para su programación, exponiendo sobre las propiedades de los sistemas que, como *PVM* y *MPI* incluyen una librería de funciones que cumplen esa misión. Finalmente, se pasa a la discusión de la influencia de la **heterogeneidad** adaptando las expresiones de speedup para considerarla y se comentan resultados de dos tipos de experiencias que contraponen el comportamiento de sistemas poco y muy heterogéneos, extrayendo conclusiones y reconociendo el amplio campo de investigación que está abierto.

Palabras clave: computación paralela, multicomputadores, «clusters», «speedup», rendimiento, heterogeneidad.

Abstract

Parallel computing is now a very efficient way to obtain more speed for data processing. That is why we describe here the main types of MIMD architectures, to introduce the concept of the cluster of workstations (*COW*) or network of workstations

Trabajo presentado con motivo de la entrega del premio "Juan Manuel Barcala" en Ingeniería Electrónica, el 12 de noviembre de 1999.

(NOW), an important type of multicomputers with a very good cost/performance ratio. Our intention is to analyze the effects of heterogeneity as a serious drawback of network computing. To arrive at some conclusions we must review some well known metrics as speedup, efficiency and cost, considering also the discussions introduced by Amdahl and Gustafson, and the influence of the interconnection systems on the overhead of NOWs. We must also analyze the mechanism of message passing and its programming: *PVM* and *MPI* are briefly mentioned as specific systems providing a library of external functions for message passing. We arrive at last to heterogeneity effects and the adaptations it introduces on the previous metrics as speedup, including also an **heterogeneity metric**. Two types of experiences are described: one of them for a nearly homogeneous system with an «embarrassingly parallel problem», and the other for a very heterogeneous NOW with a matrix product benchmark. The important difference in behaviour is clearly seen and some conclusions are extracted, recognizing this very wide field open for research.

Key words: parallel computing, multicomputers, clusters, speedup, efficiency, heterogeneity.

1. Introducción

1.1. Generalidades

Es bien conocida la exigencia a que se ven permanentemente sometidos los proyectistas de sistemas de computación: lograr las mayores prestaciones en materia de velocidad de procesamiento y de productividad. Se pueden imaginar, en principio, tres maneras de llegar a ese objetivo:

- Usar «hardware» más rápido (problema tecnológico de realización física de los procesadores y demás subsistemas).

- Emplear los algoritmos más adecuados para acortar el tiempo de procesamiento (estudio siempre necesario desde el punto de vista del «software»).

- Repartir una tarea entre varios procesadores, o sea usar **paralelismo**.

La utilización del paralelismo para obtener mayor velocidad de tratamiento de la información en sistemas computadores, no es una idea reciente. Desde los primeros tiempos, los proyectistas pensaron en usar varios procesadores trabajando en forma simultánea para resolver un dado problema. Sin embargo, restricciones propias del costo de la tecnología impusieron durante años el empleo de la primera de las soluciones mencionadas, o sea el perfeccionamiento de un único procesador usado secuencialmente. Los desarrollos tecnológicos debidos al ex-

plosivo progreso de la Microelectrónica, produjeron un componente fundamental, el **microprocesador**, de costo cada vez menor y rendimiento creciente en términos de disminución del tiempo de procesamiento, de la cantidad de datos tratados, y de la confiabilidad. De este modo, al disponerse de estos dispositivos mediante baja inversión de recursos, pareció natural volver a pensar en las **arquitecturas de multiprocesamiento**, asociando varios procesadores para el cumplimiento de una misión.

1.2. Multiprocesadores y multicomputadores

No pretendemos aquí describir en detalle las múltiples formas en que se pueden generar arquitecturas paralelas. La muy conocida **clasificación de Flynn** [11, 02, 07, 08, 22] (a veces discutida pero simple y útil para fijar ideas) considera, entre otros, el modelo que se ha llamado **MIMD** (Multiple Instruction Stream, Multiple Data Stream), y cubre diversos esquemas de interconexión, procesadores y arquitecturas. El punto clave es que cada procesador opera independientemente de los otros, potencialmente ejecutando programas que podrían ser enteramente diferentes, y comunicándose ya sea mediante memoria compartida con los demás, o a través de una red de alta velocidad. Dado que

los procesadores no operan necesariamente en sincronismo, es esa comunicación la que les permite compartir datos y sincronizar cálculos en un dado instante. Es decir, que en este caso aparece, como rasgo característico de la computación paralela, la existencia de **cálculo** por una parte, y de **comunicación** por otra; y según la relación de tiempos que los mismos ocupen en un dado proceso, van a determinar, en gran medida, la velocidad de procesamiento. Esto que se acaba de afirmar, determina también que existan dos tipos fundamentales de sistemas MIMD [08, 22, 26]:

- Los sistemas de **memoria compartida**, o **fuertemente acoplados**, también llamados **multiprocesadores** propiamente dichos [06, 08].

- Los sistemas de **memoria distribuida**, o **débilmente acoplados**, también llamados **multicomputadores** [08].

En la Figura 1 se puede observar la diferencia conceptual entre ellos. La red de interconexión para el caso de memoria compartida, Figura 1(a), permite que todos los procesadores se conecten a dicha memoria. Si dos o más de ellos pretenden tener acceso a una misma parte de ésta al mismo tiempo, deberá usarse alguna forma de arbitraje para asegurar que sólo uno de dichos procesadores lo haga en ese momento. Este problema de «contienda» (contention) puede restringir el número de procesadores que pueden interconectarse usando este modelo.

La red de interconexión del sistema de memoria distribuida, Figura 1(b), donde cada procesador dispone de una memoria local (siendo de este modo un **computa-**

dor), realiza su misión mediante «**pasaje de mensajes**». Es decir, que si dos de ellos necesitan comunicarse entre sí, uno para emitir datos y el otro para recibirlos, se establece un mensaje por medio de las primitivas de transmisión (**send**) y de recepción (**receive**) según un cierto protocolo. No hay, entonces, contienda de memoria, pero la red de interconexión, según su topología, puede llegar a limitar el número de comunicaciones realizables según la densidad de los mensajes necesarios.

1.3. Tipos principales con memoria compartida

Los dos modelos SIMD a que se ha hecho referencia, dan lugar a una apreciable cantidad de variantes designadas con nombres y siglas que en la bibliografía resultan bastante confusos, por lo cual, para aclarar a cuál de ellas nos referiremos especialmente en este artículo, hemos de tratar de exponer brevemente las alternativas más importantes. Si partimos del caso de **memoria compartida**, hay dos tipos muy significativos, que son los generalmente empleados por las empresas fabricantes:

- **Multiprocesadores Simétricos (SMP, Symmetric Multiprocessors)** [22, 06]: Dos o más procesadores similares comparten la misma memoria principal y el acceso a los dispositivos de entrada/salida (I/O). Todos pueden realizar las **mismas funciones**, y poseen el mismo tiempo de acceso a las distintas regiones de la memoria (**UMA, Uniform Memory Access**). La red de interconexión puede ser tan simple como un **bus**,

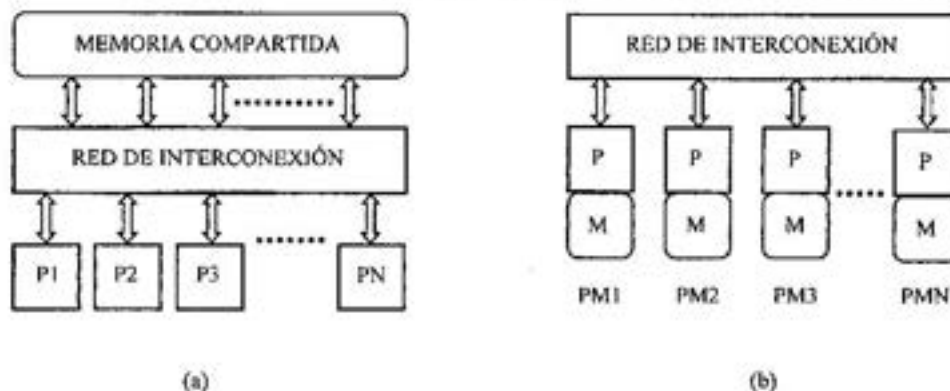


Fig. 1. Tipos de sistemas MIMD: (a) Memoria compartida - (b) Memoria distribuida.

o tan compleja como una llave «crossbar» [07]. La comunicación y cooperación entre procesadores es fuertemente acoplada y se realiza por medio de variables compartidas; los conflictos por el uso de estas últimas y de la red de interconexión ponen un límite al número total de procesadores, generalmente entre 16 y 64.

• **Multiprocesadores de Acceso a Memoria No Uniforme (NUMA, Nonuniform Memory Access):** A diferencia de los SMP, que tienen, como se ha dicho, acceso a memoria **uniforme**, estos sistemas tienen una memoria **físicamente** distribuida entre los procesadores, pero manteniendo un espacio **global** de direcciones. Es decir, que sigue siendo compartida, pero el tiempo de acceso va a ser distinto si la dirección de memoria requerida es local o es remota con respecto al procesador que la solicita. En el caso de que sea remota, se requerirá una comunicación a través de la red de interconexión, determinando un mayor tiempo de acceso.

En la Figura 2 se observa en forma muy simplificada la organización de un NUMA, que consta de varios **nodos** independientes, cada uno de los cuales es, en verdad, un **SMP** compuesto de muchos procesadores con sus respectivas memorias caché, y de la memoria principal del nodo. Cuando un procesador emite una dirección, si la información no está en la respectiva caché, se inicia un acceso a la memoria global; si la dirección corresponde a la memoria del propio nodo, hay un rápido acceso **local** a través del bus del nodo. En cambio, si es reconocida como **remota**, o sea ubicada en la memoria de otro nodo, se inicia automáticamente un pedido al mismo por intermedio de la red de interconexión, hay un acceso a esa memoria remota, y la información resultante se transfiere hacia el nodo que la solicitó inicialmente, con destino a la caché y el procesador respectivo. Las memorias caché, generalmente en dos niveles (en la Fig. 2 sólo se muestra uno, por simplicidad), son fundamentales para

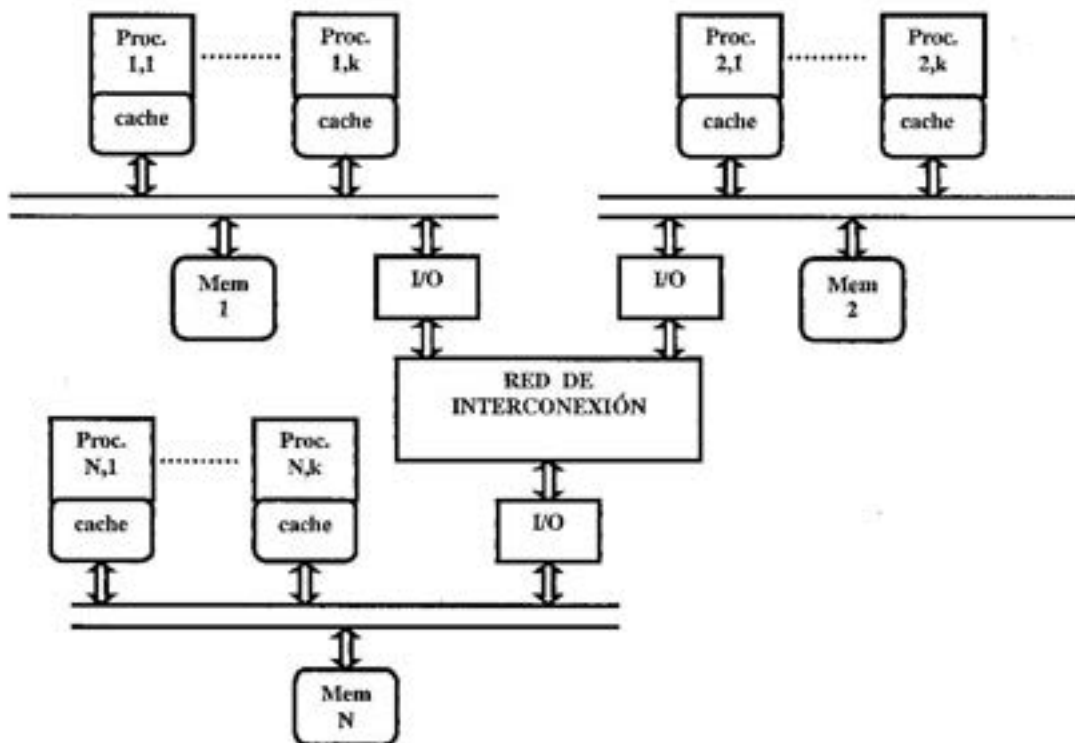


Fig. 2. Principio del Sistema NUMA.

disminuir, por el conocido principio de localidad, todos los accesos a memoria principal, incluyendo los de tipo remoto que son los que pueden degradar más las prestaciones del sistema. Es fundamental, en este como en otros casos de multiprocesamiento, mantener la **coherencia** [19, 22] de dichas cachés: cuando un procesador altera un dato en su caché, un protocolo debe asegurar que otros procesadores obtengan dicho dato modificado si hacen referencia a él. Por eso, en la literatura comercial se designa a los actuales NUMA como «cache-coherent NUMA» (ccNUMA), para significar que la coherencia es mantenida entre las cachés de los distintos procesadores.

Comparados con los sistemas SMP, los ccNUMA llevan a una mejor «**escalabilidad**», en el sentido de que es posible emplear un mayor número de procesadores en paralelo para incrementar las prestaciones de velocidad de procesamiento (escalabilidad de arquitectura), o bien hacerlo frente a un aumento del «tamaño» (número de elementos de datos) del problema, mediante un bajo incremento de los pasos de computación (escalabilidad algorítmica) [26].

1.4. Los «clusters» [03, 04, 05]

Pasando ahora a los multicomputadores o sistemas de memoria distribuida caracterizados por la comunicación mediante pasaje de mensajes, se han introducido muchas variantes alrededor del concepto central de cada computador que tiene su memoria local con su propio espacio de direcciones no accesible a los demás. Como ya hemos dicho, son muy importantes las características de la red de interconexión y su topología con diferentes grados de conectividad, existiendo muchos ejemplos (conectividad total, hipercubos, mallas, etc.). Pero hay un caso de creciente importancia, al cual deseamos referirnos especialmente aquí, y es el de los computadores interconectados mediante una red (muchas veces una red de área local, LAN), que han conducido a concretar su utilización como un recurso de computación paralela.

Dadas las cada vez mayores prestaciones de las denominadas «**estaciones de trabajo**» (**workstations**) y también de las PCs, unidas a su bajo precio, son muchas las ventajas de constituir **redes de estaciones de trabajo** (*networks of workstations, NOW*) que también son designadas **racimos o grupos de estaciones de trabajo** (*clusters of workstations, COW*), o abreviando, simplemente «**clusters**». Con este concepto se puede ir aún más lejos, llegando a sistemas distribuidos en los cuales la red conecta tipos diferentes de computadores en cuanto a arquitectura y sistema operativo, pudiendo tener muy distintas capacidades de cómputo, desde simples PCs y estaciones de trabajo hasta poderosos SMPs que ya son de por sí sistemas paralelos. También se puede pensar en extender aun más el sistema, no limitándose a una sola LAN sino vinculando varias entre sí y alcanzando un mayor nivel de «clustering».

De todo este panorama ciertamente muy vasto, se destaca ciertamente el caso de los **COW** (o **NOW**, pues consideraremos ambas siglas indistintamente), no limitado exclusivamente a estaciones de trabajo, sino incluyendo eventualmente también PCs cuyas prestaciones resultan actualmente comparables a las de aquéllas. Simplificando algo los conceptos, podríamos decir que la computación paralela se concreta actualmente en los siguientes dos tipos de organización:

- Sistemas paralelos especialmente proyectados, construidos y vendidos por los fabricantes especializados. Ellos tienen organizaciones tales como SMP o ccNUMA, a los cuales se pueden agregar los «**clusters de SMPs**» (llamados **CLUMPs** para complicar un poco más la terminología y las siglas). Entre estos sistemas, muchos pueden considerarse dentro de la clase de los «**supercomputadores**», y se caracterizan por su **alto costo** de diseño y desarrollo, que lleva a un constantemente elevado precio de venta.

- Los mencionados **COW** o **NOW** que, tal vez no llegan a las altas prestaciones de los anteriores, pero presentan ciertas ventajas importantes:

- Costo muy bajo para las estaciones de trabajo y las PCs, que son productos normales de la industria y se perfeccionan constantemente para alcanzar mayor rendimiento. Su «performance» se ha incrementado notablemente en los últimos años, llegando a duplicarse cada 18 a 24 meses.

- Es posible incorporar al sistema los más recientes y avanzados procesadores a medida que van apareciendo.

- Los sistemas de interconexión entre los computadores mejoran a medida que se introducen nuevas tecnologías de redes y protocolos para las LAN.

- Los COW se incorporan a redes pre-existentes con mayor facilidad que los computadores paralelos especiales.

- Pueden, además, construirse sin dificultades, ya que es fácil agregar a un nodo nuevos procesadores o memoria adicional.

Aquí centraremos principalmente la atención en los NOW, COW, que se han establecido aprovechando computadores preexistentes y redes establecidas de bajo costo, generalmente Ethernet. Es el caso más accesible para las universidades o pequeñas empresas, por no involucrar casi gastos adicionales de instalación. Sin embargo, en ellos se hacen notar problemas que pueden ser de importancia, y deben tenerse muy en cuenta:

- La posible *heterogeneidad* entre las estaciones de trabajo (hardware diferente, distintos sistemas operativos, formatos de datos no directamente compatibles, etc.

- Uso *no dedicado* de tales estaciones de trabajo: es decir, que quienes pretenden hacer cómputo paralelo con ellas, deberán compartir el tiempo de las mismas con otros usuarios que se dedican a tareas diferentes.

En la Figura 3 se ha representado un caso de red de área local (LAN) de características heterogéneas, no sólo en lo que se refiere a los diferentes tipos de computadores de distinta fabricación, con procesadores y arquitecturas disímiles, sino también en lo que respecta a sus respectivos

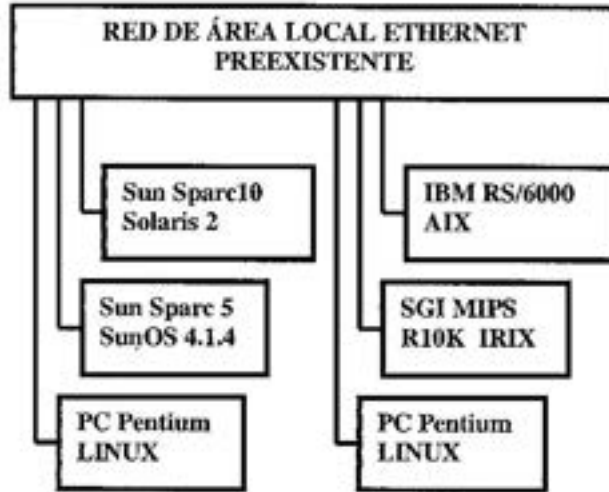


Fig. 3. Un cluster de estaciones de trabajo formado con «hardware» preexistente.

sistemas operativos, que en este caso son distintas variantes del sistema UNIX. En cuanto a la red Ethernet, se puede suponer que es la más utilizada, correspondiente al protocolo normalizado IEEE 802.3; dada su capacidad de transmisión, se la conoce generalmente como Ethernet de 10 Mb/s, aunque existe otra más rápida, de 100 Mb/s. Una red Ethernet se comporta como un bus, y transfiere de modo tal que sólo una estación de trabajo puede emitir en un momento dado, haciendo uso del único canal de comunicaciones. En cambio, pueden existir múltiples receptores (Figura 4). La forma más común de conexión a Ethernet en la actualidad es el cable de par trenzado mediante el uso de dispositivos de comunicaciones como los hubs (repetidores y concentradores) y los switches que separan comunicaciones rápidas punto a punto.

Volviendo a la Figura 3.- hacemos nuevamente notar que, si los computadores fuesen todos de la misma arquitectura y sistema operativo, estaríamos en presencia de una red homogénea que, si además estuviera *exclusivamente* dedicada a computación paralela, tendría posibilidades de mejor rendimiento que la heterogénea.

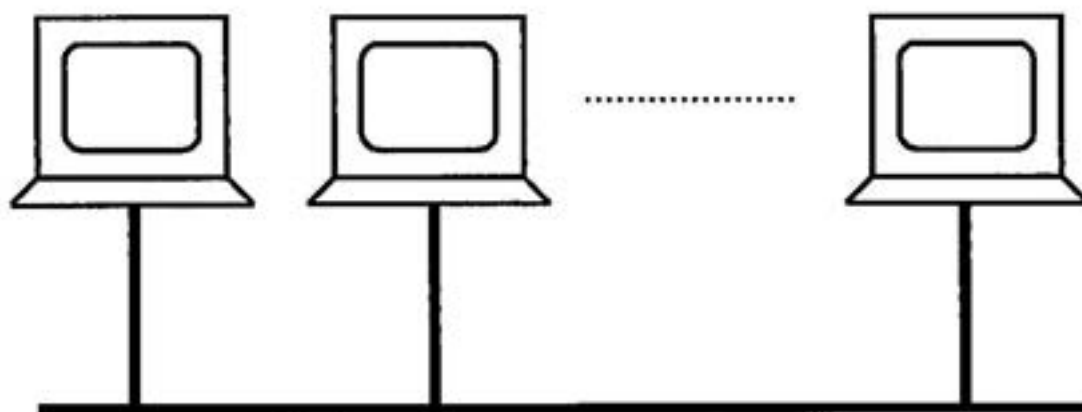


Fig. 4. Conexión de computadores a Ethernet.

2. Evaluación de performance en los sistemas paralelos

2.1. Definiciones importantes válidas para todos los sistemas paralelos

● **Granularidad:** Puede definirse como la magnitud de las operaciones de computación realizadas entre operaciones de comunicación. En el caso de grano grueso, cada proceso contiene muchas instrucciones secuenciales y necesita un tiempo apreciable para ejecutarse. Si se trata de grano fino, un proceso comprende pocas o sólo una instrucción. Como se comprende, la granularidad es importante pues determina la división del procesamiento en procesos que puedan ejecutarse simultáneamente. En general, en los clusters se incrementa el grano para disminuir la incidencia de la creación de procesos y la comunicación entre ellos; pero esto reduce el número de procesos concurrentes y el paralelismo que se puede lograr. Es por ello necesario adoptar soluciones de compromiso [02, 26].

● **Relación cómputo/comunicación = Tiempo de Cómputo / Tiempo de Comunicación:** Puede ser interpretada como una métrica de granularidad. Se la debe incrementar en lo posible, para disminuir la incidencia del tiempo de comunicación, que en los COW puede ser muy signi-

ficativo; pero se debe mantener un grado adecuado de paralelismo [26].

● **Aumento de velocidad obtenible por paralelismo («speedup») S** [02, 07, 08, 26]: En general, si T_s es el tiempo de ejecución secuencial sobre un único procesador, y T_p el obtenido con p procesadores en paralelo, se tiene:

$$S(p) = \frac{T_s}{T_p} \quad (1)$$

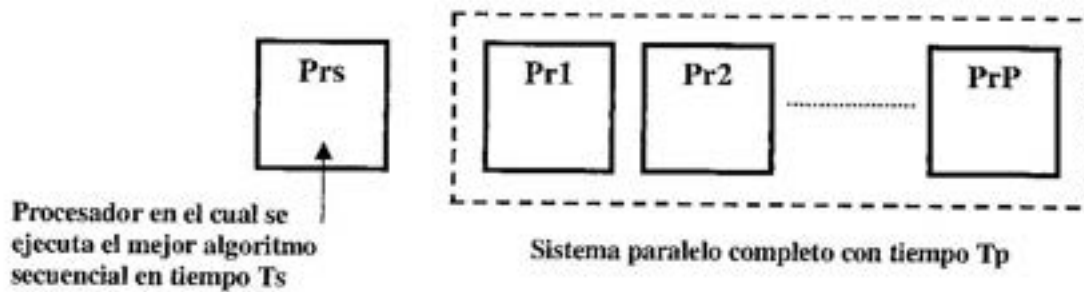
En realidad, se pueden imaginar dos maneras de considerar el tiempo secuencial sobre un procesador. En una de ellas se utiliza el mejor algoritmo existente para resolver el problema sobre un único procesador separado del sistema multiprocesador, con el tiempo T_s , Figura 5 (a).

$$S_a(p) = \frac{T_s}{T_p} \quad (2)$$

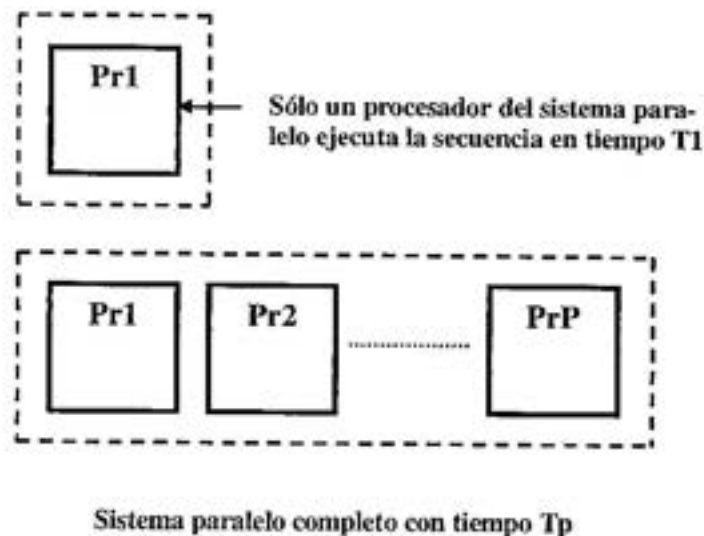
En la otra, Figura 5 (b), se opera sobre el propio sistema multiprocesador, pero utilizando uno solo de sus procesadores, y se obtiene un tiempo que llamaremos T_1 :

$$S_r(p) = \frac{T_1}{T_p} \quad (3)$$

En el primer caso se suele hablar de *speedup absoluto*, y en el segundo de



(a)



(b)

Fig. 5. Determinación del tiempo paralelo T_p y los secuenciales: (a) T_s ; (b) T_1 .

speedup relativo. Este último puede tener una relación bastante estrecha con el concepto de escalabilidad al cual volveremos más adelante.

• **Crecimiento máximo teórico del «speedup»:** Considerando la definición absoluta $S_a(p)$, podemos decir que existe la siguiente limitación: Para cada p , se debe cumplir que

$$1 \leq S_r(p) \leq p \quad (4)$$

lo cual significa que a lo sumo hay un crecimiento lineal del speedup con p . Hay que considerar que, como un computador para-

lelo puede usarse con sólo un procesador, el tiempo de ejecución con p es a lo sumo igual al tiempo secuencial. Viceversa, un único procesador puede simular a un multiprocesador de la siguiente manera: para cada unidad de tiempo de este último, el monoprocesador usa p unidades de tiempo para simular la ejecución por parte de cada uno de los procesadores del otro sistema.

2.2. Otras limitaciones del «speedup»

• **La Ley de Amdahl** [1, 2, 7, 8, 12, 16, 26]: En todo programa real con posibilidad de ejecutarse en paralelo, sería muy

difícil que todo el código fuese paralelizable; se encontrará que una parte del mismo es intrínsecamente secuencial, y llamaremos **Seq** a la fracción del tiempo total que un monoprocesador emplearía para ejecutarla. El resto del tiempo, que denominamos **Par**, es lo que se emplearía secuencialmente con el mismo procesador, aun cuando correspondiera a lo que se puede paralelizar. Siendo ambas fracciones, debe cumplirse que:

$$S_{eq} + P_{ar} = 1 \quad (5)$$

Si ahora calculamos el «speedup», el tiempo secuencial para un procesador será $S_{eq} + P_{ar}$ y el tiempo para p procesadores en paralelo, será: $S_{eq} + (P_{ar} / p)$ Finalmente, obtenemos:

$$S_s(p) = \frac{S_{eq} + P_{ar}}{S_{eq} + \frac{P_{ar}}{p}} = \frac{1}{S_{eq} + \frac{P_{ar}}{p}} \leq \frac{1}{S_{eq}} \quad (6)$$

y por lo tanto el aumento de velocidad es, cualquiera sea el valor de p , menor que la proporción de código secuencial. Por ejemplo, si el 50% del programa es secuencial, el speedup es menor que 2; si es del 10%, resulta menor que 10, y si sólo fuese el 1%, quedaría acotado en 100, independientemente del número de procesadores empleados. Esta circunstancia es conocida como *Ley de Amdahl* (1967) [1], y expresa el hecho de que el aumento de velocidad está limitado por una constante independiente del número de procesadores y la organización del sistema. Esta conclusión ciertamente deprimente fue usada por Amdahl para abogar en favor del perfeccionamiento de sistemas monoprocesadores frente a los de tipo paralelo, o limitar estos últimos a unos pocos procesadores.

• **Una oportuna discusión - La Ley de Gustafson:** Pese a lo previsto por Amdahl, al final de la década de los años '80 se produjeron sistemas con centenares de procesadores que pusieron de manifiesto considerables aumentos de las prestaciones. Gustafson [15] estudió esta paradoja y formuló otro punto de vista interesante. Existen importantes casos cuyo tiempo de eje-

cución aumenta con el «tamaño» de la instancia del problema considerado, y en la práctica una mayor cantidad de procesadores en paralelo permite que un problema «más grande» sea resuelto en un tiempo razonable; es decir que el «tamaño» del problema no es independiente del número de procesadores. En los sistemas de memoria compartida, en que ésta tenga la dimensión necesaria, diversas instancias de un problema podrán ser resueltas, y podría decirse (tal vez un poco a la ligera) que para ellos se aplica la ley de Amdahl. Esto no rige para los sistemas de memoria distribuida: son usados ciertamente para obtener mayor velocidad en el tratamiento de un problema, pero también (y muy especialmente) para resolver problemas de mayor magnitud. Comparemos entonces el comportamiento de los algoritmos para las instancias de máximo tamaño, teniendo en cuenta que con p procesadores la memoria de un multicomputador será p veces mayor. Gustafson parte de la idea de que, a diferencia de Amdahl, no se debe considerar fijo el tamaño del problema, sino el tiempo de ejecución paralela. Supongamos que ejecutamos nuestro problema de máximo tamaño con un algoritmo adecuado para los p procesadores: el tiempo de ejecución será

$$S_{eq} + P_{ar} = 1 \quad (7)$$

ya que todos los procesadores trabajan simultáneamente. En cambio, su tiempo secuencial ha de ser:

$$T_s = S_{eq} + p.P_{ar} \quad (8)$$

en razón de que las p partes paralelizables deben ser ejecutadas secuencialmente. Con ello, Gustafson llega a su ley, que se refiere al factor de «speedup escalable», que aquí llamaremos $S_g(p)$:

$$S_g(p) = \frac{S_{eq} + p.P_{ar}}{S_{eq} + P_{ar}} = S_{eq} + p.P_{ar} \geq p.P_{ar} \quad (9)$$

Es decir, que el aumento de velocidad está limitado por debajo, por una expresión que

se incrementa linealmente con p . Si el 50% del programa es secuencial, dicho aumento es mayor que $0,5p$; si es el 10%, se hace mayor que $0,9p$; y si es el 1%, resulta mayor que $0,99p$. También se puede dar la siguiente forma a la ecuación, si se toma $Par = 1 - Seq$ y se reemplaza en la anterior:

$$S_g(p) = S_{eq} + p(1 - S_{eq}) = p + (1 - p)S_{eq} \quad (10)$$

Para valores pequeños de Seq , esta función se aproxima a p ; por ejemplo, si tuviéramos $Seq=0,1$, y $p=20$, obtendríamos $S_g(20)=18,1$. En cambio, si calculamos de acuerdo a Amdahl, para los mismos valores resultaría $S_a(20)=6,89$. Obviamente, es necesario tener en cuenta las diferentes suposiciones para uno y otro caso.

2.3. La situación real del «speedup»

Las observaciones de Amdahl y de Gustafson sólo toman en cuenta la inevitable existencia de una cierta dosis de computación secuencial durante la operación de un sistema paralelo; es obvio que ello tiene que ocurrir, por ejemplo, durante lapsos en que sólo funciona uno de los procesadores para preparar la puesta en marcha de los otros en paralelo. Con esta sola visión limitativa, el aumento de velocidad no tiene pendiente negativa cuando crece p : según Gustafson seguirá de cerca dicho crecimiento favoreciendo la escalabilidad; y según Amdahl dicho speedup crecerá para quedar acotado en el valor $1/Seq$.

En la realidad existen factores adicionales (que la literatura en inglés determina en conjunto como «overhead») y que limitan notoriamente el speedup, haciendo que el crecimiento de éste con p pase a tener pendiente negativa a partir de cierto valor que podríamos considerar como el número óptimo de procesadores P_{opt} en paralelo para un dado problema. Las razones principales del «overhead» son las siguientes, aun cuando, algo más adelante volveremos sobre este problema:

- En un sistema paralelo pueden aparecer períodos durante los cuales no to-

dos los procesadores están haciendo tarea útil, sino que se encuentran inactivos, ociosos. Ello no ocurre porque no haya más trabajo por hacer, sino porque existen ciertas circunstancias que impiden que tales procesadores puedan activarse. Esto incluye la ya nombrada situación en que sólo un procesador está ocupado en las partes inherentemente secuenciales del programa [12].

- Otra causa de «overhead» puede atribuirse al desbalance de la carga de cómputo entre los procesadores.

- También suele haber replicación en la computación paralela que no aparece en la secuencial, como puede ser el caso de recálculo local de constantes.

- El inevitable tiempo de comunicación necesario para el pasaje de mensajes, refiriéndonos ya, de aquí en adelante, a los multicomputadores de memoria distribuida.

2.4. Otras métricas importantes a definir

Antes de seguir adelante, hemos de introducir los dos siguientes conceptos que son útiles en relación con los algoritmos para computación paralela [16]:

- **Rendimiento** («efficiency» E): Teniendo en cuenta la expresión general del «speedup» dada en 2.1 y sin distinguir entre sus variantes absoluta y relativa, se suele dar la siguiente definición:

$$E = \frac{S(p)}{p} \times 100\% \quad (11)$$

Este rendimiento nos da una idea acerca del tiempo en que los procesadores están activos en su trabajo de computación. Si $E = 50\%$, ellos estarían en uso, en promedio, la mitad del tiempo dedicado al problema. Es evidente que, si $E = 100\%$, todos los procesadores estarían usados todo el tiempo, y sería $S(p) = p$, o sea el caso lineal ideal aludido en 2.1.

- **Costo:** Este es un concepto a veces usado para la comparación de algoritmos paralelos, y se define de la siguiente manera:

$$Cost = T_p \times p \quad (12)$$

O sea el tiempo de ejecución paralela multiplicado por el número de procesadores utilizados. Recordando que:

$$T_p = \frac{T_s}{S(p)} \quad (13)$$

resulta:

$$Cost = \frac{T_s \cdot p}{S(p)} = \frac{T_s}{E} \quad (14)$$

El costo de una computación secuencial es su tiempo de ejecución T_s . Y se suele decir que un algoritmo paralelo **óptimo en costo** es aquel en el cual el costo para resolver el problema en paralelo es proporcional al costo con el monoprocesador.

• **Tamaño del problema y «overhead» (revisión en base a conceptos recién mencionados):** Hasta ahora hemos empleado la noción de *Tamaño del Problema* de una manera algo informal, en relación con el número de datos de entrada. Una definición más consistente sería expresarlo en términos del número total de operaciones básicas que requiera la solución del problema. Para hacerlo unívocamente para un dado problema diremos que el *Tamaño del mismo es el número de pasos básicos que se requieren para resolverlo en un monoprocesador usando el mejor algoritmo secuencial*. Y si suponemos que un paso básico de computación de este algoritmo se realiza en una unidad de tiempo, el tamaño del problema, que llamaremos N coincidiría numéricamente con el tiempo T_s del mencionado mejor algoritmo secuencial. Hemos dicho, además, que los sistemas paralelos de p procesadores no pueden alcanzar el rendimiento de 100% o el aumento de velocidad igual a p , debido a la existencia de circunstancias adicionales que constituyen el «overhead». Definiremos como *función de overhead* de un sistema paralelo, a la parte de su *costo* que no proviene del mejor algoritmo secuencial ejecutado en un monoprocesador. Esta función, a la que llamaremos F_o , depende de N y de p , y generalmente se alude a ella como

$$F_o(N, p)$$

El costo de solución de un problema de tamaño N en p procesadores, es $p \cdot T_p$ como ya se ha dicho. N unidades de este tiempo se emplean en hacer trabajo útil, y el resto es «overhead» F_o . Es decir:

$$F_o = p \cdot T_p - N = \frac{T_s}{E} - N \quad (15)$$

2.5. La influencia de las comunicaciones en el «overhead» [12, 26]:

Para el caso de los sistemas que se comunican por pasaje de mensajes, como sucede en los COW que son de nuestro interés, el tiempo necesario para ello debe ser considerado en el tiempo completo de ejecución del problema. Introduciremos la siguiente notación:

T_{comm} : tiempo de pasaje de un mensaje

t_s : tiempo de envío de un mensaje sin datos; llamado también tiempo de «latencia»

t_w : tiempo de envío de una palabra de datos (su inversa $1/t_w$ es el ancho de banda)

n : número de palabras de datos en el mensaje

Para una primera aproximación, podemos introducir la siguiente ecuación:

$$T_{comm} = t_s + t_w \cdot n \quad (16)$$

Los parámetros que entran en esta expresión (Fig. 6), son enteramente dependientes de la tecnología usada, y si nos restringimos a algunos pocos casos citados por Foster [12], encontraremos grandes discrepancias. Por ejemplo, una red Ethernet común, muy usada para las LANs, y que sería la interconexión casi de rigor para los COW que son de nuestro máximo interés, tendría los siguientes valores de los parámetros:

$$t_s = 1500 \text{ } \mu\text{seg} \quad t_w = 5,0 \text{ } \mu\text{seg} / \text{palabra}$$

Para otra tecnología algo más avanzada (FDDI), resulta:

$$t_s = 1150 \text{ } \mu\text{seg} \quad t_w = 1,1 \text{ } \mu\text{seg} / \text{palabra}$$

(En estos dos casos se usaron estaciones de trabajo SUN Sparc)

Y tomando sistemas diseñados ad hoc, como el IBM SP2, con red de interconexión de características especiales, se obtuvo:

$$t_s = 40 \mu\text{seg} \quad t_w = 0,11 \mu\text{seg} / \text{palabra}$$

Se puede observar la notable diferencia entre este último caso y los anteriores, que son los que mejor se prestan para laboratorios universitarios en razón de su bajo precio y su preexistencia (sobre todo el primero), en las redes locales que se intenten usar como clusters de estaciones de trabajo en paralelo.

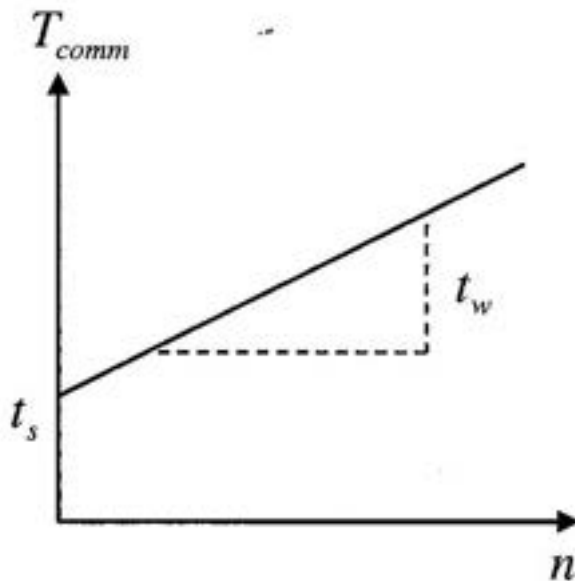


Fig. 6. Comunicación de un mensaje.

3. El pasaje de mensajes

Un sistema multicomputador con comunicación y sincronismo por medio de pasaje de mensajes debe reunir ciertas características especiales en lo que se refiere a su programación. Siguiendo las reflexiones de Foster [12], Wilkinson y Allen [26], podemos decir que esta tarea se puede encarar de las tres siguientes maneras:

- Diseñar un lenguaje especial para programación paralela. El único caso conocido es el lenguaje OCCAM, que fue introducido precisamente para el *transputer*, un

procesador basado en pasaje de mensajes (Inmos) con características de mucho interés.

- Crear extensiones a lenguajes existentes de alto nivel, a fin de que con ellos se pueda hacer pasaje de mensajes. Dos de estos casos son FORTRAN M y CC++ (una pequeña extensión a C++), [12].

- Utilizar un lenguaje existente de alto nivel y constituir una librería de funciones externas para pasaje de mensajes.

La última de estas tres opciones es la más utilizada en el caso de nuestro interés, que es el de las redes de estaciones de trabajo. A un lenguaje normal de alto nivel como el C se le pasan llamados a esas funciones de librería que hacen el pasaje de mensajes entre procesos.

Esa forma de operar depende de:

- La creación de procesos separados que deben ejecutarse en distintos procesadores.

- La manera de transmitir y recibir mensajes.

3.1. Métodos para crear procesos

Existen dos: el *método estático* y el *método dinámico*; en el primero, todos los procesos se especifican antes de la ejecución: el programador los predetermina por acciones de la línea de comando. Hay también variantes según las características de los procesos; por ejemplo, es común que haya un proceso que controla a los demás y se llama «master», siendo los otros los «esclavos». En la estructura llamada *SPMD* (de «single program multiple data»), los diferentes procesos se mezclan en un solo programa, que es el mismo para todos los procesadores. Dicho programa posee sentencias de control que se encargan de seleccionar las partes que le corresponden a cada proceso. Es decir, que es necesario compilar el programa para obtener el código ejecutable para cada procesador: si el sistema fuese *homogéneo*, bastaría con una única compilación y el ejecutable se cargaría en todos los procesadores. En cambio, si fuese *heterogéneo*, habría que compilar separadamente para cada arquitectura existente en la red.

El método dinámico determina que los procesos pueden crearse durante la ejecución de otros procesos que ya están en marcha. Ello puede hacerse, por ejemplo, mediante llamados específicos a la librería de funciones antes aludida. Un ejemplo típico de llamado para crear un proceso podría tener el aspecto siguiente:

spawn(nombre_del_proceso);

La palabra «**spawn**» que significa generar, reproducir, es característica de **PVM**, que es un importante sistema que crea una biblioteca para pasaje de mensajes. El nuevo proceso creado por **spawn** es necesariamente un programa que se ha compilado y hecho ejecutable previamente.

Realmente, el método dinámico es un poderoso recurso, pero tiene el inconveniente, comparado con el método estático, de determinar un notorio «overhead» con la generación de los procesos.

3.2. Transmisión y recepción de mensajes

Como todas las funciones de librería, las de transmisión y recepción requieren ciertos parámetros, por lo cual tendrán la forma general siguiente:

send(lista_parámetros)
recv(lista_parámetros)

Los parámetros más simples para este caso, serían el destino y el mensaje en **send()**, y la fuente y ubicación del mensaje a recibir, en **recv()**. Si consideramos un programa en lenguaje C, podría resultar:

send(&w,ident_destino);

en el proceso emisor; y también

recv(&z,ident_fuente);

en el proceso receptor. Todo ello para enviar el dato **w** desde el proceso fuente hacia **z** en el proceso destino. Por supuesto, esta es una explicación muy elemental, y en un caso real, la complejidad de los mensajes puede ser mucho mayor que en este caso de un solo elemento. Por ejemplo, es normal que de al-

gún modo se indique que la recepción sólo pueda aceptar mensajes de un determinado tipo y no cualquiera; para ello se usan los rótulos («tags»), de la siguiente forma:

send(&w, 2, 4);

en el proceso emisor; y

recv(&z, 1, 4);

en el proceso destino. Esto significa que se envía el mensaje **w** con el «tag» **4** desde el proceso fuente **1**, hasta el proceso destino **2** donde será asignado a **z**.

Las funciones **send** y **recv** corresponden al envío de mensajes «punto a punto», pero en las librerías que estamos comentando existen otras que son las de comunicación «colectiva». Genéricamente podemos nombrar algunas de ellas, sin detallar sus parámetros:

bcast(); desde un dado proceso, envía un mismo dato a otros procesos de un cierto grupo

scatter(); desde un dado proceso, envía componentes de un arreglo de datos a otros procesos

gather(); envía un dato de cada uno de varios procesos, para formar un arreglo en otro.

4. Sistemas para programación paralela de clusters

Hemos expuesto algunas ideas elementales acerca del pasaje de mensajes aplicado a las redes de estaciones de trabajo. Sin entrar en detalles que pueden ser consultados en la bibliografía, mencionaremos aquí la existencia de dos sistemas de software, entre varios, que tienen amplia aceptación para la programación de dichos clusters. Ellos son:

• **PVM (Parallel Virtual Machine)** [13], ha sido el primer sistema que provee un verdadero ambiente de software para pasaje de mensajes entre computadores homogéneos o heterogéneos y posee una librería de rutinas para programas en C y en FORTRAN. Fué desarrollado en los Estados Unidos por Oak Ridge National Laborato-

ries y la Universidad de Tennessee a partir de 1989, siendo accesible en forma gratuita a través de <http://www.netlib.org/pvm3>.

● **MPI (Message Passing Interface)** [17, 14, 18, 21], es una norma para pasaje de mensajes que ha sido elaborada por investigadores académicos y de la industria, que constituyeron un grupo de alrededor de 80 personas provenientes de 40 organizaciones, principalmente de los Estados Unidos y Europa. La norma define la sintaxis y la semántica de un núcleo de más de un centenar de rutinas de librería aplicables en lenguaje C o en FORTRAN 77. En la siguiente dirección de Internet: <http://www.mcs.anl.gov/mpi>, hay amplias referencias sobre dicha norma. Existen varias implementaciones de la misma, algunas de las cuales son propiedad de empresas. Pero hay otras de dominio público, entre las cuales podemos mencionar *LAM* (de Ohio State University y Notre Dame University) y *MPICH*, de amplia aceptación, elaborada por Argonne National Laboratory, también de los Estados Unidos.

En lo que sigue, se dan algunas breves consideraciones sobre ambos sistemas.

4.1. Nociones básicas sobre PVM

Este sistema se compone de dos elementos principales:

● Un «dæmon» (demonio), es decir, un proceso en UNIX que no tiene relación con la terminal, y corre en segundo plano, esperando pedidos y respondiendo a los mismos. Este proceso, llamado *pvm3d*, está encargado de controlar el funcionamiento de los procesos de usuario en la aplicación, y de coordinar las comunicaciones. Cada uno de los computadores que ha de configurar la «máquina paralela virtual» debe tener un *pvm3d* instalado de acuerdo con su *arquitectura*, y el mismo ha de mantener una tabla de configuración e información de los procesos relativa a esa máquina virtual. Los procesos de usuario se comunican, vía la librería de funciones, con el dæmon local; y luego éste manda/recibe mensajes a/de los dæmons de los computadores remotos (ver Figura 7).

● La librería de rutinas *libpvm3.a*: llamadas a funciones que el programador incluye en la aplicación paralela en lenguaje C. Ellas inician e identifican procesos con *pvm_mytid()*, generan otros con *pvm_spawn()*, envían y reciben mensajes con *pvm_send()* y *pvm_recv()*, entre muchas otras funciones. Otra librería, *libgpvm3.a*, forma y usa grupos dinámicos de procesos, para los cuales se tienen rutinas como *pvm_bcast()*, *pvm_scatter*, *pvm_gather* y *pvm_reduce*, que realizan, como se ha dicho, comunicación colectiva. Finalmente, hay también que mencionar una librería para FORTRAN *libfpvm3.a*.

PVM permite crear cualquier número de procesos sin que tenga que existir relación alguna con la cantidad de procesadores usados. Además, ubica procesos en procesadores en forma automática, a menos que sea dirigido por el programador. Por ejemplo, si en la Figura 7 hubieran existido más de los tres procesos determinados por los programas ejecutables cargados en cada computador, PVM ubicaría más de uno por cada uno de estos últimos. Es interesante aprovechar estas propiedades para ubicar todos los procesos de un programa paralelo sobre un único procesador a fin de hacer un ensayo previo antes de pasar a la implementación paralela definitiva.

4.2. Características de MPI

Como ya hemos señalado, MPI es una norma sobre la cual se han realizado diversas implementaciones. En este momento comprende más de 120 rutinas y sigue creciendo: Una de las razones de su desarrollo es hacer la metodología de pasaje de mensajes simple en su uso; además se procuró introducir modificaciones para subsanar algunas deficiencias técnicas observadas en sistemas anteriores como PVM.

La razón del gran número de funciones fue tratar de dar a los programadores de aplicaciones muchas posibilidades para elaborar programas muy eficientes. Sin embargo, tal como lo hacen notar Foster [12], Gropp, Lusk y Skjellum [14], basta con sólo

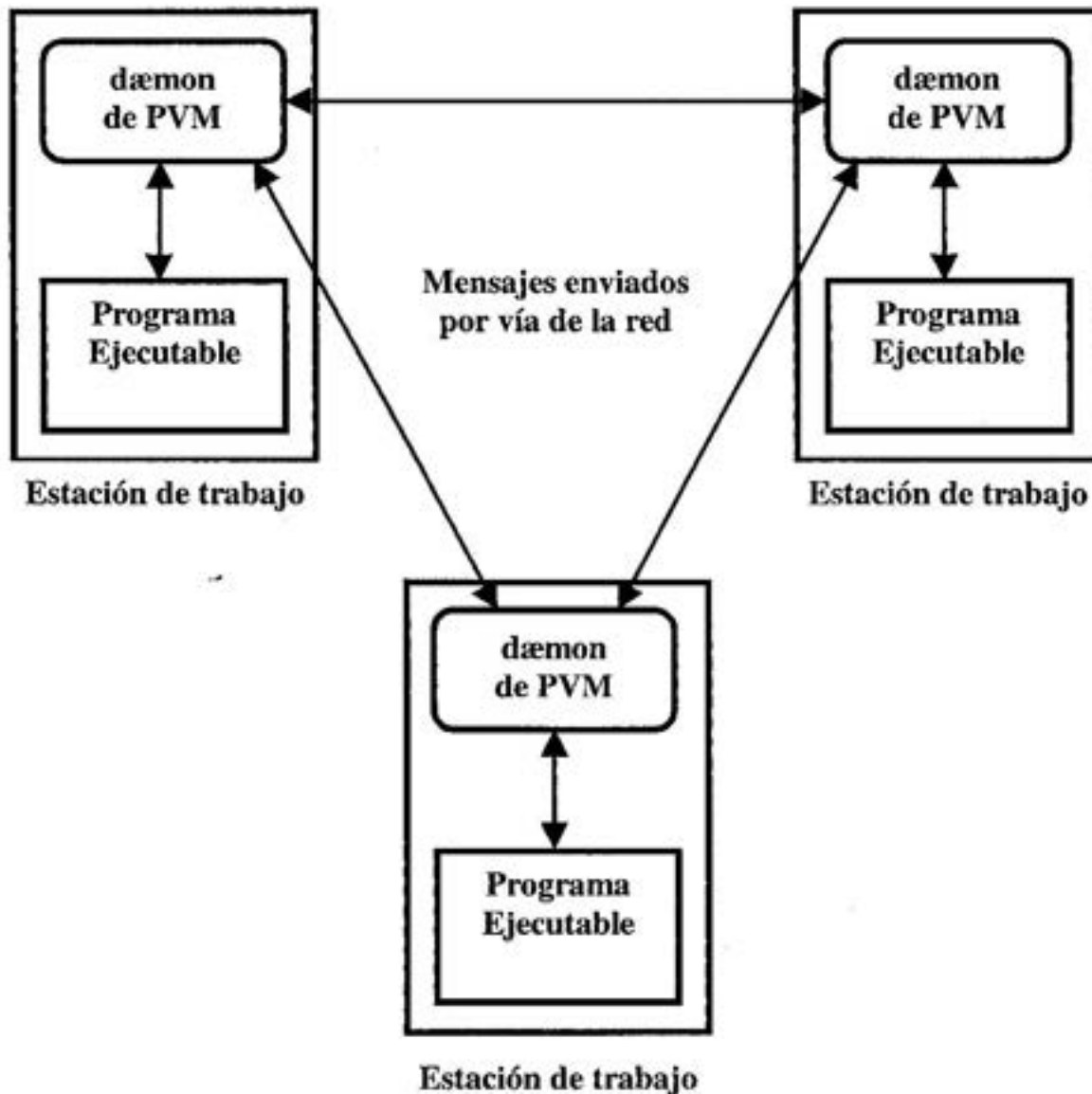


Fig. 7. PVM y el pasaje de mensajes entre estaciones de trabajo.

6 funciones básicas de MPI para poder escribir muchos programas paralelos. También señalan que con ese sistema, uno puede tener la flexibilidad que necesite, y no necesita dominar todas las partes de MPI para poder usarlo.

El modo de comenzar la ejecución de un programa no está contemplado en la norma, y debe ser establecido por la implementación de que se trate. Por ejemplo, en el caso de *MPICH*, se podría ejecutar el programa *miprogram* bajo la forma SPMD, sobre una red de cuatro computadores, con el siguiente comando:

```
mpirun -np 4 miprogram
```

Por supuesto, el programa tuvo que ser compilado y cargado en cada uno de los computadores. Si el sistema fuese homogéneo se requiere sólo una compilación. Pero si hay más de una arquitectura, se habrá de compilar para cada una de ellas, siguiendo las opciones establecidas en la implementación usada. Es de notar que a raíz de lo especificado por la versión 1 de MPI, las implementaciones como *MPICH*, soportan únicamente la creación estática de procesos, debiéndose definir éstos antes de la ejecu-

ción y ponerlos en marcha conjuntamente. No hay un equivalente al `pvm_spawn()` de PVM, y ello se debe a la decisión de evitar el «overhead» propio de la creación dinámica de procesos.

MPI tiene una función de puesta en condición inicial `MPI_Init()` que debe insertarse antes de cualquier otra función de MPI; y después de todo el desarrollo de MPI, el código debe terminar con `MPI_Finalize()`. Otras importantes funciones son: `MPI_Comm_size()` que determina el número *m* de procesos que pueden comunicarse dentro de un grupo; y `MPI_Comm_rank()` que da el *rango* (número de 0 a *m*-1, distintivo de cada proceso) que corresponde al proceso que la llama. En todo esto tiene capital importancia un concepto introducido por MPI, que es el *comunicador*: un dominio de comunicación que define un conjunto de procesos a los cuales se les permite comunicar entre sí. Los comunicadores permiten separar aspectos de un problema que convenga dividir en

grupos; por ejemplo, si suponemos operaciones sobre matrices, puede ser necesario considerar filas y columnas por separado, en grupos diferentes con un *comunicador* distinto cada uno. Si el problema a tratar fuese relativamente simple, puede bastar con un único *comunicador*, una especie de *Universo* que se llama `MPI_COMM_WORLD`, y es el comunicador por defecto.

En el párrafo anterior ya hemos mencionado cuatro de las seis funciones principales que permiten construir muchos programas paralelos. Las dos restantes son, necesariamente, de pasaje de mensajes. Si se tratara de comunicación punto a punto, tendremos rutinas de las dos clases típicas: *bloqueantes* y *no bloqueantes*. A fines ilustrativos indicamos a continuación las dos del primer tipo, comentando sus parámetros, Figura 8 (a) y (b).

Como muy sencillo ejemplo de parte de un programa SPMD en lenguaje C usando MPI, consideremos el caso de transmitir un número entero *z* de un proceso a otro:

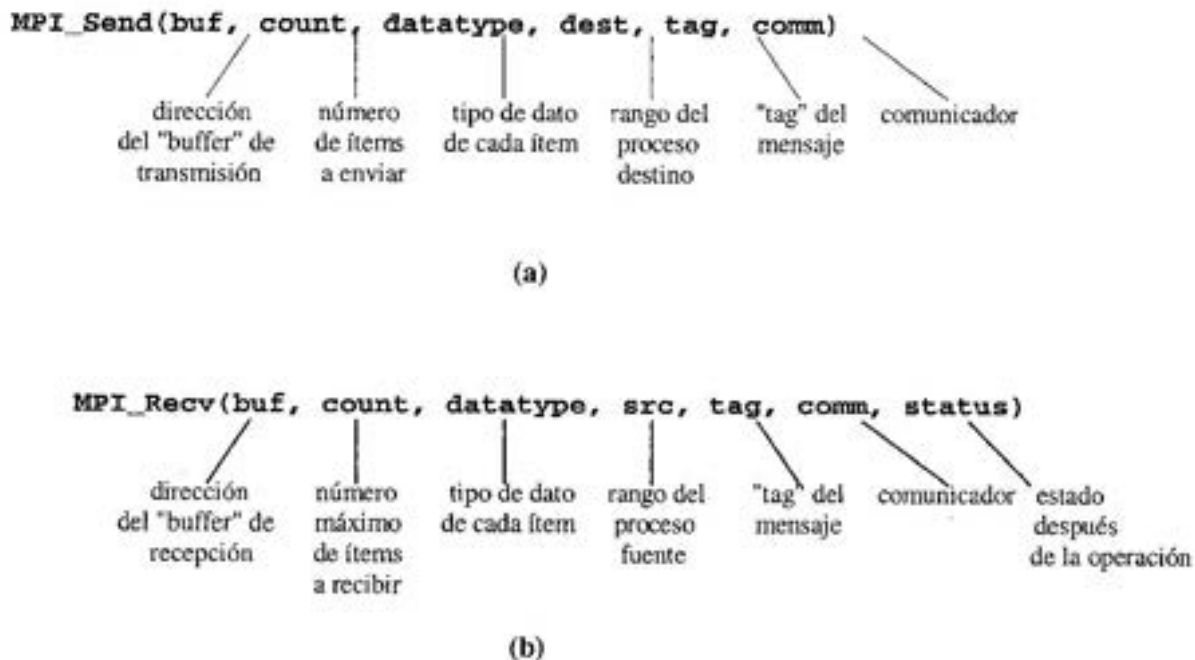


Fig. 8. Rutinas MPI bloqueantes de comunicación punto a punto: (a) Emisión - (b) Recepción.

```
main (int argc, char *argv[])
{
    MPI_Init(&argc, &argv);           /* inicia MPI */
    .
    .
    .
    MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &mirango); /* halla rango */
    if (mirango == 0) {
        int z;
        MPI_Send(&z, 1, MPI_INT, 1, msgtag, MPI_COMM_WORLD);
    } else if (mirango == 1) {
        int z;
        MPI_Recv(&z, 1, MPI_INT, 0, msgtag, MPI_COMM_WORLD, status);
    }
    .
    .
    .
    MPI_Finalize();                  /* termina MPI */
}
```

Se observa la característica SPMD en el sentido de que, estando definidos los procesos de rangos 0 y 1, el programa es el mismo en ambos, pero la lógica interna, en base a esos valores del rango, hace que el proceso 0 emita, y el proceso 1 reciba.

5. Homogeneidad y heterogeneidad en clusters

En 1.4 hemos hecho referencia a estos términos en relación con diferencias que se presentan entre distintos tipos de redes de estaciones de trabajo. Volveremos ahora sobre el tema, y comentaremos algunas experiencias realizadas en la Universidad Nacional de La Plata y el Instituto Tecnológico de Buenos Aires

5.1. Homogeneidad

Es lógico, en principio, suponer que los procesos paralelos van a ejecutarse más rápidamente en clusters homogéneos constituidos por una única arquitectura en sus nodos, con procesadores idénticos que usan igual formato de datos, no siendo por ello necesaria ninguna conversión cuando se pasan mensajes. La red de interconexión de-

berá ser pareja, mostrando similares propiedades de latencia y ancho de banda desde cada nodo. También el balance de carga de cómputo puede a veces ser más simple (aunque esto depende de la naturaleza del problema a resolver) si todos los procesadores tienen las mismas prestaciones. Si el sistema operativo es el mismo para cada estación de trabajo, hasta la instalación de sistemas tales como PVM o MPI será más sencilla pues bastará con compilar una sola vez tales sistemas para la arquitectura que corresponda, y cargar los ejecutables y librerías obtenidas, en todos los componentes del cluster. Lo mismo sucederá con la compilación de los programas de aplicación. Podríamos decir que este es el caso típico de homogeneidad. Y si, además, se trata de un sistema exclusivamente dedicado a computación paralela, sin usuarios que «distraigan» algunos o todos los computadores para otras tareas de monoprocesamiento, la situación será de casi completa felicidad.

5.2. Sistemas homogéneos derivados del «Proyecto Beowulf»

Además de las reflexiones que acabamos de formular, también es necesario

pensar en los costos de un sistema homogéneo: como hemos hecho notar en 1.4, hay «CLUMPS», que en rigor son clusters, pero con un precio considerable, salvo que tengan un número pequeño de procesadores. Por supuesto, es posible recurrir a estaciones de trabajo, todas de la misma fabricación y características, pero aún así el costo puede ser relativamente alto. Un interesante concepto ha partido del hecho de que las PCs están llegando a prestaciones que las llevan a un nivel semejante o a veces superior al de las estaciones de trabajo: se trata de un Proyecto originado en el Goddard Space Flight Center de la NASA, en los Estados Unidos, y que se llama «*Beowulf*» [20]. Las ideas son las siguientes:

- Formar el cluster con placas de PC fácilmente obtenibles en el mercado masivo a bajos precios y con procesadores, como los Pentium, cada vez más perfeccionados. Estos procesadores deben ser, además, exclusivamente dedicados.

- Usar una red de comunicación interna, dedicada también exclusivamente al cluster, procurando en lo posible emplear «Fast Ethernet» de 100 Mbps. Asimismo, se puede explorar la factibilidad de disponer redes múltiples Ethernet de 10 Mbps internas y distribuir el tráfico para llegar a los anchos de banda necesarios para la transferencia de datos.

- Adoptar *LINUX* como sistema operativo, ya que son bien conocidas sus propiedades como una muy eficiente variante de UNIX que además es del dominio público, siendo accesibles sus fuentes.

- En lo que se refiere al pasaje de mensajes, usar las versiones gratuitas de PVM y MPI, que son del dominio público.

Como se puede observar, los conceptos de *Beowulf* son sumamente interesantes para su implementación en el ambiente universitario, procurando lograr las mejores relaciones costo/performance.

Desde un punto de vista más general, se debe tener en cuenta que, para un cluster homogéneo, son válidas las expresiones de evaluación (speedup, rendimiento, costo, etc.) que hemos analizado en 2.-

5.3. La heterogeneidad y sus consecuencias

Todo cluster que de alguna forma se aparte de lo indicado en 5.1, ha de poseer un cierto grado de heterogeneidad, por lo cual podemos distinguir los siguientes casos:

- Clusters con estaciones de trabajo del mismo tipo (arquitectura, organización, tecnología de un dado fabricante) pero que difieren en su *potencia de computación*. Por ejemplo, supongamos que en la red conectamos varias *Sun Sparc-5*, junto a otras *Sun Sparc-20*, y una *Sun Ultra Sparc 10*. Puede decirse que todas ellas emplean el mismo modelo de ejecución y no hay necesidad de conversión de formatos de datos cuando se pasan mensajes. Habrá que tener en cuenta el *peso* relativo de cada una en *potencia de computación* para caracterizar de algún modo la *heterogeneidad* resultante.

- Clusters con estaciones de trabajo de diferentes tipos, como podría ser el que se muestra en la Figura 3. Podríamos decir que podemos tener varias arquitecturas y organizaciones, distintos formatos de datos, y por supuesto, también diferentes potencias de computación. El problema de los formatos de datos es tomado en cuenta por los sistemas de pasaje de mensajes, que en general realizan la respectiva conversión en forma transparente para el usuario, a costa de una cierta pérdida de performance. Pero de todos modos es obvio que el problema de caracterizar la *heterogeneidad* de estos clusters «muy heterogéneos» es mucho más complejo que en el caso previamente mencionado, cualitativamente «poco heterogéneo».

5.4. Criterios de adaptación de métricas para los sistemas heterogéneos

En [16, 23, 24, 25, 27] se han considerado modificaciones para la expresión del *speedup* $Sah(p)$ de un sistema heterogéneo de p estaciones de trabajo $ws1, ws2, ws3, \dots, wsp$, con respecto a la ecuación (2) y demás expresiones dadas en 2.1 que, como se ha dicho, son válidas para el caso homogéneo. Habrá que tener en cuenta, como

término de referencia secuencial, al mínimo tiempo de ejecución T_{wsi} que se obtenga entre las p estaciones de trabajo para la resolución del problema dado, con el mejor algoritmo secuencial; T_p es el tiempo empleado en paralelo por el conjunto de las estaciones de trabajo interconectadas, de alguna manera no especificada, por la red:

$$S_{sh}(p) = \frac{\min_{i=1}^p (T_{wsi})}{T_p} \quad (17)$$

que es una expresión utilizable para evaluación de las prestaciones del sistema («*métrica de performance*», según la literatura).

Con el fin de comparar la potencia de computación entre las distintas estaciones de trabajo de un sistema heterogéneo [10, 24, 27], se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$P_w(wsi) = \frac{\min_{j=1}^p (T_{wsi})}{T_{wsi}} \quad (18)$$

donde $P_w(wsi)$ es el «peso de potencia de computación» de la estación de trabajo wsi , siendo $i = 1, \dots, p$. Se lo determina como la relación entre el mínimo tiempo de resolución del problema (en la estación de trabajo más rápida de la red, siendo $j = 1, \dots, p$), y el tiempo T_{wsi} empleado por la que se considera para el cálculo del peso arriba indicado.

En base al mencionado peso dado por la ecuación (18) se puede introducir [24, 27], una definición de la heterogeneidad **Het** para una red de estaciones de trabajo **now**:

$$Het(now) = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p [1 - P_w(wsi)] \quad (19)$$

Si todas las estaciones de trabajo fuesen idénticas, con la misma velocidad de procesamiento, todos los pesos definidos por (18) serían iguales a 1, y $Het(now) = 0$, como corresponde a la homogeneidad. En cambio, si hay muchos computadores de muy bajo peso, resultará que $Het(now)$ tiende a 1.

Como ya se ha hecho notar, la forma de repartir el trabajo en una **NOW**

heterogénea ha de incidir sobre el comportamiento de la misma. Ello obliga a tratar de evitar la asignación de la misma carga a cada uno de los computadores, sino más bien de utilizar un reparto de operaciones que sea proporcional al peso de potencia de computación de cada uno [24].

5.5. Experiencias para confirmar conceptos

En la Universidad Nacional de La Plata (Facultades de Ingeniería y de Informática), se están realizando trabajos sobre paralelismo en redes de computadores, principalmente con motivo de la elaboración de la tesis de doctorado para la Universidad Autónoma de Barcelona, por parte del Lic. y Magister Fernando Tinetti, bajo la dirección local del Prof. Ing. A. De Giusti (Informática) y de quien esto escribe (Ingeniería); y la dirección en la UAB del Prof. Dr. Emilio Luque. Asimismo, hay una estrecha vinculación con el Grupo de Investigación en Procesamiento Paralelo (GIPP) del Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA), con el Ing. Andrés D'Alessandro colaborando con el Lic. Tinetti y quien suscribe. En ambos casos se ha trabajado utilizando sistemas preexistentes en redes de uso general no dedicadas exclusivamente a computación paralela. Describiremos brevemente los siguientes casos:

- En el caso del ITBA, existe en su Departamento de Ingeniería en Petróleo, un «cluster» de ocho estaciones de trabajo *Silicon Graphics*, dos de las cuales son «*Indigo*» con procesadores *MIPS R10000*, y actúan como servidores para los seis restantes («*Indy*» con procesadores *MIPS R4500*). Aunque estas máquinas son accesibles desde la red general del ITBA, entre sí y localmente son una **NOW** relativamente «poco» heterogénea, con un mismo modelo de ejecución, pero acusando el mayor peso del poder de computación de las dos *Indigo* frente al de las seis *Indy*. Por lo tanto, hemos procurado ejecutar en esta red un problema de los que la literatura suele designar como «embarazosamente paralelos» (*embarrassingly parallel*) o «gratamente

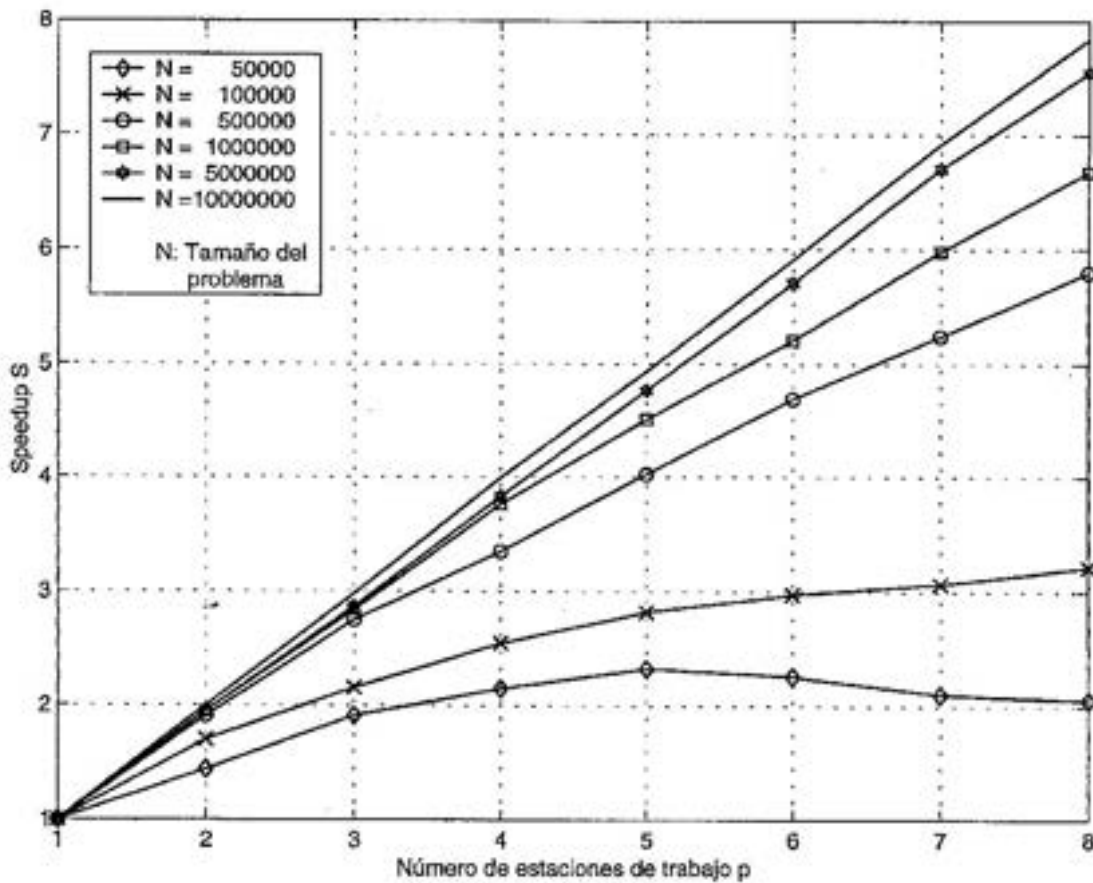


Fig. 9. Speedup de un ejemplo de NOW.

paralelos», que se caracterizan por dividirse fácilmente en partes independientes que se pueden ejecutar simultáneamente. Un caso que fuese verdadera y absolutamente de este tipo no requeriría comunicación entre los diferentes procesos [02, 08, 26], y lo único que hay que hacer es distribuir los datos y arrancar los procesos. En nuestro caso se trató de un problema clásico, muy utilizado para enseñanza de estos conceptos [14]: simplemente una integración numérica mediante la regla de los rectángulos para determinar el valor de π . Es decir:

$$\int_0^1 \frac{1}{1+x^2} dx = \frac{\pi}{4} \quad (20)$$

Se divide el intervalo de 0 a 1 en un cierto número de subintervalos N que será

el «tamaño del problema» y se suman las áreas de los rectángulos. Cuanto mayor N , mejor la aproximación. La parte paralela del algoritmo se tiene cuando cada proceso calcula el área para un subconjunto de rectángulos, y finalmente, todas las sumas locales se combinan en un total. Esto requiere muy poco en comunicación: uno de los procesos, que será el «maestro», se comunica con el usuario para requerirle el número N , y lo transmite por «broadcast» a los demás, es decir los «esclavos», que con la operación de «reducción» le devuelven sus resultados. Este programa se realizó en lenguaje C, usando la librería de **MPI**. En la Figura 9 se han representado los resultados para el *speedup* en función de p , como una familia de curvas con parámetro N . El programa mismo, usando la función de **MPI**

llamada **MPI_Wtime**, calcula el tiempo entre el broadcasting inicial y la reducción final, y a partir de allí se determina el speedup usando la expresión (17).

Ciertamente este caso no es una novedad, pero es interesante para apreciar hasta qué punto una cierta homogeneidad (o una heterogeneidad limitada), unida a un escaso «overhead» de comunicaciones, nos lleva a un comportamiento cuya «escalabilidad» es muy notoria. La primera curva ($N=50000$) alcanza a mostrar algo del overhead, ya que aparece un máximo con $p=5$, y luego un lento descenso. La segunda ($N=100000$) indica una tendencia tipo «Amdahl» (ecuación (6)); y las demás, dentro del rango de los 8 procesadores, crecen cada vez más en correspondencia con las ideas de Gustafson, ecuaciones (9) y (10). En particular, la última, para $N=10.000.000$, está muy cerca de la ley lineal ideal. Lo principal es notar que, para un mayor tamaño N del mismo problema se obtiene mayor speedup para el mismo número de procesadores. Si se determina el rendimiento según la fórmula (11), resultan los valores de la **Tabla 1**. De la misma, se observa que el rendimiento disminuye con un mayor número de procesadores, y un creciente tamaño N lo hace aumentar para el mismo número p , aun cuando ha de decrecer si este último se incrementa. Dado que el incremento de p reduce E , y el aumento del tamaño N determina que crezca, se puede pensar en mantener E en un mismo valor si se incrementan p y N a la vez. Por ejemplo, con un tamaño de 500000 tendríamos

un rendimiento de 0,95 con dos procesadores. Si necesitamos que N crezca 10 veces, llegando a 5000000, un aumento del número de procesadores a cinco ha de mantener el rendimiento en el mismo valor de 0,95.

Esta consideración nos aclara que nuestro sistema tiene buenas características de **escalabilidad**.

• Los estudios del Lic. Tinetti en la UNLP y el ITBA se han centralizado sobre los efectos de la heterogeneidad, tendiéndose a tomar casos muy heterogéneos de una red existente en el CeTAD de la Facultad de Ingeniería, habiéndola además conectado con otra de la Facultad de Informática. El detalle de este trabajo fué publicado en la referencia [24], por lo cual aquí solamente haremos referencia a conclusiones importantes. La primera red constaba de cinco estaciones: una DEC Alpha con Linux, tres Sun Sparc diferentes entre sí y con distintas versiones de sistema operativo Solaris y Sun OS, y una PC con Linux. En la otra red, se agregaban otros dos PCs con Linux. Se realizaron los cálculos de pesos de potencia de computación y los de heterogeneidad de acuerdo a las expresiones aquí designadas con (18) y (19), además de determinarse el speedup sin y con utilización de asignación de cargas de computación proporcionales a los respectivos pesos. En todos los casos se utilizaron algoritmos para la resolución de la multiplicación de matrices, problema que está muy lejos de los «embarazosamente paralelizables» y exige un detenido estudio de las condiciones y parámetros de comunicación de la red. Se observó:

TABLA 1. Rendimientos

N	p=1	p=2	p=3	p=4	p=5	p=6	p=7	p=8
50000	1	0,72	0,63	0,54	0,46	0,38	0,30	0,26
100000	1	0,85	0,72	0,64	0,56	0,49	0,44	0,40
500000	1	0,95	0,92	0,84	0,80	0,78	0,75	0,72
1000000	1	0,97	0,94	0,94	0,90	0,87	0,85	0,83
5000000	1	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,94

- Que el agregado de dos máquinas de otra red no proveía ningún progreso en speedup, debido a las comunicaciones entre ambas redes.

- Que la heterogeneidad se hace dependiente del tamaño N.

- Que la asignación de carga no repartida proporcionalmente degrada la performance, que queda muy por debajo de la obtenida secuencialmente con el procesador más rápido.

- Que la carga de trabajo relativa debe incluir la velocidad relativa de comunicación entre las distintas estaciones de trabajo.

- Que es evidente que aunque los ambientes como *PVM* (que fué el que se utilizó en este trabajo), consideran aspectos de la heterogeneidad [09], no incluyen en cambio ninguna forma de tener en cuenta las características de la red de interconexión.

5.6. Conclusiones generales y trabajo futuro

Sin duda alguna, el paralelismo logrado en base a estaciones de trabajo, puede ser un poderoso recurso para lograr una performance muy aceptable en materia de speedup, rendimiento y escalabilidad. Sin embargo, la influencia de la heterogeneidad debe ser tenida en cuenta especialmente, por haberse demostrado claramente que hasta un pequeño número de estaciones de trabajo puede degradar por esa causa su comportamiento.

El trabajo sobre sistemas heterogéneos continúa también en el ITBA incluyendo no solamente los computadores SGI arriba mencionados, sino también estaciones de trabajo Sun y PCs con Linux.

Es fundamental, en todos los casos, determinar las características de latencia y ancho de banda de las redes, verificando además la influencia que sobre ello tienen los sistemas de pasaje de mensajes, ya que algunas pruebas están demostrando que *PVM* introduce perturbación. Se procura cuantificar estos efectos y extender la comprobación a las implementaciones de dominio público para *MPI*.

Para llegar a prestaciones importantes sin la preocupación de la heterogeneidad, y aun a bajo precio, pueden ser muy convenientes las implementaciones de sistemas paralelos del estilo *Beowulf*.

Pero, de todos modos, vale la pena continuar (y se lo hace en todo el mundo) la investigación sobre sistemas muy heterogéneos, donde se pueda aprovechar la existencia de nodos muy poderosos en su peso de potencia de computación. Es necesario, entre nosotros, generalizar todo el planteo de tales sistemas, con caracterización de la granularidad óptima; perfeccionamiento del estudio de la paralelización sobre más de una red local; y realización de la caracterización completa de la heterogeneidad teniendo en cuenta todos los parámetros que determinan el tiempo de computación, el tiempo ocioso, y los tiempos de comunicación local e inter redes. Además, como se dijo anteriormente, se debe investigar a fondo los métodos para tomar en cuenta la influencia de la actividad de usuarios independientes de una u otra estación de trabajo, y la planificación necesaria en tales casos. Sin duda, todo este conjunto de trabajos puede ser intenso y complejo, pero representa un desafío que debe ser apreciado en toda su importancia.

Referencias

- [01] Amdahl, G. (1967), «Validity of the Single-Processor Approach to Achieving Large-Scale Computing Capabilities». *Proc. 1967 AFIPS Conf.*, Vol. 30, p. 483.
- [02] Baker, L., Smith, B. J., «*Parallel Programming*», McGraw-Hill, New York, 1996.
- [03] Baker, M., Buyya, R., «*Cluster Computing at a Glance*», Chapter 1, Ref. [4], pp. 3-47.
- [04] Buyya, R., (Editor), «*High Performance Cluster Computing, Vol. 1, Architectures and Systems*», Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey, 1999.
- [05] Buyya, R., (Editor), «*High Performance Cluster Computing, Vol. 2, Programming and Applications*», Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey, 1999.
- [06] Catanzaro, B., «*Multiprocessor System Architectures*», Sun Microsystems, Inc., Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1994.

- [07] Cosnard, M., Trystram, D., «*Parallel Algorithms and Architectures*», International Thomson Computer Press, London, 1995.
- [08] Chalmers, A., Tidmus, J., «*Practical Parallel Processing*», International Thomson Computer Press, London, 1996.
- [09] Dongarra, J., Geist, A., Manchek, R., Sunderam, V., «Integrated pvm framework supports heterogeneous network computing», *Computers in Physics*, (7)2, pp. 166-175, April 1993.
- [10] Du, X., Zhang, X. «*Performance Models and Simulation*», Chapter 6, Ref. [04], pp. 135-153.
- [11] Flynn, M. J., «Some Computer Organizations and Their Effectiveness», *IEEE Transactions on Computers*, 21, September 1972, pp. 948-960.
- [12] Foster, I., «*Designing and Building Parallel Programs*», Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1995.
- [13] Geist, A., Beguelin, A., Dongarra, J., Jiang, W., Manchek, B., Sunderam V., «*PVM: Parallel Virtual Machine - A User's Guide and Tutorial for Network Parallel Computing*», The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1994.
- [14] Gropp, W., Lusk, E., Skjellum, A., «*Using MPI, Portable Parallel Programming with the Message Passing Interface*», The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1997.
- [15] Gustafson, J. L., «Reevaluating Amdahl's Law», *Communications ACM*, 31, (5), May 1988, pp. 532-533
- [16] Kumar, V., Grama, A., Gupta, A., Karipis, G., «*Introduction to Parallel Computing*», Benjamin/Cummings, Redwood City, California, 1994.
- [17] Message Passing Interface Forum, «*MPI: A Message Passing Interface Standard*», University of Tennessee, Knoxville, Tennessee, June 12, 1995
- [18] Pacheco, P., «*Parallel Programming with MPI*», Morgan Kaufmann, San Francisco, California, 1997.
- [19] Patterson, D. A., Hennessy, J. L., «*Computer Architecture, A Quantitative Approach*», 2nd ed., Morgan Kaufmann, San Francisco, California, 1996.
- [20] Savarese, D., F., Sterling, T. «*Beowulf*», Chapter 26, Ref. [04], pp. 625-645.
- [21] Snir, M., Otto, S. W., Huss-Lederman, S., Walker, D. W., Dongarra, J., «*MPI: The Complete Reference*», The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1997.
- [22] Stallings, W., «*Computer Organization and Architecture*», Fifth Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2000.
- [23] Tinetti, F. G., «Aplicaciones Paralelas de Cómputo Intensivo en NOW Heterogéneas», «*Actas del Workshop de Investigadores en Ciencia de la Computación (WICC 99)*», Vol. 1, p. 17, San Juan, Argentina, 27/05/99.
- [24] Tinetti, F. G., Quijano, A. A., De Giusti, A. E., «Heterogeneous Networks of Workstations and SPMD Scientific Computing», *Proceedings of the 1999 International Workshops on Parallel Processing, IEEE, Inc., 1999 International Conference on Parallel Processing*, University of Aizu, Aizu-Wakamatsu, Fukushima, Japan, September 21 - 24, 1999, Vol. 1, pp. 115-119.
- [25] Tinetti, F. G., Sager, G., Rexachs, D., Luque, E., «Cómputo Paralelo en Estaciones de Trabajo no Dedicadas», *Actas del VI Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACIC 2000)*, Vol 1, pp. 49-61, Ushuaia, Argentina, 2 -7 de Octubre 2000.
- [26] Wilkinson, B., Allen, M., «*Parallel Programming, Techniques and Applications Using Networked Workstations and Parallel Computers*», Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1999.
- [27] Zhang, X., Yan, Y., «Modelling and characterizing parallel computing performance on heterogeneous NOW», *Proceedings of the Seventh IEEE Symposium on Parallel and Distributed Processing, (SPDP'95)*, IEEE Computer Society Press, San Antonio, Texas, October 1995, pp. 25-34.

Manuscrito recibido y aceptado en febrero de 2001.

FUNDACIONES EN ROCA

Jorge A. Suárez

Ingeniero Civil, MS. Profesor de Mecánica de Rocas (Universidad Nacional de La Plata).
Asesor geotécnico. Calle 3 N° 687, (1900) La Plata, Argentina.

Resumen

Las fundaciones de las estructuras de la ingeniería civil deben proyectarse de forma de no producir la rotura del material en que se apoyan y sin que este último sufra deformaciones incompatibles con el correcto funcionamiento de la estructura. Para los casos en que el material de apoyo es suelo se ha conseguido establecer tanto el mecanismo de rotura que ha permitido determinar la carga de rotura del mismo, así como métodos de predicción de asentamientos. Para el caso en que el material en que apoyan las fundaciones es un macizo rocoso, no ha sido posible establecer algo semejante, por los motivos que se explican en el trabajo, que entonces, lo que pretende es hacer una revisión de las herramientas prácticas con que se puede contar para garantizar una seguridad prefijada de una fundación en un macizo rocoso.

Palabras clave: macizo rocoso, fundación directa, pilotes, carga admisible, adherencias, fricción, empotramiento, fuste, carga horizontal.

Abstract

The foundations of structures in the field of civil engineering, must be designed in such a way that the material on which they rest neither reach failure nor suffer strains not compatible with the correct behaviour of the structure. For those cases in which the material they rest on is soil, a general failure mechanism and the failure load could be established as well as methods of predicting settlements. For those cases in which the material they rest on is rock mass, it has not been possible to establish something similar for those reasons explained in the paper; this then aims to make a revision of the design practical tools the civil engineer may count on in order to assure a pre-established security to a foundation that rests on rock mass.

Key words: rock mass, direct foundation, piles, allowable load, adherence, friction socket, lateral surface, horizontal load.

1. Generalidades

La finalidad de una fundación es transmitir la carga de una determinada es-

tructura al terreno sin alcanzar la rotura del material que lo constituye (suelos o rocas) y sin que se produzcan deformaciones incompatibles con las funciones que debe cumplir la estructura. En el caso de obras hidráulicas es necesario además tener en cuenta que si la conductividad hidráulica del macizo rocoso no es lo suficientemente

Trabajo presentado con motivo de la entrega del premio "Oreste Moretto" en Ingeniería Geotécnica, el 12 de noviembre de 1999.

reducida deben tomarse los recaudos necesarios para evitar que se desarrollen factores de inestabilidad que pudieran comprometer el correcto comportamiento de la estructura; pero esto último escapa al objeto del presente trabajo.

Para poder proyectar correctamente una fundación, es decir establecer el tipo de fundación (directa o profunda) y sus dimensiones, es necesario, evidentemente, contar con un buen conocimiento del perfil del terreno y de los parámetros geomecánicos de los distintos materiales que lo constituyen.

Comparados con los suelos, la mayoría de los macizos rocosos son muy resistentes y poco deformables en cuanto a su uso como material en el que apoyan las fundaciones de las obras más comunes de ingeniería civil, aunque no debe olvidarse que hay estructuras que pueden transmitir cargas muy importantes (rascacielos, o presas, por ejemplo) y macizos rocosos cuya capacidad portante es moderada, ya sea porque están constituidos por bloques de rocas intrínsecamente débiles (muchas rocas sedimentarias) o por encontrarse altamente fracturados, por presentar cavidades o cavernas dentro de su masa o por estar formados por bloques de rocas alteradas por intemperización. Es lógico entonces que resulte necesario tener un buen conocimiento de las condiciones del macizo rocoso en el que se proyecta fundar una obra de ingeniería.

Las mejores condiciones para efectuar una fundación en roca se dan cuando el macizo es resistente, está mínimamente fracturado y el techo de roca es aproximadamente un plano casi horizontal, sin mayores irregularidades, claramente definido y con una cubierta de suelos de poco espesor, de modo de que resulte posible hacer una fundación directa a una profundidad conveniente. Pero no siempre se encuentran estas condiciones. Muchas veces la zona superior de la masa rocosa está alterada, la superficie del techo de roca puede no estar bien definida y las propiedades de la roca pueden variar mucho en pequeñas distancias, tanto en sentido horizontal como vertical. Ciertos tipos de calizas presentan superficies muy irregulares, cavidades, vetas

arcillosas y características erráticas, por lo que su comportamiento es muy difícil de predecir, y representan entonces condiciones subterráneas muy traicioneras. Existen también macizos rocosos, formados por estratos sedimentarios, que presentan cambios rítmicos en sus propiedades, debido a una alternancia de estratos resistentes, por ejemplo areniscas muy cementadas, con estratos débiles (pelitas); la predicción del comportamiento del conjunto bajo la acción de las cargas que transmiten las fundaciones puede resultar en estos casos mucho más dificultosa que lo que sería hacerlo en el caso en que las mismas fundaciones apoyaran sobre macizos formados por un único tipo de estrato. La presencia de fallas también es una complicación para el proyecto y el buen funcionamiento de las fundaciones.

Los macizos muy fisurados pueden dar lugar a una gran reducción de la capacidad de carga del mismo con respecto a un macizo formado por la misma roca pero con pocas fisuras.

Otro tipo de problema que puede presentarse es que las rocas de fundación contengan minerales expansivos o inestables y que las estructuras proyectadas posibiliten que se ponga de manifiesto este tipo de propiedades.

El tipo de fundación más conveniente (directa, pilotes hincados, pilotes colados "in situ", pilares, con cajones, masiva como la de las presas, etc.) depende esencialmente del perfil geotécnico y de la estructura proyectada. La cantidad y tipo de investigación a realizar para definir el tipo de fundación y dimensionarla, depende del costo y del tiempo necesario para llevar a cabo tal investigación en relación con el costo total de la obra y el tiempo disponible. Las fundaciones directas, en principio las más sencillas y económicas, no siempre pueden ser utilizadas porque no siempre se encuentran las condiciones adecuadas. Los pilotes hincados se usan generalmente sólo en los casos en que existe un estrato de suelo blando sobre rocas débiles, en las que la punta del pilote puede penetrar, a veces hasta 1 m, hasta alcanzar un rechazo prefijado;

pero en la mayoría de los casos en que el techo de roca es muy irregular o inclinado es difícil garantizar que los pilotes trabajen correctamente y con frecuencia pueden llegar a romperse por flexión durante la hincada, por lo que en la mayoría de estos casos se prefiere directamente el uso de pilotes colados "in situ".

En el caso de rocas resistentes se requiere una perforación previa para asegurar el empotramiento del pilote en la longitud necesaria; en condiciones como éstas, lógicamente, se impone el uso de pilotes colados "in situ".

Para cargas muy grandes solía usarse pilares de fundación que penetran generalmente varios metros en la roca para conseguir el empotramiento adecuado y necesitan por lo tanto, perforación previa; los pilares de fundación pueden resultar económicos si no requieren entibación para contener terrenos blandos o la perforación de rocas muy duras u algún otro procedimiento especial. Una de las ventajas de los pilares sobre los pilotes es que el gran diámetro de la perforación permite la investigación directa de la roca de fundación por ingenieros y geólogos; pero en la actualidad, con el avance de la tecnología, este tipo de fundación, al igual que los pilares de hormigón masivo para pilares de puentes, realizados mediante el uso de cajones que se hunden a través del agua y de los suelos blandos hasta llegar a la roca, ha sido sustituido en casi todos los casos por el uso de pilotes de gran diámetro, por resultar más conveniente en costo y en mayor rapidez de ejecución; así se hizo por ejemplo en nuestro país en los puentes Zárate-Brazo Largo y Chaco-Corrientes (aunque se debe hacer la salvedad de que en estos dos casos la punta de los pilotes no está en roca sino en arenas muy densas), y en el caso de los puentes internacionales Posadas-Encarnación sobre el río Paraná y el puente Tancredo Neves, sobre el río Iguazú, que unen a nuestro país con Paraguay y Brasil respectivamente; en el caso de estos dos últimos puentes la punta de los pilotes sí está empotrada en roca.

En algunos casos, las dimensiones de la fundación de grandes obras de hormigón masivo, como las presas de gravedad, pueden reducirse mediante el uso de anclajes que toman las cargas desestabilizantes generadas por subpresiones o grandes fuerzas sísmicas.

2. Capacidad de carga de fundaciones directas

Para poder establecer una fórmula de capacidad de carga es necesario elaborar un modelo geomecánico que interprete el mecanismo por el cual se puede llegar a la rotura del material de fundación. Pero esto, que sí pudo hacerse en el caso de los suelos, es muy difícil de lograr en el caso de los macizos rocosos, muy especialmente porque la relación entre el ancho de la fundación y el tamaño de los bloques es muchísimo más pequeña que la relación entre el ancho de la fundación y el tamaño de las partículas de los suelos, en general muy grande y que permite que la rotura de un suelo se produzca siempre de acuerdo con determinado mecanismo; se debe tener en cuenta que la rotura de un suelo implica el desplazamiento de una parte de la masa de suelo, con respecto a otra que queda fija, a lo largo de contactos entre las partículas y que el nivel de tensiones con que se trabaja para que esto se produzca impide que la rotura del suelo implique la rotura de las partículas que los forman. En los macizos rocosos sólo en dos casos se puede dar la rotura de acuerdo con un mecanismo general similar al de rotura de los suelos: en el caso de rocas débiles (pelitas y otras sedimentarias poco cementadas) y en el caso de rocas resistentes extremadamente fisuradas. En ambos, puede obtenerse la capacidad de carga utilizando las fórmulas desarrolladas por la Mecánica de Suelos. Pero en los otros casos la rotura implica rotura de roca intacta y deslizamiento por discontinuidades preexistentes; las condiciones implican tal diversidad de mecanismos posibles de rotura que es imposible establecer un mecanismo de falla típico, que pueda ser interpre-

tado por una fórmula aplicable a cualquier caso.

A las dificultades propias del problema de determinar ese esquema y fórmula general de rotura o la determinación de varios esquemas y fórmulas tipo, ha contribuido sin dudas que en general el tamaño de los bloques lleva a que las investigaciones deban basarse en ensayos "in situ" para que sean realmente representativos de las condiciones reales lo que se ha reflejado en un menor número de investigadores y de investigaciones en relación con lo que ocurrió en su momento con la Mecánica de los Suelos, en la que un amplísimo porcentaje de los avances se logró sobre la base de ensayos de laboratorio.

Esta dificultad en poder establecer un mecanismo general de rotura, y en consecuencia una fórmula general de capacidad de carga, ha llevado a muchos autores a recomendar distintos criterios para determinar la capacidad de carga para fundaciones directas en macizos rocosos. De estos criterios se presentan a continuación sólo dos, por considerárseles los más importantes y más utilizados:

1) Algunos autores recomiendan que la carga admisible se considere igual a la resistencia a la compresión simple de la roca intacta. Este criterio resulta especialmente aplicable en el caso de macizos con diaclasas verticales o sub-verticales. Si el macizo está muy poco fisurado este criterio es bastante conservador.

2) El otro criterio para establecer la tensión admisible para fundaciones directas en macizos rocosos es el sustentado por R. Peck [R. Peck et al. (1974); R. Peck (1976)]. Este criterio se basó en determinaciones empíricas sobre modelos con distintos grados de fisuramiento y con el objetivo de que las deformaciones tuvieran un valor máximo prefijado. Como la deformabilidad tiene en el caso de los macizos rocosos una importancia preponderante frente al problema de la resistencia y como la deformabilidad de un macizo rocoso está, sobre todo en el caso de rocas resistentes, determinada en su casi totalidad por su estado de fisuramiento dado que las cargas

que transmiten las fundaciones son generalmente bajas con respecto a la resistencia de la roca intacta, los autores han propuesto valores de la tensión admisible en función del RQD (ya que este parámetro refleja en cierta forma ese estado de fisuramiento) y para que el asentamiento, en cualquiera de los casos, sea menor que 1 cm.

Si el macizo es relativamente uniforme el RQD debe tomarse como el valor promedio dentro de una profundidad (por debajo del nivel de fundación) igual al ancho B de la zapata. Si el RQD aumenta con la profundidad, se debe tomar ese valor promedio en una profundidad igual a B/4, siempre por debajo del nivel de fundación.

TABLA I.- Tensiones admisibles en roca en función del RQD [según Peck et al., (1974)]

RQD (%)	MPa	q_{adm} (kg/cm ²)
100	30,0	300
90	20,0	200
75	12,0	120
50	6,5	65
25	3,0	30
0	1,0	10

Es evidente que la tabla anterior toma en cuenta el estado de fracturación del macizo pero no tiene en cuenta la calidad o tipo de roca que lo forma. Por eso, una vez obtenido el valor de q_{adm} en función del RQD, debe compararse ese valor con la resistencia a la compresión simple de la roca intacta que forma los bloques del macizo en la zona inmediata por debajo del plano de fundación y tomarse como carga admisible al menor de esos dos valores.

En este punto se hace necesario hacer una aclaración. A cualquier lector inquieto podría llegar a surgirle una duda justificada: si compara la tabla anterior con aquella tabla original en la que Deere [D. Deere (1963)] presentó la descripción de la calidad de la roca (en realidad del macizo rocoso) en función del RQD; verá que en ella, para valores de RQD de 0 a 25 se des-

cribe a la roca como "muy mala" y sin embargo, en la tabla del trabajo de Peck, para $RQD = 0$ se da a la tensión admisible un valor de $q_{adm} = 1 \text{ MPa}$ (10 kg/cm^2); si este valor es varias veces superior al que corresponde a los suelos más resistentes ¿por qué Deere la clasifica como "muy mala"? La explicación es muy simple: Don Deere introdujo el parámetro RQD con un fin específico, pero luego esa valoración de la calidad de un macizo fue haciéndose cada vez más popular, generalizándose su uso con otros fines distintos a los que motivaron su creación; Deere creó el RQD como una forma inicial para tener rápidamente alguna idea de las dificultades que podría presentar un macizo rocoso para avanzar con excavaciones subterráneas; y efectivamente, un macizo rocoso tan fisurado como para que su RQD esté comprendido entre 0 y 25 presenta muy malas condiciones para avanzar con una excavación subterránea: sin duda tan malas que sólo podría hacerse si se inyecta previamente el macizo alrededor de la futura excavación. Esto no tiene nada que ver con la aptitud de un macizo de las mismas condiciones de fisuramiento para servir de material de fundación de una estructura.

2.1 Capacidad de carga de fundaciones directas en casos especiales

2.1.1 Capacidad de carga de macizos de rocas débiles o macizos muy fracturados

En el caso en que la fundación se apoye sobre macizos de rocas débiles (como muchas rocas sedimentarias) o macizos muy fracturados, es decir formados por bloques de pequeñas dimensiones, es posible suponer que la rotura se puede producir por corte a lo largo de superficies similares a las de rotura de los suelos, de manera que en estos casos es admisible determinar la capacidad de carga a rotura empleando la fórmula desarrollada para estos últimos por Tezaghi y modificada más tarde por Brinch Hansen [Hansen (1961, 1963)]:

$$q_c = c N_c s_c d_c i_c + \gamma D N_q s_q d_q i_q + 0,5 \gamma B N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma \quad (1a)$$

Al igual que en los suelos, la obtención de un valor correcto de q_c depende del uso de valores correctos de los parámetros c y ϕ .

2.1.2 Capacidad de carga de rocas expansivas

Las rocas expansivas son rocas sedimentarias con material arcilloso de la familia de las montmorillonitas. Si por cualquier circunstancia aumenta su contenido de humedad se hinchan o si se impide su expansión, desarrollan presiones muy altas que en general son muy difíciles de soportar o equilibrar con las obras de ingeniería.

En estos casos no sólo se debe calcular la capacidad de carga para el contenido natural de humedad sino que se impone proyectar las obras de manera que no puedan ser afectadas, o se vean afectadas lo menos posible, por eventuales cambios de humedad de la roca de fundación o mucho mejor, siempre que sea técnica y económicamente posible, proyectarlas de forma de impedir que se produzcan esos cambios. Al proyectar fundaciones en este tipo de material debe tratarse entonces, en lo posible, de colocar las bases a una profundidad suficiente para que queden apoyadas en zonas protegidas de eventuales cambios de humedad, concentrar las cargas en la mayor medida posible (usando las máximas tensiones admisibles) y proteger las superficies expuestas del terreno con materiales impermeables. En muchos casos la mejor solución consiste en el uso de pilotes perforados.

2.1.3 Capacidad de carga de un manto delgado de roca resistente que descansa sobre roca mucho menos resistente.

Una zapata apoyada sobre un estrato delgado de arenisca rígida y resistente que descansa sobre un estrato de una pelita, más débil y flexible, constituye un ejemplo típico de este tipo de situación. Si la carga que transmite la zapata es importante, el manto de arenisca puede romper por flexión y transmitir una gran parte de la carga al estrato menos resistente. La capacidad de

carga quedará limitada por las deformaciones del manto de arenisca considerándolo como una viga. Otra forma, más segura pero tal vez menos económica, es dimensionar la zapata de acuerdo a los parámetros del estrato inferior más débil.

2.1.4 Capacidad de carga para fundaciones en un talud.

Cuando deba proyectarse una fundación sobre un talud o en las cercanías de su coronamiento no sólo debe calcularse la carga admisible teniendo en cuenta, para el primer caso, la inclinación relativa entre la zapata y el talud, sino que en cualquiera de las dos situaciones debe estudiarse la estabilidad del talud con la presencia de las correspondientes sobrecargas que representen a las cargas transmitidas por las zapatas.

3. Capacidad de carga de fundaciones profundas que apoyan sobre macizos rocosos

En muchos casos, la existencia sobre el techo rocoso de mantos de suelos poco resistentes de espesores importantes obliga a descartar toda posibilidad de ejecución de fundaciones directas, y a proyectar fundaciones profundas, las que atravesando los suelos poco resistentes, transmiten las cargas de la estructura al macizo rocoso.

Las fundaciones profundas pueden hacerse mediante pilotes premoldeados hincados o pilotes perforados colados "in situ", en forma similar a los utilizados en suelos.

Los pilotes premoldeados, hincados, en general no pueden penetrar en la roca salvo que, como se dijo antes, se trate de rocas débiles o extremadamente fisuradas; en caso contrario debería hacerse una perforación previa, cosa no muy común en el caso de pilotes hincados, ya que de ser necesario hacerla generalmente se prefiere adoptar directamente pilotes perforados colados "in situ". El uso de pilotes premoldeados sólo es aceptable cuando se tiene la seguridad de que el techo de roca no presenta grandes irregularidades, ya que de no ser así se pueden producir desviaciones de

los pilotes que generalmente conducen a la rotura del mismo por flexo-compresión.

Los pilotes colados "in situ", para penetrar en la roca necesitan una perforación previa y por la seguridad sobre la existencia de este empotramiento de la punta, son los que deben usarse siempre que existan cargas que no sean exclusivamente verticales; suponiendo que su ejecución sea correcta en todos sus aspectos, este tipo de pilotes ofrece mayores garantías que los hincados.

El tipo de pilote y el método constructivo deben ser adoptados de acuerdo al perfil geomecánico del lugar, que debe ser estudiado cuidadosamente.

La resistencia de los pilotes que transmiten la carga a un macizo rocoso es esencialmente la de punta en el caso de los pilotes hincados, ya que la fricción lateral resulta despreciable frente a aquélla, la que, por supuesto, puede ser mucho mayor que en el caso de los suelos. En el caso de los pilotes perforados colados "in situ" que penetran en la roca, la resistencia está dada esencialmente por la adherencia entre el hormigón y la roca en el fuste y por la resistencia de punta; si por cualquier razón el empotramiento en la roca es muy largo, la resistencia por adherencia en el fuste entre el hormigón y la roca puede llegar a tomar toda la carga del pilote y la punta no trabajar; un buen proyecto debe tender, dentro de lo posible, a fijar la longitud de empotramiento tratando de lograr un equilibrio entre ambas resistencias como se verá más adelante. Esto en general no se cumple si la longitud del empotramiento en el macizo rocoso resulta dada por la necesidad de equilibrar fuerzas horizontales muy importantes en comparación con las verticales.

El diámetro o lado de un pilote se establece en función de las cargas que transmite la superestructura y de la resistencia del hormigón que se especifique para su construcción y en muchos casos la dimensión final se termina fijando de acuerdo a la disponibilidad de equipos por parte de la firma constructora, todo ello sin que inter venga el tipo y calidad del macizo rocoso. La

longitud de esos pilotes de determinado diámetro y cuántos de ellos serán necesarios en cada cabezal, es lo único que va a depender de las características del perfil geotécnico.

La resistencia de punta se puede calcular utilizando la misma fórmula que en el caso de pilotes que transmiten la carga a los suelos [Moretto (1982)]:

$$q_{rp} = (cN_c + q Nq) s_c d_c \quad (1b)$$

Los valores de $s_c d_c$ se pueden obtener del gráfico de Brinch Hansen (1961) en función de D/B , en donde D debe tomarse igual a la longitud de penetración en la roca y B , al diámetro del pilote.

No hay demasiada experiencia con respecto a los valores que puede alcanzar la adherencia en el fuste entre el hormigón colado "in situ" y la roca, la que puede considerarse como una verdadera soldadura entre ambos. Se recomienda como seguro el uso de los siguientes criterios [Goodman (1980)]:

a) en rocas débiles, ricas en materiales arcillosos, la tensión máxima de adherencia se puede considerar proporcional a su cohesión no drenada:

$$\tau_{adh} = \alpha c_u \quad (2)$$

El coeficiente α tiene valores típicos que varían entre 0,3 y 0,9, pero puede tomar valores mayores si la superficie de contacto se hace artificialmente rugosa.

b) en rocas resistentes la máxima tensión de adherencia resulta, con bastante aproximación, igual a la resistencia a la tracción del más débil de los dos materiales (hormigón o roca). Pese a que en las rocas $\sigma_t \sim \sigma_c / 20$ y en el hormigón $\sigma_t \sim \sigma_c / 10$, en general se recomienda tomar

$$\tau_{adh} = \sigma_c / 20 \quad (3)$$

considerando a σ_c como el valor de la resistencia a la compresión simple más baja (sea del hormigón o de la roca).

Como ya se dijo, el diámetro de un pilote se determina en función de la carga que debe soportar y de la resistencia del hormigón; por lo tanto, para completar el proyecto de un pilote para soportar una

determinada carga con un grado de seguridad predeterminado, y cuya punta se apoya o penetra en un macizo rocoso, se debe determinar su longitud, lo que incluye esencialmente la longitud del empotramiento en la roca en base al perfil geotécnico del lugar y las tensiones admisibles de adherencia y de punta y las eventuales cargas horizontales.

Si la resistencia a la compresión simple de la roca es mayor que la del hormigón, es evidente que teóricamente no sería necesario disponer de un empotramiento si las cargas fueran absolutamente verticales. Pero generalmente las estructuras transmiten también cargas horizontales a los pilotes (por ejemplo debido a acciones del viento o de sismos sobre la estructura y además, en el caso de los puentes, las provenientes de la frenada de los vehículos) por lo que siempre los pilotes deben estar empotrados en la roca; en estos casos en que la roca es más resistente que el hormigón del pilote el empotramiento necesario debe determinarse entonces de acuerdo a las cargas laterales que debe soportar el macizo teniendo en cuenta el estado de la roca y el grado de fisuramiento; el cálculo se realiza en base a la teoría del pilote corto, considerando como pilote sólo a la parte empotrada del mismo con carga normal Q , tangencial T y momento M aplicados en su cabeza, ubicada en el nivel del techo de roca.

Si la resistencia a la compresión simple de la roca es menor que la del hormigón, la punta del pilote sólo será capaz de soportar parte de la carga que debe transmitir el pilote; la diferencia entre ambas cargas debe ser tomada por adherencia o fricción en la zona empotrada. La carga que se puede tomar por adherencia puede ser muy grande; si se le da al pilote un empotramiento importante, la carga que el pilote transmite al macizo por la punta puede resultar entonces significativamente menor que la carga aplicada al pilote. La Fig. 1 muestra la relación de tensiones $\sigma_{punta} / \sigma_{total}$ en función de D/R (longitud del empotramiento/radio del pilote) para varias relaciones E_r/E_h del módulo de elasticidad de la roca con respecto al del hormigón. De la fi-

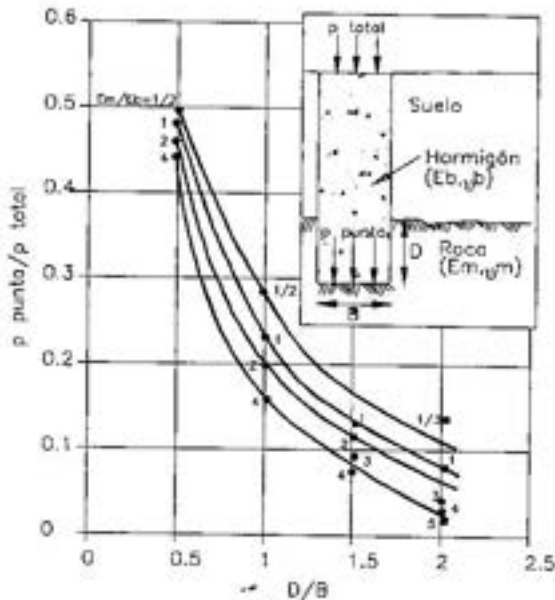


Fig. 1 - Relaciones de transferencia de carga p_{punta}/p_{total} calculadas por Osterberg y Gill (1973) para distintas relaciones de módulos E_m/E_r . Las curvas fueron desarrolladas por Ladanyi (1977).

gura surge claramente la importancia de la carga que se toma por adherencia a medida que aumenta la longitud del empotramiento: para empotramientos mayores que 4 veces el radio del pilote, la carga que se transmite por la punta es menor que el 10% de la carga aplicada al pilote.

Si se sobrepasa la resistencia por adherencia se rompe esa especie de "soldadura" que ligaba al hormigón con la roca y queda sólo la resistencia por fricción entre la superficie de los dos materiales, la que es mucho menor que la primera (tampoco hay adhesión si se hince un pilote premoldado en una perforación en la roca, aunque penetre en ella muy ajustadamente: en este caso habrá sólo fricción).

En el caso en que sólo hay fricción entre roca y hormigón, la relación $\sigma_{punta}/\sigma_{total}$ está dada por la fórmula [Goodman (1980)]:

$$\frac{\sigma_{punta}}{\sigma_{total}} = e^{-2[(\mu v_h + (1+v_r)E_h/E_r)]D/R} \quad (4)$$

En estos casos en que la resistencia de la roca es menor que la del hormigón, se

puede hacer el proyecto lo más económico posible dando al empotramiento la longitud mínima que haga trabajar a la punta a la tensión admisible: una longitud mayor de empotramiento significa mayor costo de la perforación en roca y mayor costo del pilote. Para hacer este cálculo se recomienda seguir los siguientes pasos:

1) Establecer los valores de las tensiones admisibles de fuste τ_{adm} (de adherencia o de fricción según corresponda) y de punta ($q_{p adm}$).

2) Calcular la longitud $D_{m \acute{a}x}$ de empotramiento necesaria para tomar toda la carga Q por el fuste.

3) Elegir un valor D_1 menor que $D_{m \acute{a}x}$ y en función de D_1/R determinar $\sigma_{punta}/\sigma_{total}$ con el gráfico de la Fig. 1 si se contará con adherencia o con la fórmula (4) si se contará sólo con fricción.

4) Calcular σ_{punta} multiplicando por la tensión total ($Q/\pi R^2$) al valor ($\sigma_{punta}/\sigma_{total}$) determinado en el punto anterior y el valor de la carga Q_{punta} multiplicando a la tensión en la punta por el área de la sección del pilote.

5) Calcular la tensión de corte que se transmitirá al fuste en la longitud de empotramiento D_1 :

$$\tau = (Q - Q_{punta}) / 2\pi R D_1 \quad (5)$$

6) Comparar σ_{punta} y τ con $q_{p adm}$ y τ_{adm} . Si no resulta $\sigma_{punta} < q_{p adm}$ y $\tau < \tau_{adm}$ simultáneamente, repetir el cálculo desde el punto 3) utilizando otro valor de D . El proceso deberá repetirse para varios valores de D , hasta lograr la solución más equilibrada, es decir que $\sigma_{punta}/q_{p adm} \sim \tau/\tau_{adm}$; debe verificarse finalmente, que el valor de D que cumpla esta condición, sea además suficiente para garantizar la estabilidad ante la acción de cargas horizontales que pudieran actuar sobre el pilote teniendo en cuenta las características del macizo rocoso en la zona de empotramiento; si el empotramiento D fuera demasiado corto como para contar con esta última garantía, deberá aumentarse el empotramiento hasta obtenerla, a pesar de que el empotramiento resulte excesivo desde el punto de vista de la mejor repartición entre las cargas de fuste y de punta.

4. Asentamiento de fundaciones en macizos rocosos

Los asentamientos que pueden sufrir las fundaciones apoyadas en macizos rocosos no pueden ser estimados, en la mayoría de los casos, tan fácilmente como cuando se apoyan en suelos. Para este último caso, la Mecánica de Suelos ha desarrollado métodos que permiten obtener una buena aproximación considerando al suelo como un medio elástico, homogéneo y generalmente isótropo y continuo, para calcular la distribución de las tensiones dentro de la masa de suelo bajo el efecto de las cargas (a las que puede considerarse como superposición de cargas tipo) y calculando después las deformaciones, por una parte como una deformación elástica en base a la adopción de uno o varios módulos de elasticidad según el caso y por otra parte, adicionando las deformaciones debidas a los efectos de una eventual consolidación.

En el caso de las fundaciones apoyadas en macizos rocosos, la consolidación tiene en general un valor insignificante, por lo que en principio podría, erróneamente, pensarse que obtener una solución de tipo general podría ser más sencillo que para el caso de los suelos, porque sólo sería necesario estudiar deformaciones elásticas.

Los problemas principales para hacer buena predicción de los asentamientos que sufrirá un macizo rocoso son dos: que es muy difícil conocer cuál es la distribución real de tensiones y que es bastante difícil conocer con precisión cuál o cuáles serían los módulos de deformación en la zona en que la fundación modifica el estado de tensiones naturales.

Ambos problemas tienen origen en que en general los macizos rocosos no son medios homogéneos, ni isótropos y menos aún continuos, debido a la presencia de diaclasas y otros tipos de fracturas, por lo que la distribución de las tensiones inducidas por las fundaciones dentro de la masa rocosa no puede obtenerse con los métodos clásicos de la Teoría de la Elasticidad. Gaziev y Erlikhman en 1971 trabajando con modelos publicaron la distribución de ten-

siones para una misma carga en macizos rocosos con distintos tipos de fracturamiento; en esos gráficos se pueden ver que en macizos con discontinuidades muy cercanas con respecto a la dimensión de la zapata de fundación, la distribución de las tensiones se hace muy diferente a la que correspondería a un medio homogéneo e isótropo y que varía de acuerdo con la distribución de las discontinuidades. Este problema de la distribución de tensiones podría aparentemente tener una solución particular en cada caso haciendo uso del método de los elementos finitos; pero para que los resultados de un cálculo de este tipo sean realmente confiables, debe ser aplicado a un modelo que sea verdaderamente representativo de la composición del macizo, es decir que sería necesario conocer la distribución de discontinuidades y de módulos de deformación de las distintas zonas que pudieran entrar en la composición del volumen total de macizo a estudiar. En realidad es bastante difícil contar con un modelo de macizo altamente confiable y con valores confiables de los módulos de deformación necesarios. Es mucho más usual utilizar un valor E_m del macizo rocoso general o medio (el subíndice m cumple una doble función: indica que se trata del módulo del macizo y no del de la roca intacta y también cumple la función de indicar de que se trata de un módulo medio).

En algunos casos, en los que el macizo rocoso no está estratificado y presenta muy pocas discontinuidades, cerradas y sin material de relleno, se puede considerar que bajo la carga que le transmitirá una fundación se comportará en forma similar a un medio elástico e isótropo y entonces, para estimar los asentamientos que sufrirá esa fundación se puede aplicar las fórmulas derivadas de la Teoría de la Elasticidad y utilizadas por la Mecánica de Suelos, para lo que es necesario adoptar para el macizo rocoso un valor E_m de su módulo medio de deformación y otro ν_m para el coeficiente de Poisson (este coeficiente generalmente se adopta, ya que su medición sería una tarea harto difícil y dado lo acotado que está su valor, siempre $\leq 0,5$, y teniendo en cuenta

que en las fórmulas para determinar deformaciones este coeficiente aparece elevado al cuadrado, un error del orden de 0,1 sólo podrá influir en el orden de 0,01 del resultado, es decir que se producirá un error muy poco significativo). El módulo E_m teóricamente puede obtenerse mediante ensayos "in situ" ya que los de laboratorio quedan descartados de plano por su total falta de representatividad, ya que el porcentaje mayor de las deformaciones proviene en general del cierre de discontinuidades que no estarían representadas en un testigo de laboratorio. Los ensayos "in situ" para determinar E_m son de dos tipos básicos: los ensayos estáticos o de carga y los ensayos dinámicos o geosísmicos. Ambos dan resultados que no son totalmente confiables. Los ensayos de carga consisten en aplicar cargas sobre superficies planas o curvas y medir los desplazamientos pero en general pecan de poco representativos por el pequeño volumen de macizo que entra en juego en el ensayo comparado con el volumen involucrado por las obras reales; dentro del volumen no ensayado podrían existir varios elementos que fueran capaces de disminuir considerablemente el valor de E_m . Los ensayos geosísmicos abarcan volúmenes de macizo importantes pero las tensiones que se producen con el ensayo son muy bajas y el resultado es un módulo siempre de valor más alto que el que correspondería a las tensiones de trabajo; los resultados que arroja este tipo de ensayo son del orden del que corresponde al comienzo de la primera descarga. Como los ensayos geosísmicos son de bajo costo y de fácil y rápida ejecución su uso está bastante difundido porque con ellos se obtiene un valor que se sabe que es mayor que el buscado. El fijar el valor de E_m para hacer una predicción de asentamientos requiere más de una determinación y mucho juicio ingenieril. Una herramienta que puede ser de gran ayuda para adoptar la decisión final es la ecuación de Serafim y Pereira (1983):

$$E_m = 10^{(RMR - 10) / 40} \quad (6)$$

en la que RMR es la valoración final de la clasificación C.S.I.R. ó de Bieniawsky de los

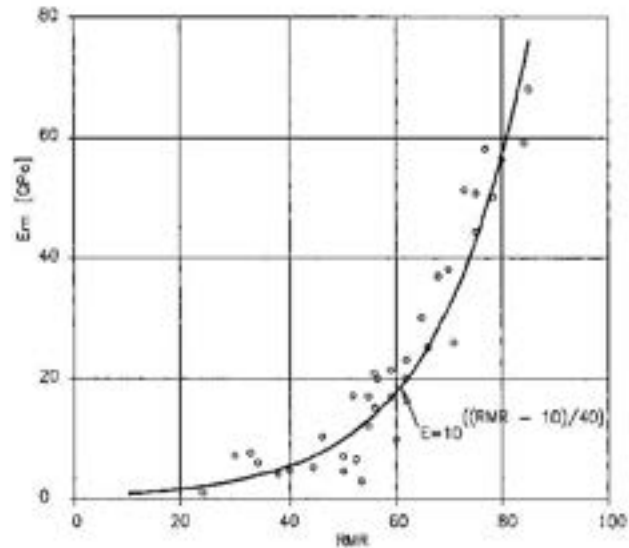


Fig. 2.- Relación entre el valor RMR obtenido con la clasificación de Bieniawski (C.S.I.R.) y el módulo medio de deformación del macizo "in situ" [Serafim y Pereira (1983)].

macizos rocosos. Esta ecuación tiene el gran valor de representar a la curva de regresión de treinta y cinco puntos obtenidos de grandes obras ya construidas en las que el módulo E_m fue deducido luego de conocer las deformaciones que se produjeron. Por supuesto que debe tomarse sólo como otro elemento más, muy importante pero sólo un elemento más, ya que, como puede verse en la Fig. 2, de los 35 puntos utilizados sólo 6 caen exactamente sobre la curva, aunque en los demás la dispersión no es demasiado grande; junto con los resultados de ensayos, por lo menos geosísmicos, esta ecuación puede resultar de gran utilidad.

La ecuación, o el gráfico, de Serafim y Pereira puede tener como inconveniente que en determinados casos (obras no demasiado importantes) no se cuente con un buen conocimiento de todos los parámetros necesarios para obtener el valor RMR. En estos casos se puede usar otras curvas que se pueden ver en la Fig. 3 que dan la relación E_m/E_r en función únicamente del RQD y de q_{adm} , obtenidas en laboratorio, en la que E_r es el módulo de deformación de la roca intacta; esta relación tiene la gran ventaja de que permite obtener el módulo E_m sólo en función de tres parámetros: el RQD, que se deduce de los testigos de las perforacio-

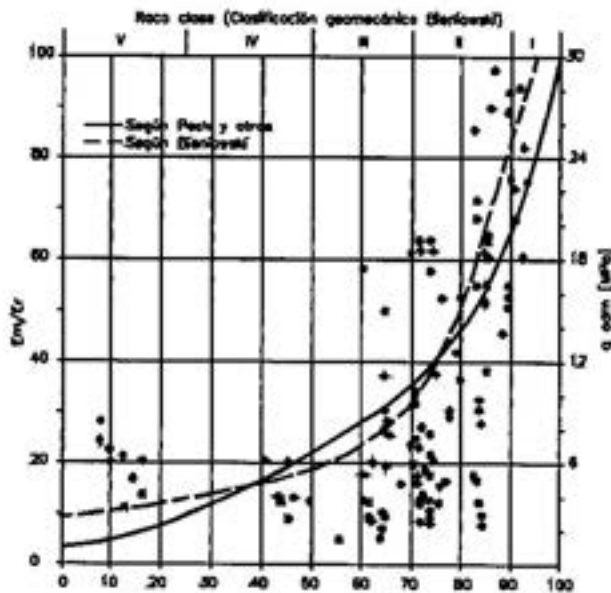


Fig. 3.- Gráfico para obtener el módulo medio del macizo en función del RQD, de la carga admisible del macizo y del módulo de deformación de la roca intacta de los bloques que componen el macizo (versiones de Peck y de Bieniawski).

nes con las que sin duda siempre se contará para la ejecución de un proyecto de fundaciones, el valor del módulo E_r de la roca intacta, que se puede obtener fácilmente ensayando en el laboratorio testigos de las perforaciones y q_{adm} que se pueden obtener aplicando un coeficiente de seguridad a la fórmula (1b), para cuya aplicación correcta se debe contar con el valor de los parámetros c y ϕ que también se puede obtener fácilmente con ensayos en el laboratorio. Mediante esta curva se relaciona el módulo del macizo (E_m) con su estado de fisuramiento (RQD) y la calidad de la roca que forma sus bloques (E_r y σ_c). Indudablemente resulta más práctico este gráfico, pero no tiene el sustento de basarse en resultados de deformaciones producidas realmente en obras construidas como es el caso de la ecuación de Serafim y Pereira. Por otra parte la dispersión de los puntos es demasiado grande, lo que vuelve a las curvas de Peck y de Bieniawski en una aproximación más que grosera.

En muchos casos, por todo lo dicho, es recomendable, especialmente en los casos en

que se trate de estructuras no demasiado importantes, dimensionar las fundaciones utilizando las tensiones admisibles adoptadas en función del RQD y de la resistencia a la compresión simple de roca intacta (apartado 2) con lo que el problema de los asentamientos pasaría a segundo plano, ya que el mismo será entonces del orden de 1 centímetro.

En el caso de querer predecir los asentamientos de estructuras sobre pilotes o pilares de fundación, debe tenerse en cuenta que dichos asentamientos serán el resultado de la suma de tres deformaciones:

- 1 - la deformación de la roca (s_r) debido a la acción de la carga de punta.
- 2 - el acortamiento del pilote o pilar (s_p) debido a la acción de la carga en su cabeza.
- 3 - una corrección ($-s_f$) que tiene en cuenta la transferencia de carga a lo largo del fuste empotrado.

Es decir que el asentamiento total de la cabeza del pilote se puede escribir:

$$S = s_r + s_p - s_f \quad (7)$$

En el caso en que el macizo pueda considerarse aproximadamente como un material isotrópico, el asentamiento s_r se puede obtener con la fórmula:

$$s_r = \frac{(\pi/2) \sigma_{punta} (1-\nu^2) R}{n E_r} \quad (8)$$

en la que n es un factor que depende de la relación entre la longitud D del empotramiento y el radio R del pilote, y del coeficiente de Poisson de la roca; en la Tabla 2 se dan los valores del factor n

Tabla 2 - Valores del factor "n" para tener en cuenta el efecto de la longitud de empotramiento D en los desplazamientos de una placa rígida de radio R de acuerdo a la ecuación (8) [Goodman (1980)]

n	D/R					
	0	2	4	6	8	14
0	1	1,4	2,1	2,2	2,3	2,4
0,3	1	1,6	1,8	1,8	1,9	2,0
0,5	1	1,4	1,6	1,6	1,7	1,8

Si el macizo rocoso es realmente anisotrópico se puede lograr una mejor aproximación haciendo uso de la metodología desarrollada por Kulhawy e Ingraffea (1978). Pero muy pocas veces se puede realmente justificar el uso de esta metodología de aplicación no muy simple.

El acortamiento s_p del pilote se calcula con la ecuación:

$$s_p = \sigma_{total} \cdot (L_o + D) / E_h \quad (9)$$

en la que

σ_{total} es la presión transmitida por la estructura a la cabeza del pilote

$(L_o + D)$ es la longitud total del pilote

D es la longitud de pilote empotrada en el macizo rocoso

E_h es el módulo de deformación del hormigón

Y la corrección s_f se obtiene con

$$s_f = \frac{1}{E_h} \int_{L_o}^{L_o+D} (\sigma_{total} - \sigma_z) dl \quad (10)$$

Bibliografía

Deere, D. (1963) - "Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes" - *Fels Mechanik und Ingenieur Geologie, 1,1*.

Deere, D. et al. (1967) - "Design of surface and near surface construction in rock" - Symp. of Rock Mech., 8th, Minnesota - AIME.

Goodman, R. E. (1980) - "Introduction to Rock Mechanics" - John Wiley & Sons.

Kulhawy, F. H. & Ingraffea, A. R. - "Geomechanical Model for Settlement of Long Dams

on Discontinuous Rock Masses" - Int. Symp. on Rock Mech. Related to Dam Foundation" - Río de Janeiro, Brasil.

Hansen, B. (1961) - "A general formula for bearing capacity" - *Geotechnisk Institut. Bulletin N° 12, Copenhagen, Noruega*.

Hansen, B. (1968) - "A revised and extended formula for bearing capacity" - *Geotechnisk Institut, Bulletin N° 28, Copenhagen, Noruega*.

Ladanyi, B. (1977) - Discussion on "friction and end bearing tests on bedrock for high capacity socket design." - *Can. Geot. J., Vol. 14, N° 1 pp 153-156*.

Moretto, O. (1982) - "Fundaciones en Roca - Síntesis escogida del conocimiento" - Informe del Relator General, Primer Congreso Sudamericano de Mecánica de Rocas, Bogotá, Colombia, Tomo I, 82 páginas.

Osterberg, J.O. & Gill, S.A. (1973) - "Load transfer mechanism for piers socketed in hard soil or rock" - Proceedings 9th Canadian Symposium on Rock Mechanics - Montreal, Canadá, pp 235-262.

Peck, R. B. et al. (1974) - "Foundation Engineering", 2nd Ed., John Wiley and Sons.

Peck, R. B. (1976) - "Rock Foundation for Structures" en el volumen II de "Rock Engineering for Foundations and Slopes", ASCE Special Publication, 2 vol., pp 1-21.

Serafim, J. L. & Pereira, J.P. (1983) - "Considerations on the geomechanical classification of Bieniawski" - Proc. Int. Symp. on Eng. Geol. & Underground Constr., Lisboa 1, 1133-1142, Inst. Ass. Eng. Geol.

Wittke, W. (1990) - Rock Mechanics (Theory and Applications with Case History) - Springer-Verlag.

Manuscrito recibido y aceptado en noviembre de 2000.

CELLULAR BASIS OF STEROID NEUROPROTECTION IN THE WOBBLER MOUSE, A GENETIC MODEL OF MOTONEURON DISEASE

*María C. González Deniselle, Susana L. González and Alejandro F. De Nicola*¹

Laboratory of Neuroendocrine Biochemistry, Instituto de Biología y Medicina Experimental; Dept. of Human Biochemistry, Faculty of Medicine, University of Buenos Aires; and Instituto Universitario de Ciencias de la Salud, Fundación Barceló, Argentina.¹ Instituto de Biología y Medicina Experimental. Vuelta de Obligado 2490, 1428 Buenos Aires, Argentina. E-mail: denicola@proteus.dna.uba.ar

Abstract

The Wobbler mouse suffers an autosomal recessive mutation producing severe motoneuron degeneration and astrogliosis in the spinal cord. It has been considered a suitable model of human motoneuron disease, including the sporadic form of amyotrophic lateral sclerosis (ALS). Evidences exist demonstrating increased oxidative stress in the spinal cord of Wobbler mice, whereas antioxidant therapy delayed neurodegeneration and improved muscle trophism. 21-Aminosteroids are glucocorticoid-derived hydrophobic compounds with antioxidant potency 3 times higher than vitamin E and 10 times higher than methylprednisolone. They do not bind to intracellular receptors, and prevent lipid peroxidation by insertion into membrane lipid bilayers. In common with the spinal cord of ALS patients, Wobbler mice present astrogliosis with hyperexpression of glial fibrillary acidic protein (GFAP), and increased expression of nitric oxide synthase (NOS) and growth-associated protein (GAP-43) in motoneurons. Here, we review our studies on the effects of a 21-aminosteroid on GFAP, NOS and GAP-43. First, we showed that 21-aminosteroid treatment further increased GFAP-expressing astrocytes in gray matter of the Wobbler spinal cord. This effect may provide neuroprotection if one considers a trophic and beneficial function of astrocytes during the course of degeneration. Other neuroprotectants used in Wobbler mice (T-588) also increased preexisting astrogliosis. Second, histochemical determination of NADPH-diaphorase, a parameter indicative of neuronal NOS activity, showed that the 21-aminosteroid down-regulated the high activity of this enzyme in ventral horn motoneurons. Therefore, suppression of nitric oxide by decreasing NADPH-diaphorase (NOS) activity, may provide neuroprotection considering that excess NO is highly toxic to motoneurons. Finally, 21-aminosteroid treatment significantly attenuated the aberrant expression of both GAP-43 protein and mRNA in Wobbler motoneurons. Hyperexpression of GAP-43 possibly indicated abnormal synaptogenesis, denervation and muscle atrophy, parameters which may return to normal following antioxidant steroid treatment. Besides 21-aminosteroids, other steroids also behave as neuroprotectants. In this regard, degenerative diseases may constitute potential targets of these hormones, based on the fact that the spinal cord expresses in a regional and cell-specific fashion, receptors for androgens, progesterone, adrenal steroids and estrogens.

Key words: Wobbler mouse; amyotrophic lateral sclerosis; spinal cord; neurodegeneration; astrogliosis; 21-aminosteroids.

Trabajo presentado con motivo de la entrega del premio "Ranwel Caputto" en Neuroquímica, al Dr. Alejandro F. De Nicola, el 12 de noviembre de 1999.

Resumen

El ratón Wobbler padece de una mutación autosómica recesiva que le produce una severa degeneración de motoneuronas y astrogliosis de la médula espinal. Se lo ha considerado un modelo apropiado de las enfermedades humanas de motoneurona, incluida la forma esporádica de la esclerosis lateral amiotrófica (ELA). Existen evidencias que demuestran aumento del estrés oxidativo en la médula espinal del ratón Wobbler, mientras que las terapias antioxidantes retardan la neurodegeneración y mejoran el trofismo muscular. Los 21-aminoesteroides son compuestos hidrofóbicos derivados de los glucocorticoides cuya potencia antioxidante es 3 veces mayor a la vitamina E y 10 veces mayor que la metilprednisolona. No se unen a los receptores intracelulares y previenen la peroxidación lipídica por inserción en la bicapa lipídica de las membranas. En común con la médula espinal de pacientes con ELA, los ratones Wobbler presentan astrocitosis con hiperexpresión de la proteína ácida fibrillar de la glia (GFAP), aumentada expresión de la óxido nítrico sintetasa y de la proteína asociada al crecimiento (GAP-43) en motoneuronas. En este trabajo nosotros resumimos nuestros estudios sobre los efectos de los 21-aminoesteroides sobre la GFAP, NOS y GAP-43. Primero, mostramos que el tratamiento con el 21-aminoesteroide aumentó aún más la alta expresión de la GFAP por astrocitos de la sustancia gris de la médula espinal de ratones Wobbler. Este efecto posiblemente sea neuroprotector si se considera la función trófica y beneficiosa de los astrocitos en el curso de la neurodegeneración. Otros neuroprotectores empleados en el ratón Wobbler como el T-588 también aumentan la astrocitosis. Segundo, la determinación histoquímica de la NADPH-diaforasa, un parámetro indicador de la actividad de NOS, mostró que el 21-aminoesteroide redujo la alta actividad de esta enzima en las motoneuronas del asta ventral de los Wobbler. De esta manera, la supresión del óxido nítrico al disminuir la enzima que lo produce, también sería un efecto neuroprotector considerando que el exceso de óxido nítrico es tóxico para las motoneuronas. Finalmente, el tratamiento con el 21-aminoesteroide significativamente atenuó la expresión aberrante del ARNm y proteína para la GAP-43, una acción que atenuaría las anomalías de la sinaptogénesis, desnervación y atrofia muscular. Además de los 21-aminoesteroides, otros esteroides también se comportan como neuroprotectores. En este sentido, las enfermedades neurodegenerativas pueden constituirse en un blanco terapéutico preferencial para estas hormonas, dado que la médula espinal presenta una alta regionalización y especificidad celular en la expresión de receptores para los andrógenos, progesterona, esteroides adrenales y estrógenos.

Palabras clave: ratón Wobbler; esclerosis lateral amiotrófica; médula espinal; neurodegeneración; astrogliosis; 21-aminoesteroides.

Introduction

Amyotrophic lateral sclerosis (ALS) is a progressive devastating disease affecting motoneurons that innervate voluntary muscles. It belongs to a family of diseases characterized by motoneuron degeneration. Following an anatomical criteria, these diseases are classified into three groups [Cudkovicz et al, 1998]: 1) Motoneuron diseases affecting lower motoneurons of the brain stem and spinal cord and upper motoneurons of the corticospinal and corticobulbar systems; 2) Diseases affecting lower motoneurons only;

3) Diseases comprising exclusively upper motoneurons. ALS is a typical example of the first group. The drama imposed by ALS is due to its fatal outcome, and the minor effectiveness of available treatments. At the late stages of the disease, patients show increased ambulatory difficulties, muscle weakness, inability to swallow, and risk respiratory paralysis in the light of a relative mental awareness [Bradley, 1996]. According to the NIH Publication # 1984 [Amyotrophic Lateral Sclerosis, 1984] 95% of ALS patients do not report a family history of the disease, for which reason they belong to the "sporadic form", while the re-

maintaining 5% present the "familial form", transmitted by a dominant gene. Other available data indicate that familial ALS cases account for 15-20%. In both forms, however, surviving time is limited to about 5 years [Cudkowicz *et al.*, 1998].

Examples of the group of motoneuron diseases affecting lower motoneurons only are the types I to IV forms of spinal muscular atrophy, characterized by progressive motoneuron degeneration transmitted by an autosomic recessive gene. To this group also belongs the spinobulbar muscular atrophy linked to the X chromosome, which presents a defect in the spinal cord androgen receptor, and the gangliosidosis caused by GM2 accumulation. Lastly, a typical example of upper motoneuron disease is the familial spastic paraplegia, which shows an autosomic dominant transmittance.

Animal models of motoneuron disease

Biomedical research is the only hope to cure or delay motoneuron disease. In this sense, animal models become useful tools to develop new pharmacological treatments based on experimental findings *in vivo* and *in vitro*. Rodents are the most common animal models of genetic or induced motoneuron disease. An exemption is the Brittany Spaniel dog characterized by a profuse filament deposition in motoneurons [Amyotrophic lateral sclerosis, 1984] but unfortunately, little has been done in these dogs regarding treatment responses. Following the reports of Cudkowicz *et al.* [1998] and Price [1994], murine models may be classified into four categories:

- The Wobbler mouse, a model for ALS and infantile spinal muscular atrophy.
- The progressive motor neuropathy mouse (pmn).
- The "wasted" (wst), "tumbler" (tb) and three varieties of mice with motoneuron disease known as mnd1, mnd2 and mnd3.
- Transgenic animals expressing a mutant form of the enzyme superoxide dismutase type I (SOD1) and transgenics with hyperexpression of light (NF-L) and heavy (NF-H) neurofilament subunits.

Animal models of familial ALS: The Gurney mouse

For FALS, the best-known and widely used model is the mouse developed by Gurney *et al.* [1994] at Upjohn-Pharmacia laboratories in Kalamazoo, MI. The discovery was prompted by the observation that in about 20% of patients with FALS, a primary defect exists in the cytosolic Cu,Zn-superoxide dismutase type I (SOD1) [Rosen *et al.*, 1993]. At the present time, more than 50 mutations of this enzyme have been reported. Fiszman *et al.* [1999] considered that the activity of SOD1 progressively decreases with advancing age in red blood cells of FALS patients. Thus, functional modifications in SOD1 occur both in humans with FALS and experimental models of this disease.

The enzyme SOD1 homodimerizes and its primary function is to detoxify superoxide anion, by conversion into H_2O_2 . The last product is detoxified to H_2O by the enzymes catalase and glutathion peroxidase. If present in excess, superoxide anion interacts with nitric oxide (NO) forming peroxynitrite (ONOO⁻), a highly toxic product causing protein nitrosylation and generation of hydroxyl radicals (OH⁻) [Cohen and Author, 1982]. In patients with FALS, the reduction in the activity of SOD1 amounts to 25-50% in brain, suggesting that this disease can originate in abnormalities in free radical homeostasis, with a subsequent increase in oxidative stress.

However, a problem exists since diseases with loss of function of a specific protein are recessive in nature, while FALS is inherited in a dominant fashion. Thus, it is likely that mutant SOD1 acquired a gain of function or other properties. In the transgenic mice, three out of four mutants of the human SOD1 introduced caused motoneuron degeneration: glycine 93 → alanine, glycine 85 → arginine and glycine 37 → arginine. Starting at 3-4 months of age, transgenics bearing these mutations developed motoneuron disease characterized by limb weakness, posterior limb paralysis, tremor, death due to inability to chew, loss of the enzyme acetylcholinesterase, motoneuron death, accumulation of neurofibrillary material, loss of axons in

ventral roots, dendrite microvacuolization, hiperexpression of SOD1, with aggregates of the enzyme in neurons and astrocytes, increased oxidative stress in the spinal cord with decreased levels of vitamine E, and increased susceptibility to glutamate neurotoxicity [Gurney et al 1994; Li et al 2000; Spooen and Hengerer, 2000].

To explain these abnormalities, several hypothesis were advanced, such as: a) a lower affinity for superoxide anion by the mutant SOD1, the accumulation of which increased oxidative stress; b) high affinity for peroxynitrite, with elevated levels of nitronium ions causing protein nitrosylation; c) enzyme precipitation forming aggregates which kill motoneurons. The last possibility gained considerable attention, as enzyme deposits may cause neuronal death. Recently, Li et al [2000] demonstrated in SOD1 transgenics that neuronal death occurs by apoptosis due to activation of executioner caspases. These group also showed that a caspase 3 inhibitor was able to reverse apoptosis and prolong life span in the transgenic mice. Therefore, the Gurney mouse resulted a valuable tool not only for basic neurochemical research but also for testing new pharmacological treatments which may benefit humans suffering from FALS.

The Wobbler mouse: genetics, clinical outcome and neuropathology

The Wobbler mouse mutant contains a mutation of autosomic recessive expression (*wr*) producing early degeneration of motoneurons of the spinal cord and brain stem [Duchen and Strick, 1968] (Figure 1). Although the *wr* gene has not been identified, it maps to chromosome 11 close to the glutamine synthetase gene [Kaupmann et al, 1992]. Due to the clinical symptomatology and neuropathological findings, Wobblers become useful models of motoneuron disease including sporadic ALS and infantile spinal muscular atrophy (Werdenig-Hoffman disease).

In homozygous animals (*wr \ wr*) the first manifestations of the disease are observed at 3-4 weeks of age, consisting in progressive weakness of front limbs, tremor and

ambulatory difficulty, followed by muscle atrophy, small body size, front limb flexion and extension of rear limbs [Duchen et al, 1965]. Heterocygote mice (*wr \ +*) are clinically normal. Yung et al [1982] have established different stages of the disease, taking into consideration the condition of the limbs (0 = normal; 1 = atrophy; 2 = curled digits; 3 = curled wrists; 4 = complete thoracic flexion of front limbs) and deambulation (0 = normal; 1 = tremor with normal deambulation; 2 = wobbling; 3 = curled paw walking; 4 = jaw walking).

Histologically, perikaryal vacuolar degeneration with chromatolysis and cellular edema occurs in lower medium and large size motoneurons of Wobbler mouse spinal cord. Typically, an eccentric nucleus can be observed. Additionally, dense astrocytosis (Figure 2) with increased levels of glial fibrillary acidic protein (GFAP) and axonal degenera-

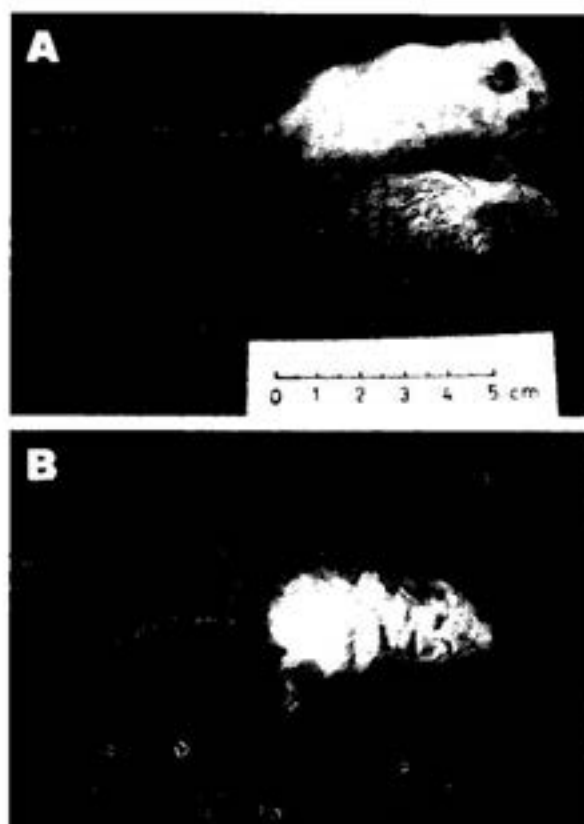


Fig. 1. Representative photomicrographs of control and Wobbler mice. A) Control (top) and Wobbler (bottom) mice, 1 month old. B) Wobbler mouse, 3 months old.

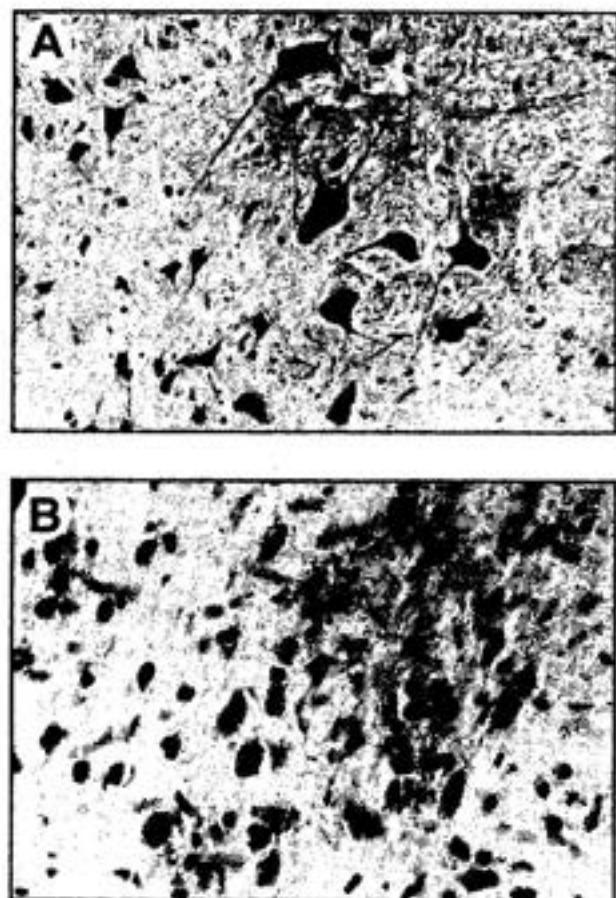


Fig. 2. Photomicrographs representing cresyl violet staining of control (A) and Wobbler (B) mice cervical spinal cord. Magnification: 400 X.

tion characterize the Wobbler mouse cervical spinal cord. According to some authors the astrogliosis represent a primary event [Laage *et al.*, 1988], whereas others consider it a response to neurodegeneration.

Mitsumoto and Gambetti [1986] demonstrated that the slow axonal transport is impaired in Wobbler mice, an event explained by the reduction of axonal number or diameter. Also, myelinated fibers undergo axonal degeneration. In this respect, the number of larger fibers diminishes in an advance stage of the disease while smaller fibers are not affected. Therefore, neuronal degeneration involves a motoneurons similar to humans with motoneuron disease. Interestingly, axonal pathology in Wobblers coincides with the appearance of clinical symptoms [Mitsumoto and Bradley, 1982].

Over the years, several pathological abnormalities found in Wobbler mice closely resembling those observed in the spinal cord of patients with ALS, encouraging authors to use Wobblers as models for human motoneuron disease. These are listed in Table 1.

Molecular pathology of Wobbler mice spinal cord

During the course of degeneration, the spinal cord of Wobbler mice shows increased expression of some genes involved in neurotrophism or in differentiation during embryonic life. Some of the trophic factors produced by degenerating neurons could also influence astrogliosis.

The most relevant hyperexpressed genes are those coding for brain-derived neurotrophic factor (BDNF) and its associated receptors *trkB* and *p75 NTR*, *c-Jun*, transforming growth factor alpha (*TGF α*) and the growth-associated protein known as *GAP-43*. On the other hand, both choline acetyltransferase (*ChAT*) mRNA and protein are reduced, whereas expression of *NGF*, neurotrophin 3 and its receptor *trkC* are unchanged [Junier *et al.*, 1994; Junier *et al.*, 1998; Popper *et al.*, 1997].

Motoneurons expressing high levels of BDNF and its high affinity and low affinity related receptors, may do so in an attempt to delay degeneration, considering that this factor promotes neuronal survival after axotomy and differentiation of embryonic neurons [Henderson, 1986; Enfors *et al.*, 1989]. However, the high levels of BDNF cannot avoid the decline in *ChAT*, the enzyme synthesizing acetylcholine, a main neurotransmitter released by motoneurons. It is also possible that the high expression of trophic factors and their receptors are a manifestation of cellular stress, or typify a reversal of the gene pattern of mature motoneurons to an embryonic profile. Another factor hyperexpressed by degenerating motoneurons is *TGF α* , which according to Junier *et al.* [1994] is the main cause of astrogliosis. She and her group demonstrated that after *TGF α* is produced and released by motoneurons, it binds to astrocyte receptors, inducing their hy-

Table 1. Histopathological abnormalities found in the spinal cord of patients with ALS and Wobbler mice

- Degeneration of medium and large size motoneurons, including loss of Nissl substance.
- Axonal changes identical to Wallerian degeneration.
- Neufibrillary hyperplasia with impaired axonal transport.
- Lack of lipofuscin grains in motoneurons.
- Astrogliosis with strong expression of GFAP.
- Increase expression of the growth associated protein (GAP-43).
- Higher expression of nitric oxide synthase.

perrophy and proliferation.

An important contribution to Wobbler mice spinal cord pathology was carried out by Ma and Vacca-Galloway [1994]. They found a pronounced degeneration of α motoneurons in ventral horn, accompanied by plastic changes in γ motoneurons. There is also intense axonal sprouting in presynaptic neurons, accompanied by high immunoreactive levels of the neuropeptides substance P, TRH, endorphin and ACTH receptors [Deng et al, 1996; Smith and Hughes, 1994]. These changes in presynaptic neurons follow α -motoneuron degeneration.

Astrocyte pathology in Wobbler mice

Wobbler mice present in common with ALS patients astrogliosis in gray and white matters of the spinal cord, primary motor cortex and subpial regions [Murayama et al, 1991]. The reactive astrocytes found in Wobbler and ALS spinal cord express high levels of GFAP [Laage et al, 1988]. The cause of astrocytosis in ALS is unknown, and some abnormalities in the function of these cells have been reported. Some authors consider this event a secondary response to neuronal illness, in which case TGF α could act as the neuronal inducer of astrogliosis. However, Wobbler astrocytes in primary culture also present some abnormalities. In this respect, primary Wobbler astrocytes exhibited abnormal cell-cell contacts, defects in glutamate transport and intercellular networks in culture in comparison to control astrocytes

[Hantaz-Ambroise et al, 1994; 1995; González Deniselle et al, 1999c]. Furthermore, direct addition of Wobbler astrocyte conditioned medium or cocultures with Wobbler astrocytes led to a decrease in neuron number in primary mixed neuronal cultures [Ait-Ikhlef et al, 2000].

Besides, previous work from our laboratory demonstrated: 1) low (^3H)-thymidine incorporation into astrocytes derived from the spinal cord of Wobbler mice in contrast to control astrocytes, 2) unresponsiveness of Wobbler astrocytes to corticosterone and interleukin 1 in doses that readily stimulated proliferation of control astrocytes, 3) selective stimulation of [^3H] thymidine incorporation by TGF β 1 in Wobbler mice astrocytes to levels similar to control cells. In this sense, TGF β 1 could have a role in the development of astrogliosis. Thus, available evidences suggest several abnormalities exist in number, morphology, and function of Wobbler mouse astrocytes, indicating that in addition to neurons, glial cells are profoundly affected in the course of the Wobbler disease and possibly in ALS.

Oxidative stress in Wobbler mouse spinal cord

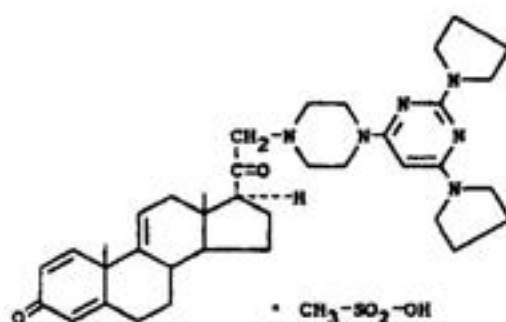
In contrast to studies carried out with the SOD1 transgenics, participation of oxidative stress in Wobbler mice spinal cord neuropathology rests mainly on indirect evidences. For example, Ikeda et al [1995] suggestion that a defective SOD1 may play a role

in the Wobbler neurodegeneration, was supported by replacement of the abnormal enzyme with a lecithinized derivative. This treatment delayed neurodegeneration and muscle atrophy. In other studies, inhibition of oxygen free radicals with n-acetylcysteine [Henderson *et al.*, 1996] or attenuation of excess NO by administration of the NOS inhibitor nitroindazol [Ikeda *et al.*, 1998] resulted to some extent in delayed neurodegeneration and attenuation of motor dysfunction. The latter result is consistent with Clowry and McHanwell [1996] who showed very high levels of NOS activity in the spinal cord motoneurons of the mutant animals.

Effects of an antioxidant 21-aminosteroid on astrogliosis, NOS and GAP-43 expression in the Wobbler mouse spinal cord

The above mentioned observations suggested that antioxidant steroid therapy may be a suitable treatment for neurodegeneration. In this sense, most steroid types provide neuroprotection, including estrogens, androgens, glucocorticoids, 21-aminosteroids and progesterone [Jones *et al.*, 1997; McEwen, 1999; Hall, 1992; Schumacher *et al.*, 2000]. 21-Aminosteroids, also called "Lazaroids" are glucocorticoid-derived synthetic compounds

U-74389F (16-desmethyl tirilizad)



INHIBITION OF IRON CATALYZED LIPID PEROXIDATION IN RAT BRAIN HOMOGENATES

COMPOUND	IC 50
VITAMIN E	28 μ M
U-74006F (tirilizad)	8 μ M
METHYLPREDNISOLONE	>100 μ M

Fig. 3. Chemical structure of a 21-aminosteroid (top). Inhibition of iron dependent lipid peroxidation by vitamin E, a 21-aminosteroid and the glucocorticoid methylprednisolone (bottom). [References from Hall *et al.*, 1991, and McCall *et al.*, 1989].

showing strong antioxidant activity (Figure 3). These molecules do not bind to intracellular glucocorticoid receptors, and they are devoid of classical glucocorticoid properties, including the unwanted secondary effects found in chronic glucocorticoid therapy [Hall et al, 1993; De Nicola, 2000].

21-Aminosteroids are highly hydrophobic compounds inserting in the lipid phase of cell membranes [McCall et al, 1996]. Thus, they are ideally suited to inhibit lipid peroxidation, because they scavenge free oxygen radicals and stabilize membranes [Braugher et al, 1984; Hall et al, 1993]. Based on previous studies showing that oxygen-derived free radicals produced neuronal death in cases of CNS injury, stroke, and neurodegenerative diseases, pharmacological trials employing 21-aminosteroids revealed strong neuroprotection of these substances in models of experimental CNS injury, hypoxia and ischemia [Hall et al, 1993; Beck and Bielenberg, 1991]. In our laboratory, we administered the 21-aminosteroid U-74389F to Wobbler mice, aiming to investigate the potential of this compound to change existing spinal cord neuropathology. Our work was focused in three molecules abnormally expressed by the spinal cord of ALS patients and Wobbler mice. These include neuronal NOS, neuronal GAP-43 and astrocyte GFAP.

Effects of a 21-aminosteroid on GFAP-expressing astrocytes

GFAP is an intermediate filament protein which participates in growth of astrocyte processes [Eng, 1985; Wilkin et al, 1990], regulation of motility, cell shape and relation of the astrocytes with surrounding neurons [Laping et al, 1994]. GFAP has also become a useful marker for astrocytes in immunocytochemical studies. Our experiments demonstrated that sc implantation of a 50 mg pellet of U-74389F for 4 days to Wobbler mice increased the size and/or number of glial cells showing GFAP immunoreactivity in the spinal cord and internal capsule. Quantitation of the changes using computerized densitometry reinforced the view that U-74389F effects on GFAP-positive astrocytes occurred in spite

of a preexisting astrocytosis (Figure 4). Significant up-regulation of GFAP under U-74389F therapy was observed in cells localized in the ventral and dorsal horns (Figure

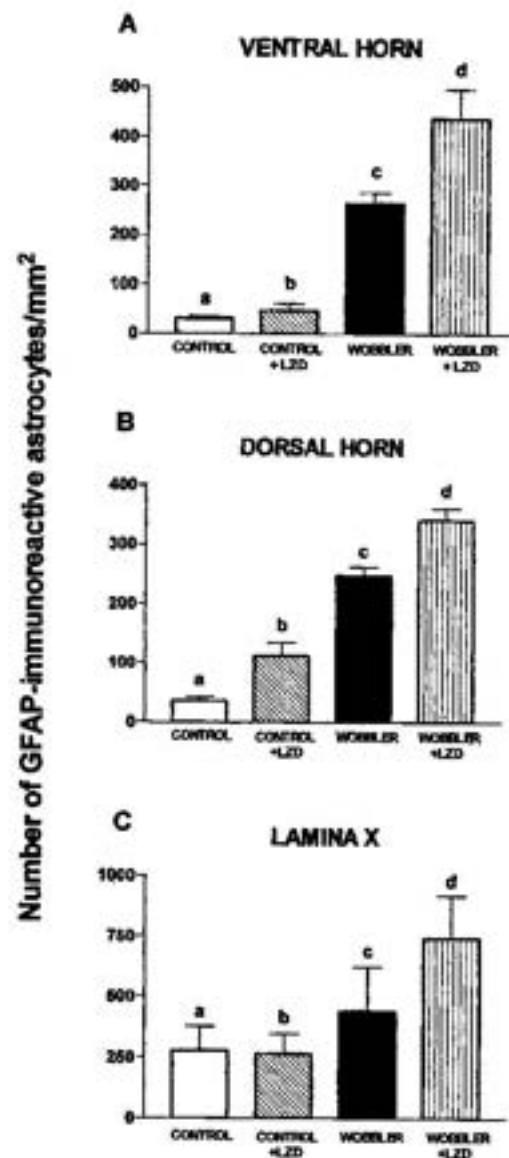


Fig. 4. Number of GFAP immunoreactive astrocytes/mm² in gray matter areas of the spinal cord of control mice (open columns), controls receiving the 21-aminosteroid Lazaroid U-74389F (LZD; cross hatched columns), Wobbler mice (black column), and Wobblers receiving U-74389F (dotted column). (A) Ventral horn; (B) dorsal horn; (C) central canal or lamina X. Results represent the mean \pm S.E. Statistical significance: (A) c vs a, $p < 0.01$; c vs d, $p < 0.01$; (B) a vs b, $p < 0.05$; a vs c, $p < 0.01$; c vs d, $p < 0.01$; (C) a vs b, NS; c vs d, NS (ANOVA and Duncan test).

4) without changes in white matter astrocytes found in the ventrolateral funiculus and corticospinal tract of the spinal cord [González Deniselle *et al.*, 1996].

Although the biological significance of this finding and its relation to neuronal sickness of Wobbler mice may be open to discussion, we interpret it in terms of the known beneficial role of astrocytes on neuronal function. Thus, neuronal damage caused by ischemia, toxins, excitotoxicity, injury and neurodegeneration is first followed by astrocyte hypertrophy and then hyperplasia with GFAP hyperexpression [Norenberg, 1994]. In this way, stimulated astrocytes could be better suited to provide neuroprotection. For a number of years, it has been realized that among other properties, astrocytes take up excess glutamate and potassium released during neurotransmission, provide neurons with trophic factors, glucose and lactate used for energy purposes and even play a role in myelination of axons [Magistretti and Pellerin, 1999; Liedtke *et al.*, 1996]. Thus, stimulation of the preexisting astrocytosis would be a positive effect, in contrast to traditional concepts which associate astrocytosis with increased pathology and inhibition of neuronal regeneration [McKeon *et al.*, 1991]. Recently, Ikeda *et al.* [2000] treated Wobbler mice with T-588, a non-steroidal antioxidant. By the time T-588 enhanced motor function, muscle parameters and survival time of the affected animals, it also stimulated astrocytosis. These data, in conjunction with ours, support that some antioxidant neuroprotectants also up-regulate astrocyte number and/or function.

Effects of a 21-aminosteroid on NOS (NADPH-diaphorase)

We have already discussed existing reports which postulate that free radicals play a substantial role in Wobbler mice neurodegeneration. Thus, increased activity of NOS was noted from determination of NADPH-diaphorase histochemistry [Clowry and McHanwell, 1996]. Also, treatment of Wobbler mice with the antioxidants OPC-14117 [Abe *et al.*, 1997], n-acetylcysteine [Henderson *et al.*, 1996], lecythinated superoxide dismutase [Ike-

da *et al.*, 1995] T-588 [Ikeda *et al.*, 2000] or the NOS inhibitor nitroindazol [Ikeda *et al.*, 1998], corrected the motor dysfunction of the animals. Possibly, this beneficial action resulted from blockage of free radical damage to motoneurons.

In confirmation with the report of Clowry and McHanwell [1996], we also found that Wobbler mouse spinal cord showed a sizeable amount of neurons giving strong histochemical staining for NADPH-diaphorase [González Deniselle *et al.*, 1999a]. In certain sections, positive motoneurons were surrounded by a complex network of fibres and processes strongly stained for NADPH-diaphorase. Treatment of Wobblers with the 21-aminosteroid U-74389F during 4 days, significantly reduced NADPH-diaphorase activity in motoneurons of the ventral horn (Figure 5). NO is a powerful neurotoxic agent, contributing to pathogenesis of neuronal death [Resink, 1996]. In our case, increased production of NO may contribute to neurodegeneration in the Wobbler spinal cord, considering that after coupling with superoxide anion, NO forms peroxynitrites. Lipids, proteins and DNA are preferred targets of the oxidative cascade originated by the excess NO. In the Wobbler spinal cord, this cycle may be suppressed by

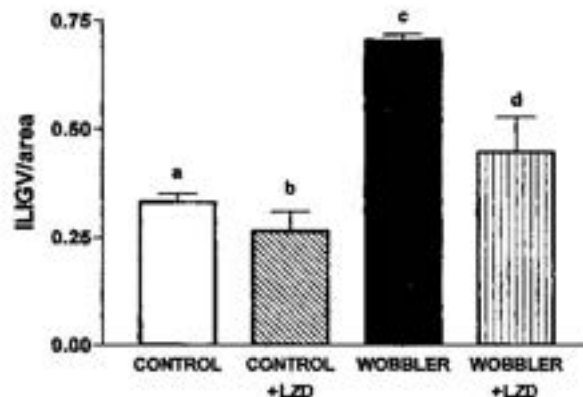


Fig. 5. Quantitative analysis of NADPH-diaphorase histochemistry in ventral horn motoneurons. Results represent the reaction intensity (ILIGV/area) in control mice (CONTROL), controls receiving U-74389F (CONTROL + LZD), Wobbler mice (WOBBLER) and Wobblers receiving U-74389F (WOBBLER + LZD). Significance: a vs c: $p < 0.01$; c vs d: $p < 0.01$.

antioxidants such as U-74389F, because this compound reduces the activity of NADPH-dia-phorase (NOS), the enzyme responsible for NO overproduction.

Effects of a 21-aminosteroid on GAP-43

A third protein with abnormal expression in Wobbler spinal cord (as well as in patients with ALS) is the growth-associated protein or GAP-43. Physiologically, this phosphoprotein is found in high concentrations in embryonic life, during synaptogenesis and in axons regenerating after injury [Benowitz et al, 1997]. Usually, the high expression of GAP-43 subsides when growing axons reach their target or myelinate [Oestreicher et al, 1997]. However, in the normal adult spinal cord, moderate levels of GAP-43 are found in axon terminals of the dorsal horn, in the corticospinal tract and in the area surrounding the central canal Lamina X but is absent from motoneurons [Curtis et al, 1993a]. However, GAP-43 is up-regulated in motoneurons after experimental spinal cord trauma [Curtis et al, 1993b]. In humans, ventral horn motoneurons are devoid of GAP-43 but high mRNA levels appeared in ALS patients [Parhad et al, 1992]. In cases of Alzheimer's disease, aberrant expression of GAP-43 was found in astrocytes [De la Monte et al, 1995], whereas abnormal expression also occurred in the hippocampus and gyrus cinguli of schizophrenic patients [Blennow et al, 1999].

In Wobbler mouse spinal cord, an intense expression of protein and mRNA corresponding to GAP-43 was found in ventral horn neurons (Figures 6 and 7) [González Deniselle et al, 1999a; 1999b]. In the mRNA studies, a synthetic ³⁵S-labeled oligonucleotide complementary to mouse GAP-43 mRNA [Clowry and McHanwell, 1996] was hybridized to spinal cord sections. Computer-assisted image analysis was used to quantitate the number of grains per cell, a measurement proportional to the amount of cytoplasmic mRNA [Mitsumoto and Gambetti, 1986]. As observed in Figure 7, GAP-43 mRNA was almost undetectable in control mice motoneurons, in contrast with the intense expression in Wobbler motoneurons. 21-Aminosteroid treat-

ment significantly depressed the abnormal levels of GAP-43 mRNA. In the same direction, the 21-aminosteroid also reduced the high expression of GAP-43 protein [González Deniselle et al, 1999a]. These effects were not exclusive of the antioxidant steroid, since corticosterone treatment led to identical changes. We believe that in order to down-regulate GAP-43 mRNA and protein, corticosterone employed a non-genomic mechanism for two reasons: first, the GAP-43 gene lacks a steroid-responsive element [Chao et al, 1998]. Second, antioxidant activity is not exclusive of 21-aminosteroids, but of glucocorticoids as well [Hall, 1993].

As was the case with NOS, it is not unreasonable to hypothesize that down-regulation of GAP-43 mRNA and protein may be closely related to steroid neuroprotection. A priori, increased accumulation of GAP-43 protein may be caused by retardation of its transport from perikaryon to the axon growth cone [Benowitz et al, 1993]. However, the severe muscle atrophy typical of Wobbler mice suggests, as an alternative mechanism, that muscle denervation could originate the GAP-43 hyperexpression. Degenerating motoneurons would react to denervation and synaptic loss by compensatory but useless strengthening of the remaining synapsis. Hyperexpression of GAP-43 may be of little help, considering that abnormal synaptic contacts including collateral synaptogenesis and hypomyelination are common companions of degeneration in Wobbler mice and ALS patients [Benowitz et al, 1997; Kapfhammer et al, 1994; Parhad et al, 1992]. Actually, in these cases as well as in other neurophatologies (Alzheimer's disease and schizophrenia) GAP-43 may be a marker for neurodegeneration.

Therefore, down-regulation of GAP-43 mRNA and protein expression with the 21-aminosteroid could indicate a slow down of the exaggerated response to muscle degeneration. This assumption is supported by the strong myogenic activity displayed by 21-aminosteroids [Metzinger et al, 1992] and by data of Oestreicher et al [1997] who showed that the level of motoneuronal GAP-43 is highly dependent on muscle activity. Therefore, enhancement of muscle trophism could

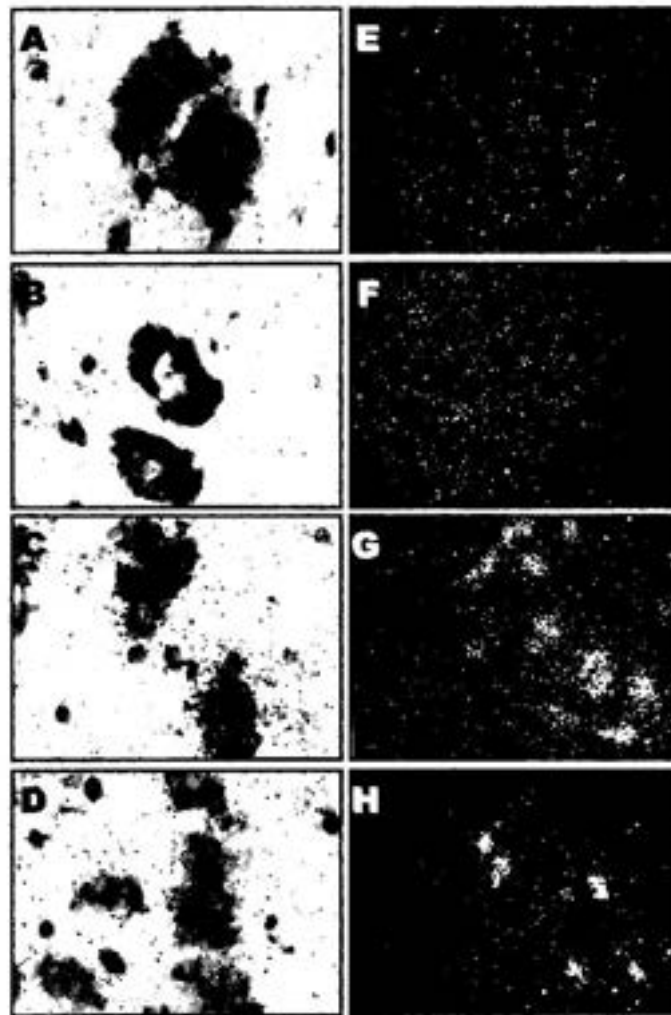


Fig. 6. Photomicrographs representing in situ hybridization for GAP-43 mRNA in the spinal cord ventral horn from control mouse (A, bright field; E, dark field); control mouse treated with the lazaroid U-74389F (B, bright field; F, dark field); Wobbler mouse (C, bright field; G, dark field); Wobbler mouse treated with the lazaroid U-74389F (D, bright field; H, dark field). Modified from González Deniselle [1999b].

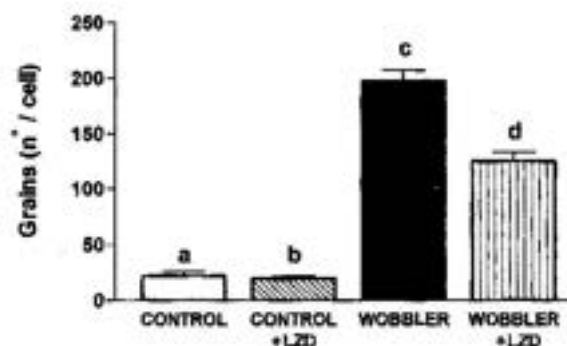


Fig. 7. Results of in situ hybridization for GAP-43 mRNA in ventral horn motoneurons from control mice (open column), controls receiving U-74389F (cross-hatched column), Wobbler mice (dark column) and Wobblers receiving U-74389F (vertical line column). Significant differences using ANOVA and Newman Keuls post hoc test were demonstrated for c vs a ($p < 0.001$) and c vs d ($p < 0.001$).

counteract GAP-43 hyperexpression. Eventually, this hypothesis does not preclude direct effects of the 21-aminosteroid on the motoneuron to stop or delayed neurodegeneration based on its antioxidant activity.

Other effective treatments for Wobbler mice

Many literature reports testify the beneficial effects of trophic factors and neurotrophins to delay disease progression in Wobbler mice. In this sense, brain-derived neurotrophic factor (BDNF) and ciliary neurotrophic factor (CNTF) enhanced muscle trophism, increase the number of myelin fibres and as a whole improved the clinical status of the animals [Mitsumoto et al, 1994], whereas insulin growth factor - 1 (IGF-1) increased muscle fiber diameter, muscle strength and histochemical parameters of muscle trophism [Hantai et al, 1991]. Basic fibroblast growth factor (bFGF) was able to increase muscle strength and reduce limb spasticity [Ikeda et al, 1991]. Finally, interleukin 6 (IL-6) prevented denervation and motoneuron degeneration [Ikeda et al, 1996].

These effects of trophic factors resemble the beneficial activity of antioxidants, including OPC-14117, lecithinized SOD1, n-acetylcysteine, 7-nitroindazol and T-588 [Abe et al, 1997; Ikeda et al, 1995, 1998; 2000; Henderson et al, 1996]. An intriguing possibility would be that trophic factor neuroprotection enhances natural antioxidant defenses. If true, common intracellular signaling pathways could be modulated by trophic factors and antioxidants, resulting in powerful neuroprotection in this mouse model of ALS.

Conclusions

Together with SOD1 transgenics, Wobbler mice constitute valuable models for the study of familial and sporadic forms of ALS, respectively. In the case of Wobbler mice, changes of spinal cord neurochemistry and muscle electrophysiology in conjunction with clinical data, demonstrated the usefulness of several pharmaceutical compounds to delay

neurodegeneration. Among them, antioxidant steroids are molecules changing spinal cord neurochemistry in a positive way, besides being devoid of major secondary effects. Their actual value for human studies needs to be further investigated. In experimental animals, further studies need to be employed at the final and at the presymptomatic stages of neurodegeneration. Furthermore, considering that other types of steroid hormones also bring neuroprotection, trials in this and other animal models of motoneuron disease are worth attempting. In this connection, it should be considered that the spinal cord constitutes a target of steroid hormones, expressing in a regional and cell-specific fashion receptors for androgens, progesterone, adrenal steroids and estrogens [De Nicola, 1993]. These receptors, as well as other recognized steroid non-genomic mechanisms, may provide the cellular basis of steroid neuroprotection in future investigations employing animal models of motoneuron disease.

Acknowledgements

This work was supported by grants from CONICET (PIP 4103 and PEI 03228/98), University of Buenos Aires (MT13), FONCYT (BID 802 OC AR PICT 97 05-00438), Fundación Barceló (Buenos Aires), Fundación Peruilh and Beca Ramón Carrillo-Arturo Oñativia from the Minister of Health of Argentina.

References

- Abe K., Morita S., Kikuchi T., Itoyama Y.: Protective effect of a novel free-radical scavenger, OPC-14117, on wobbler mouse motor neuron disease. *J. Neurosci. Res.* 48: 63-70 (1997).
- Ait-Ikhlef A., Hantaz-Ambroise, D., Henerson, C.E., and Rieger, F.: Influence of factors secreted by Wobbler astrocytes on neuronal and motoneuronal survival. *J. Neurosci. Res.* 59: 100-106 (2000).
- Amyotrophic lateral sclerosis: Hope through research. *National Institutes of Health Publication No. 84-916*, Bethesda, Maryland (1984).

- Beck T., and Bielenberg, G.W.: The effects of two 21-aminosteroids on overt infarct size 48 hours after middle cerebral artery occlusion in the rat. *Brain Res.* 560: 159-162 (1991).
- Benowitz L.I. and Routtenberg A. (1997): GAP-43: an intrinsic determinant of neuronal development and plasticity. *TINS* 20: 84-91 (1997).
- Blennow K., Bogdanovic N., Gottfries, C-G., and Davidsson, P.: The growth-associated protein GAP-43 is increased in the hippocampus and in the gyrus cinguli in schizophrenia. *J. Mol. Neurosci.* 13: 101-109 (1999).
- Bradley W.G.: Overview of motor neuron disease: classification and nomenclature. *Clin. Neurosci.* 3: 323-326 (1996).
- Braughler J.M. and Hall E.D.: Effects of multi-dose methylprednisolone sodium succinate administration on injured cat spinal cord neurofilament degradation and energy metabolism. *J. Neurosurg.* 61: 290-295 (1984).
- Chao H.M., Sakai R.R., Ma M.Y., McEwen B.S.: Adrenal steroid regulation of neurotrophic factor expression in the rat hippocampus. *Endocrinology* 139: 3112-3118 (1998).
- Clowry G.J. and McHanwell S.: Expression of nitric oxide synthase by motor neurons in the spinal cord of the mutant mouse wobbler. *Neurosci. Lett.* 215: 177-180 (1996).
- Cohen G., and Author A.P.: Pathology of Oxygen, Academic Press, New York (1982).
- Cudkovic M.E., and Brown R.H.: Amyotrophic lateral sclerosis and related motor neuron diseases. En: Jameson, J.L., y col. "Principles of Molecular Medicine", Humana Press, 907-911 (1998).
- Curtis R., Averill S., Priestley J.V., Wilkin G.P.: The distribution of GAP-43 in the normal spinal cord. *J. Neurocytol.* 22: 39-50 (1993a).
- Curtis R., Green D., Lindsay R.M., Wilkin G.P.: Up-regulation of GAP-43 and growth of axons in rat spinal cord after compression. *J. Neurocytol.* 22: 51-64 (1993b).
- De la Monte S.M., Ng S-C. and Hsu D.W.: Aberrant GAP-43 gene expression in Alzheimer's disease. *Am. J. Pathol.* 147: 934-946 (1995).
- De Nicola, A.F.: Steroid hormones and neuronal regeneration. In: "Advances in Neurology" (Seil, F.J., ed.), Raven Press, New York, vol. 52: pp. 199-206 (1993).
- De Nicola A.F.: Fisiología de la corteza suprarrenal, en Houssay B. y Cingolani H., *Fisiología Humana de Houssay*, ed. El Ateneo Buenos Aires, 51: 657-670 (2000).
- Deng Y.P., Li X.S., Zhang S.H., and Vacca-Galloway L.L.: Changes in receptor levels for tyrotrophin releasing hormone, serotonin, and substance P in cervical spinal cord of Wobbler mouse: a quantitative autoradiography study during early and late stages of the motoneuron disease. *Brain Res.* 725: 49-60 (1996).
- Dubrovsky A.L., and Sica R.E.: Current treatment pathways in ALS: a South American perspective. *Neurology* 53: 8 Suppl 5, S11-6 (1999).
- Duchen L.W., Falconer D.S. and Strich S.J.: Hereditary progressive neurogenic muscular atrophy in the mouse. *J. Physiol. (London)* 183: 53P-55P (1965).
- Duchen L.W., and Strich S.J.: An hereditary motor neurone disease with progressive denervation of muscle in the mouse: the mutant "Wobbler". *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry* 31: 535-542 (1968).
- Enfors P.A., Henschen, P.F., Olson L., and Persson H.: Expression of nerve growth factor receptor mRNA is developmentally regulated and increase after axotomy in rats spinal cord motoneurons. *Neuron* 2: 1605-1613 (1989).
- Eng L.F.: Glial fibrillary acidic protein (GFAP): the major protein of glial intermediate filaments in differentiated astrocytes. *J. Neuroimmunol.* 8: 203-214 (1985).
- Fizman M.L., Borodinsky L.N., Ricart K.C., Sanz O.P., Sica R.E.: Cu/Zn superoxide dismutase activity at different ages in sporadic amyotrophic lateral sclerosis. *J. Neurol. Sci.* 162: 34-37 (1999).
- González Deniselle M.C.; González S.; Piroli G.; Lima A. and De Nicola A.F.: The 21-Aminosteroid U-74389F increases the number of glial acidic protein-expressing astrocytes in the spinal cord of control and wobbler mice. *Cellular and Molecular Neurobiology* 16: 61-72 (1996).
- González Deniselle M.C.; González S.L, Lima, A., Wilkin G. and De Nicola A.F.: The 21-aminosteroid U-74389F attenuates hyperexpression of GAP-43 and NADPH-Diaphorase in the spinal cord of Wobbler mouse, a model for Amyotrophic Lateral Sclerosis. *Neurochem. Res.* 24: 1, 1-8 (1999a).
- González Deniselle M.C., Grillo C., González S., Roig, P. and De Nicola, A.F.: Evidence for down-regulation of GAP-43 mRNA in Wobbler mouse spinal motoneurons by Corticosterone and a 21-aminosteroid. *Brain Research* 841: 78-84 (1999b).
- González Deniselle M.C.; Lavista Llanos S., Ferrini M., Lima A., Roldán A. and De Nicola

- A.F.: In vitro differences between astrocytes of control and Wobbler mice spinal cord. *Neurochem. Res.* 24: 1535-1541 (1999c).
- Gurney M.E., Pu H., Chiu A.Y., Dal Canto M.C., Polchow C.Y., Alexander D.D., Caliendo J., Hentati A., Kwon Y.W., Deng H.X, Chen W., Zhai P., Sufit R.L., Siddique T.: Motor Neuron Degeneration in Mice that Express a Human Cu,Zn Superoxide Dismutase Mutation. *Science* 264: 1772-1775 (1994).
- Hall E.D.: The neuroprotective pharmacology of methylprednisolone. *J. Neurosurg.* 76: 13-22 (1992).
- Hall E.D.: Neuroprotective actions of glucocorticoid and nonglucocorticoid steroids in acute neuronal injury. *Cell. Mol. Neurobiol.* 13: 415-432 (1993).
- Hantai D., Akaaboune M., Lagord C., Murawsky M., Houenou L.J., Festoff B.W., Vaught J.L., Rieger F., Blondet: Beneficial of insulin-like growth factor-I on wobbler mouse motoneuron disease. *J. Neurol. Sci.* 129 (Suppl): 122-126 (1995).
- Hantaz-Ambroise D., Blondet B., Murawsky M., Rieger F.: Abnormal astrocyte differentiation and defective cellular interactions in wobbler mouse spinal cord. *J. Neurocytol.* 23: 179-192 (1994).
- Hantaz-Ambroise D., Cambier D., Ait-Ikhlef A., Parvy Ph., Murawsky M., and Rieger F.: Excess Extracellular and Low intracellular Glutamate in Poorly Differentiating Wobbler Astrocytes and Astrocyte Recovery in Glutamine-Depleted Culture Medium. *J. Neurochem.* 65: 1199-1204 (1995).
- Henderson C.E.: Role of neurotrophic factors in neuronal development. *Curr. Opin. Biol.* 6: 64-70 (1986).
- Henderson J.T., Javaheri M., Kopko S. and Roder J.C.: Reduction of lower motor neuron degeneration in wobbler mice by n-acetyl-l-cysteine. *J. Neurosci.* 16: 7574-7582 (1996).
- Ikeda K., Kinoshita M., Iwasaki K., Tayaga N., Shiojima T.: Lecithinized superoxide dismutase retards wobbler mouse motoneuron disease. *Neuromusc. Disord.* 5: 383-393 (1995).
- Ikeda K., Kinoshita M., Tagaya N., Shiojima T., Taga T., Yasukawa K., Suzuki H., Okano A.: Coadministration of interleukin-6 (IL-6) receptor delays progression of wobbler mouse motor neuron disease. *Brain Res.* 726 (1-2): 91-97 (1996).
- Ikeda K., Iwasaki Y., Kinoshita M.: Neuronal nitric oxide synthase inhibitor, 7-nitroindazole, delays motor dysfunction and spinal motoneuron degeneration in the wobbler mouse. *J. Neurol. Sci.* Sep 18, 160: 1, 9-15 (1998).
- Ikeda, K., Iwasaki, Y., Kinoshita, M., Marubuchi, S., and Ono, S.: T-588, a novel neuroprotective agent, delays progression of neuromuscular dysfunction in wobbler mouse motoneuron disease. *Brain Res.* 858: 84-91 (2000).
- Jones, K.A., Drenlger, S.M., and Oblinger, M.: Gonadal steroid regulation of growth associated protein GAP-43 mRNA expression in axotomized hamster facial motor neurons. *Neurochem. Res.* 22: 1367-1374 (1997).
- Junier M.P., Couplier M., Le Forestier N., Cadusseau J., Suzuki F., Peschanski M., and Dreyfus P.A.: Transforming growth factor alpha (TGF alpha) expression in degenerating motoneurons of the murine mutant Wobbler: a neuronal signal for astrogliosis? *J. Neurosci.* 14: 4206-4216 (1994).
- Junier M.P., Legendre P., Esguerra C.V., Tinel M., Couplier M., Dreyfus P.A., and Mathias Bahr: Regulation of growth factor gene expression in degenerating motoneurons of the murine mutant wobbler: A cellular patch sampling/RT-PCR study. *Molecular and Cellular Neuroscience* 12: 168-177 (1998).
- Kapfhammer J.P., Schwab M.E.: Inverse patterns of myelination and GAP-43 expression in the adult CNS: neurite growth inhibitors as regulators of neuronal plasticity. *J. Comp. Neurol.* 340: 194-206 (1994).
- Kaupmann K., Simon-Chazottes, D., Guener, J.L., and Jokusch H.: Wobbler, a mutation affecting motoneuron survival and gonadal functions in the mouse, maps to proximal chromosome 11. *Genomics* 13: 39-43 (1992).
- Laage S., Zoberl, G., and Jockusch, H.: Astrocyte overgrowth in the brain stem and spinal cord of mice affected by spinal atrophy, Wobbler. *Dev. Neurosci.* 10: 190-198 (1988).
- Laping N.J., Teter B., Nichols N.R., Rozovsky I., and Finch C.E.: Glial fibrillary acidic protein: regulation by hormones, cytokines, and growth factors. *Brain Pathol.* 1: 259-275 (1994).
- Li, M., Ona, V.O., Guegan, C., Chen, M., Jackson-Lewis, V., Andrews, L.J., Olsewski, A.J., Stieg, P.E., Lee, J.P., Przedborski, S., and Friedlander, R.M.: Functional role of caspase-1 and caspase-3 in an ALS transgenic mouse model. *Science* 288: 335-339 (2000).
- Liedtke W., Edelmann W., Bieri P.L., Chiu F.Ch., Cowan N.J., Kucherlapati R., and Raine

- C.S.: GFAP is necessary for the integrity of CNS white matter architecture and long-term maintenance of myelination. *Neuron* 17: 607-615 (1996).
- Ma W. and Vacca-Galloway L.L.: Reduced branching and length of dendrites detected in cervical spinal cord motoneurons of wobbler mouse, a model for inherited motoneuron disease. *J. Comp. Neurol.* 311: 210-222 (1991).
- Magistretti P.J. and Pellerin L.: Astrocytes couple synaptic activity to glucose utilization in the brain. *News Physiol. Sci.* 14: 177-182 (1999).
- Mc Ewen M. S: The molecular and neuroanatomical basis for estrogen effects in basis for estrogen effects in the central nervous system. *J. Clin. Endocr. Metab.* 84: 1790-1797 (1999).
- McCall J.M., Hall E.D., and Braughler J.M.: A new class of 21-aminosteroids which are useful for stroke and trauma. In *Steroids and Diseases of the Central Nervous System* (R.Capildeo), John Wiley & Sons, Ltd. New York, 69-80 (1989).
- McKeon R.J., Schreiber R.C., Rudge J.S. and Silver J.: Reduction of neurite outgrowth in a model of glial scarring following CNS injury is correlated with the expression of inhibitory molecules on reactive astrocytes. *J. Neurosci.* 11: 3398-3411 (1991).
- Metzinger, L., Passaquin, A-C., Venier, A., Thiriet, N., Warter, J-M., and Poindron, P.: Lazaroids enhance skeletal myogenesis in primary cultures of dystrophin-deficient mdx mice. *J. Neurol. Sci.* 126: 1380145 (1994).
- Mitumoto H. and Gambetti P.: Impaired slow axonal transport in wobbler mouse motor neuron disease. *Ann. Neurol.* 19: 36-43 (1986).
- Mitumoto H., and Bradley W.G.: Murine motor neuron disease (the Wobbler mouse): degeneration and regeneration of the lower motor neuron. *Brain Res.* 105: 811-834 (1982).
- Mitumoto H., Ikeda K., Klinkosz B., Cedarbaum J.M., Wong V., Lindsay R.M.: Arrest of motor neuron disease in wobbler mice cotreated with CNTF and BDNF. *Science* 265: 1107-1110 (1994).
- Muyarama S., Inoue K., Kawakami H., Boudin T.W., and Suzuki, K.: A unique pattern of astrocytosis in the primary motor area in amyotrophic lateral sclerosis. *Acta Neuropathol.* (Berlin) 82: 456-461 (1991).
- Norenberg M.D.: Astrocytes responses to CNS Injury. *J. Neuropathol. Exp. Neurol.* 53: 213-220 (1994).
- Oestreicher A.B., De Graan P.N.E., Guispen W.H., Verhaagen J. and Schrame L.H.: B-50, the growth associated protein-43: Modulation of cell morphology and communication in the nervous system. *Progress in Neurobiology* 53: 627-686 (1997).
- Parhad I.M., Oishi R., Clark A.W.: GAP-43 gene expression is increased in anterior horn cells of amyotrophic lateral sclerosis. *Ann. Neurol.* 31: 593-597 (1992).
- Popper P., Farber D.B., Micevych P.E., Minoofar K. and Bronstein J.M.: RTPM-2 expression and tunel staining in neurodegenerative diseases: studies in wobbler and rd mice. *Exp. Neurol.* 143: 246-254 (1997).
- Price D.L., Cleveland, D.W., and Koliatsis, V.E.: Motor neuron disease and animal models. *Neurobiol. Dis.* 1: 3-11 (1994).
- Resink A., Dawson V.L. and Dawson T.D.: Nitric oxide synthase inhibitors. *CNS Drugs* 6: 351-367 (1996).
- Rosen D.R., Siddique, T., Patterson, D., Figlewicz, D.A. Sapp, P., et al: Mutations in Cu-Zn superoxide dismutase gene are associated with familial amyotrophic lateral sclerosis. *Nature* 362: 59-62 (1993).
- Schumacher, M., Akwa, I., Guennoun, R., Robert, F., Labombarda, F., Desarnaud, F., Robel, P., De Nicola, A.F., and Baulieu, E.E.: Steroid synthesis and metabolism in the nervous system: trophic and protective effects. *J. Neurocytology* 29: 307-326 (2000).
- Smith M.E., Hughes S.: POMC neuropeptides and their receptors in the neuromuscular system of wobbler mice. *J. Neurol. Sci.* 124: 56-58 (1994).
- Spooren, W.P.J.M., and Hengerer B: DNA laddering and caspase 3-like activity in the spinal cord of a mouse model of amyotrophic lateral sclerosis. *Cell. Mol. Biol.* 46: 63-69 (2000).
- Wilkin G.P., Marriot D.R. and Cholewinski A.J.: Astrocyte heterogeneity. *TINS* 13: 43-46 (1990).
- Yung K.K.L., Tang F., and Vacca-Galloway L.L.: Changes of neuropeptides in spinal cord and brain stem of Wobbler mouse at different stages of motoneuron disease. *Neuroscience* 50: 209-222 (1982).

Manuscrito recibido y aceptado en septiembre de 2001.

ACTIVIDAD BIOLÓGICA DE METABOLITOS SECUNDARIOS DE PLANTAS FRENTE A *TENEBRIO MOLITOR* L. (COLEOPTERA: TENEBRIONIDAE)

Oscar S. Giordano*, Marta E. Sosa y Carlos E. Tonn

INTEQUI (CONICET - Facultad de Química, Bioquímica y Farmacia, Universidad Nacional de San Luis). Chacabuco y Pedernera, (5700) San Luis, Argentina. *E-mail: ogiord@unsl.edu.ar.

Resumen

Actualmente el estudio de la interacción entre metabolitos secundarios de plantas e insectos es un importante aspecto de la ecología química. Es conocido que las plantas han desarrollado elaborados mecanismos de defensa contra los ataques de insectos. Esta situación da lugar al interés creciente por conocer nuevos productos biológicamente activos procedentes del reino vegetal.

Como parte de nuestras investigaciones sobre productos naturales de plantas, se ha realizado un estudio sistemático de las interacciones aleloquímicas entre compuestos provenientes de las familias Asteraceae y Labiatae frente a larvas de *Tenebrio molitor* L.

Se han determinado relaciones entre la estructura y la actividad antialimentaria de furanoditerpenos de núcleo clerodano, encontrándose que sistemas γ -lactona- α,β -insaturados o sistemas oxiranos sobre C-4-C-18, aciloxi en C-19, C-6 y C-12, son necesarios para elicitar la actividad antialimentaria y repelente.

Se ha evaluado la actividad tóxica de lactonas sesquiterpénicas y la incidencia de fenilpropanoides y alilfenoles sobre el desarrollo de *T. molitor*. Finalmente, hemos estudiado el efecto aleloquímico de un grupo de flavonoides, estableciéndose una relación entre la bioactividad y la presencia de sistemas tipo catecol en el anillo B.

Podemos concluir que *T. molitor* L. es un insecto sensible a productos naturales de plantas.

Palabras clave: Aleloquímicos; lactonas sesquiterpénicas; diterpenos; fenilpropanoides; flavonoides; *Tenebrio molitor*.

Abstract

Nowadays the study about allelochemical interactions between insects and plant-secondary metabolites is an important subject in chemical ecology. It has been demonstrated that plants have developed highly elaborate chemical defense against insect attacks. This fact provides a rich source of plant biologically active compounds.

As part of our research on plant natural products, we started a systematic investigation about the bioactivities of secondary metabolites and chemical derivatives from Asteraceae and Labiatae families toward *Tenebrio molitor* L. larvae.

Trabajo presentado con motivo de la entrega del premio "Venancio Deulofeu" en Química de Productos Naturales, al Dr. Oscar S. Giordano, el 12 de noviembre de 1999.

A structure-antifeedant activity relationship study on several clerodane type diterpenes has been carried out. Results suggested that among the furanditerpenes tested, the possession of an α,β -unsaturated- γ -lactone moiety or a C-4-C-18 epoxy with C-19 acetyloxy or C-12 acyloxy substitution are essential for imparting both, antifeedant and repellent activities.

The toxicity of sesquiterpene lactones was determined. The comparison showed that both, conjugated α -methylene- γ -butirolactone system and α,β -cyclopentenone ring were important for the allelochemical activity.

On the other hand bioactivities of phenylpropanoids, allylphenols and chemical derivatives on the larvae-pupae metamorphosis of the mealworm aforementioned have been examined. Finally the allelochemical effect of a flavonoid series was studied; the observed results showed that the more active compounds exhibited a cathecol system on B-ring.

We can conclude that *T. molitor* L. is a plant-natural products sensitive insect at the larvae stage.

Key words: Allelochemicals; sesquiterpene lactones; diterpenes; phenylpropanoids; flavonoids; *Tenebrio molitor*.

Introducción

La producción de metabolitos secundarios por parte de plantas superiores ha merecido distintas interpretaciones y en el pasado fueron considerados como productos de deshecho del metabolismo primario y sin importancia vital para las mismas. Sin embargo, hacia finales de la década del cincuenta se sugirió que este tipo de compuestos estaría relacionado con el comportamiento alimentario de los insectos [Fraenkel, 1959].

En la actualidad es aceptado el variado rol que estos productos desempeñan en la interacción planta-insecto, actuando como tóxicos, repelentes, inhibidores del desarrollo o agentes antialimentarios [Harborne, 1988, 1991, 1993; Ley, 1990; Nahrstedt, 1988]. Así es posible suponer que la coevolución de insectos y plantas ha dado origen a una serie de estrategias defensivas por parte de éstas que han afectado la evolución de los primeros.

La necesidad de proteger fuentes alimentarias del ataque de insectos perjudiciales mediante el uso de medios ecológicamente aceptables, ha orientado las investigaciones a la búsqueda de productos naturales modificadores del comportamiento de insectos plaga. En este camino, las investigaciones interdisciplinarias ya han aportado a los productores sistemas para la protección de cultivos

basados en el control de la alimentación de los insectos (*antifeedants*) tales como el tetranortriterpeno azadiractina (extractos de Neem), warburganal y amidas del ácido crisantémico [Frazier & Chyb, 1995].

La evaluación de una determinada actividad biológica propia de una familia de compuestos estructuralmente relacionados, permite profundizar en el conocimiento de la relación estructura-actividad. Esta información puede ser utilizada en la programación de síntesis orgánicas de productos de selectividad comprobada, de bajo impacto ambiental y accesibles desde un punto de vista económico.

Actividad antialimentaria de neo-clerodanos

Entre las diversas bioactividades elicitadas por los metabolitos secundarios de plantas frente a larvas de insectos (*aleloquímicos*) se encuentra su influencia en el comportamiento alimentario de los mismos. Productos que afectan a esta variable fisiológica son clasificados en dos grandes grupos: *fagoestimulantes* e *inhibidores de la alimentación*. En relación a los segundos, se utilizan, a veces en forma confusa, los términos *deterrente*, *antialimentario*, *repelente gustatorio* e *inhibidores de la alimentación*. En la práctica las expresiones fagoestimulante y antialimen-

tario son los términos más comúnmente utilizados. Sin embargo, estas expresiones no pueden ser aplicadas en forma categórica a un producto químico ya que su comportamiento dependerá, entre otras variables, de la concentración, las condiciones del ensayo, del estado fisiológico del insecto y especie utilizada en la evaluación. Tan es así que un producto, dependiendo de las condiciones señaladas, puede actuar como deterrente, fagoestimulante o no poseer bioactividad detectable alguna [Lewis & van Emden, 1986]. Si bien los diterpenos ocurren asiduamente en la familia Asteraceae son también frecuentes en la familia Labiatae. En el primer caso, el género *Baccharis* y en el segundo los géneros *Ajuga*, *Teucrium*, *Scutellaria* y *Salvia*, resultan ser especialmente ricos en diterpenos de tipo clerodano, **1** (Figura 1) y varios son conocidos por sus propiedades frente a insectos [Merritt & Ley, 1992]. Interesantes resultados en el estudio de la actividad antialimentaria de este tipo de diterpenos han sido alcanzados cuando se ha evaluado esta propiedad frente a larvas de algunos Noctuidos tales como *Spodoptera littoralis*, *S. exempta* y *Heliothis armigera*. En este sentido Ajugarina I, **2**, resultó ser uno de los primeros casos informados de esta actividad [Kubo & Nakanishi, 1979].

Estudios sobre diterpenos de núcleo clerodano procedentes de los géneros *Ajuga* [Belles *et al.*, 1985] y *Teucrium* [Simmonds *et al.*, 1989; Urones *et al.*, 1995] permitieron es-

tablecer relaciones estructura-actividad identificando los grupos funcionales y rasgos estructurales fundamentales para la elicitación del mecanismo antialimentario. En este contexto se ha señalado que la actividad antialimentaria en *neo*-clerodanos se relaciona con un bicyclo *trans*-decalina que presente un sistema *spiro*-epoxi en C-4 y dos grupos acetato en C-6 y C-19. En algunos casos la presencia de un anillo furofurano en la cadena lateral de C-9 coadyuva a la bioactividad mediante fenómenos sinérgicos; sin embargo, análogos sintéticos tales como **3**, incluidos en la Figura 1, no han presentado resultados similares a los alcanzados con los productos naturales.

En nuestro laboratorio estamos abocados desde hace alrededor de veinte años al aislamiento y elucidación estructural de diterpenos del tipo *neo*-clerodano y *ent*-*neo*-clerodano obtenidos en estudios fitoquímicos de especies de los géneros *Baccharis*, *Teucrium* y *Salvia*. Los *neo*-clerodanos **4-6**, que se presentan en Figura 2 fueron aislados de *Baccharis crispa* Sprengel, una Compuesta ampliamente difundida en la región centro-oeste del país [Tonn *et al.*, 1979; Tonn y Giordano, 1980; Ceñal *et al.*, 1997], el diterpeno **7** fue aislado de *Baccharis articulata* H. et A. [Gianello y Giordano, 1982] y este mismo producto conjuntamente con su 6 α -hidroxiderivado, a partir de *Baccharis spicata* (Lam.) Beill. [Gallardo V. *et al.*, 1996]. El diterpeno **10**, con un sistema butanólido en cadena la-

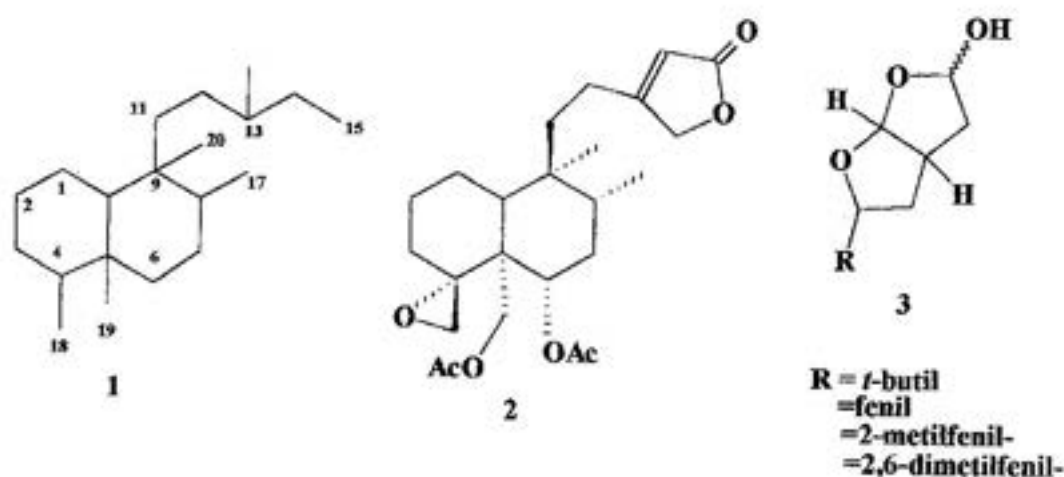


Fig. 1.

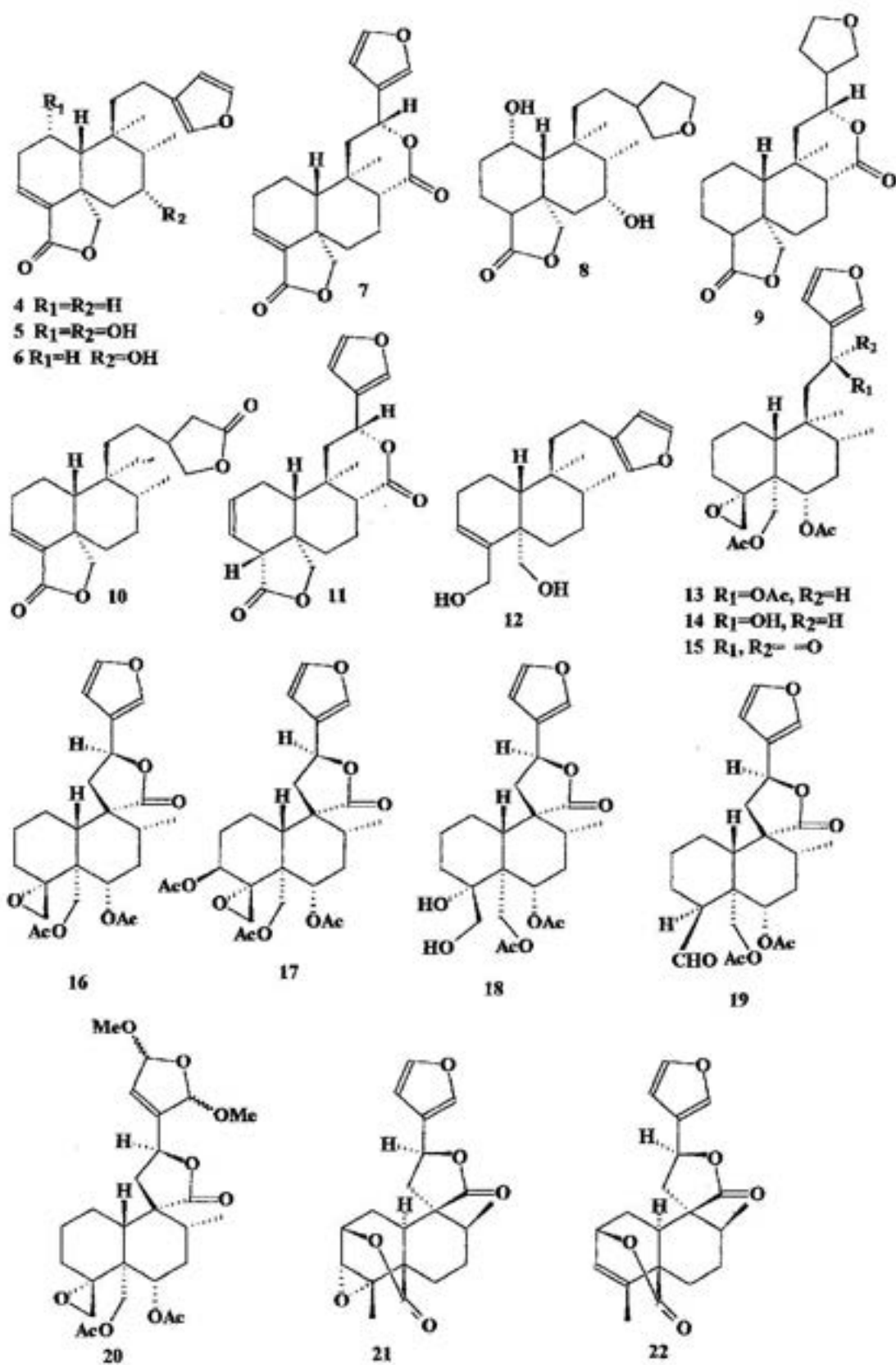


Fig. 2.

teral, fue aislado de partes aéreas de *Baccharis grisebachii* H. A. [Gianello y Giordano, 1989].

Entre los *ent-neo-clerodanos* presentes en extractos de *Salvia reflexa* Hornem., estudiada en nuestro laboratorio, se han aislado salviarina, **11**, y sus 7 α - y 8 β -hidroxide-derivado, además de 7,8-didehidrorhyacofilina, un nuevo 5,6-*seco-clerodano* de esqueleto rhyacofano [Nieto *et al.*, 1996]. Los furanoditerpenos **13** y **16** fueron obtenidos en un estudio fitoquímico realizado sobre la única especie del género *Teucrium* presente en la Región de Cuyo, *T. grisebachii* H. et A. [Tonn *et al.*, 1990], mientras que el producto **17** (12 *epi-teupirina*), conjuntamente con **13** y **16**, fueron aislados como principales componentes diterpénicos de *T. nudicaule* H. proveniente de la región de Antofagasta, Chile [Gallardo V. *et al.*, 1996]. Finalmente, los *ent-neo-clerodanos* **21** y **22**, con un sistema *spiro-lactona* en C-9, fueron obtenidos a partir de hojas y tallos tiernos de *Baccharis artemisioides* H. et A. [Tonn *et al.*, 1988, 1989].

En función de la actividad antialimentaria frente a larvas de *Tenebrio molitor* L., detectada para cada uno de estos productos naturales, se planificaron diversas reacciones de transformación selectiva de grupos funcionales con el objetivo de evaluar su incidencia en la misma. Así, la hidrogenación catalítica (C-Pd, EtOAc, 2.5 atm.) de **5** y **7** permitió disponer de los productos **8** y **9**, respectivamente. La reducción con LiAlH₄-THF a temperatura ambiente condujo al derivado **12** (kingidiol) idéntico al obtenido previamente en nuestro laboratorio por hidrólisis del correspondiente diéster malónico (C-18) y acetato (C-19) [Gianello y Giordano, 1982].

El tratamiento del triacetato **13** con NaH en MeOH durante unos pocos minutos a 0° C, permitió la hidrólisis selectiva del éster en C-12 recuperándose con buen rendimiento el alcohol **14** y la oxidación de éste con reactivo de Jones condujo al 12-ceto derivado **15**.

Sobre el anillo oxirano en C-4-C-18 del furanoditerpeno **16** se practicaron reacciones de apertura: la primera, inducida por BF₃-eterato, dio lugar al diol **18**, mientras que el tratamiento con Et₂O saturado con HCl_(g) condujo al aldehído **19** siguiendo la vía del enol

correspondiente. Finalmente la bromación de **16** en metanol a -20°C, seguida de la solvólisis a 25°C del derivado dibromado, permitió obtener una mezcla de metoxicetales epímeros en C-15 y C-16 [Gallardo V. *et al.*, 1996; Browner Floyd, 1978].

Bioensayos

1. Cálculo del Porcentaje de Inhibición Alimentaria (PIA)

El efecto antialimentario de algunos de los productos presentados en la Figura 2 fue determinado utilizando un método puesto a punto en nuestro laboratorio [Sosa *et al.*, 1994]. El compuesto a ensayar (a una concentración de 100 ppm) se emulsiona en una mezcla de H₂O-MeOH-Me₂CO 90:5:5 conteniendo 0,1 % de Tritón CS-7 con ayuda de ultrasonido [Lidert *et al.*, 1985] y con 100 μ l de esta suspensión se topican rodajas de zanahoria (*Daucus carota* L. var. *sativa* DC) de 2,5 cm de diámetro y 0,5 cm de espesor. Las rodajas control sólo se topican con el solvente. Una vez evaporado el solvente, seis rodajas control y seis experimentales son pesadas y separadamente colocadas en cajas plásticas con veinte larvas del tercer estadio de *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera: Tenebrionidae). Las rodajas son pesadas y renovadas cada 24 hs durante diez días. La actividad es expresada como *Porcentaje de Inhibición Alimentaria* (PIA) [Reed & Jacobson, 1983] según la fórmula:

$$PIA = (\% \text{ consumido en rodajas tratadas}) \times 100 / (\% \text{ consumido en rodajas tratadas} + \% \text{ consumido en rodajas no tratadas})$$

Estos experimentos fueron repetidos ocho veces, por duplicado, para cada compuesto ensayado. Los niveles de significancia estadística se determinaron por ANOVA. Un valor de PIA entre 0 y 35 se considera significativo. A mayor valor de PIA corresponde menor actividad y resultados del orden de 50 señalan carencia de actividad.

2. Ensayo de elección (deterrencia)

Este procedimiento se realiza usando tres rodajas tratadas y tres no tratadas las

que se colocan en cajas plásticas y, en el centro, se ubican veinte larvas. Luego de 24 hs se cuenta el número de larvas ubicadas debajo de cada tipo de rodajas. Los resultados se expresan como *Porcentaje de larvas bajo los discos tratados*. Cada valor es obtenido sobre un promedio de cinco experimentos con dos

repeticiones por compuesto. Los datos observados se tratan por el estadístico χ^2 .

3. Resultados

En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos en el bioensayo realizado para evaluar propiedades antialimentarias de los

Tabla 1

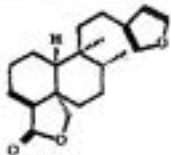
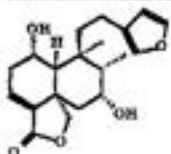
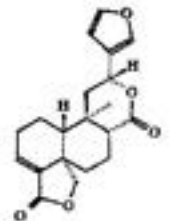
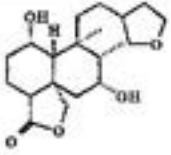
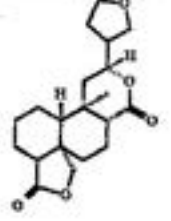
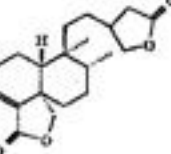
Compuesto		PIA (\pm DS) (%) [*]
4		30.9 (4.8)*
5		31.2 (4.2)*
7		22.6 (4.6)*
8		48.3 (6.6)
9		49.4 (2.80)
10		62.6 (3.8)

Tabla 1 (continuación)

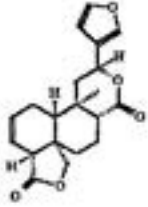
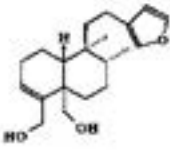
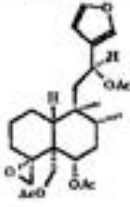
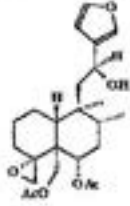
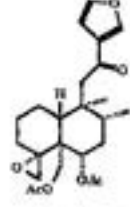
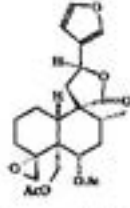
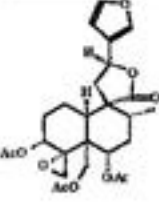
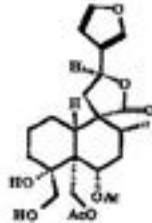
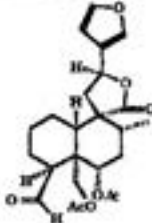
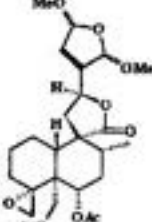
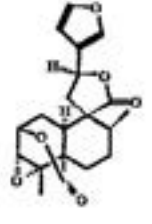
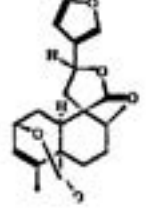
11		47.3 (4.7)
12		48.7 (5.8)
13		31.4 (3.2)*
14		62.5 (3.3)
15		57.9 (5.0)
16		25.0 (3.7)*
17		30.73 (5.2)*

Tabla 1 (continuación)

18		45.0 (4.8)
19		41.0 (4.6)
20		47.3 (3.9)
21		57.0 (3.8)
22		62.7 (6.4)
* Compuestos considerados activos		

distintos clerodanos, tanto naturales como derivados.

Como puede observarse, los diterpenos más activos pertenecen a la serie *neo*-clerodanos y en general podemos dividir a estos compuestos en dos grandes grupos de acuer-

do al tipo de funcionalización presente; en la Figura 3 se presentan los mismos. En una primera aproximación, el primer grupo bioactivo está constituido por aquellos diterpenos que presentan un sistema γ -lactona- α,β -insaturado en el anillo A de la porción decali-

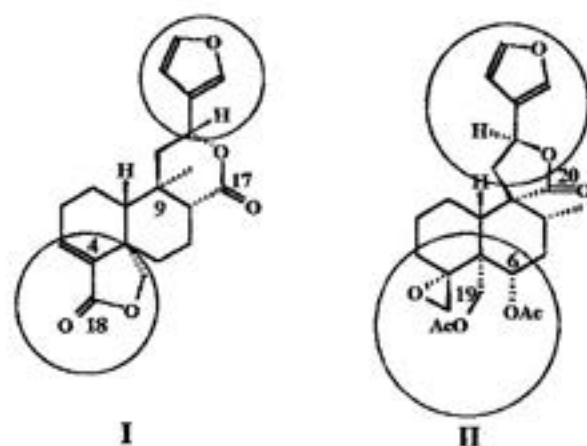


Fig. 3.

na y un sistema β -furilo en la cadena lateral, presentando C-12 como grupo metileno o bien oxidado formando parte de una lactona. El segundo tipo está representado por diterpenos en los que el sistema lactona α,β -insaturada ha sido reemplazado por un anillo oxirano comprometiendo a C-4 α -C-18 en el anillo A y adicionalmente presentan grupos acetato en C-6 α y C-19 (II) y funciones oxigenadas en C-12.

Trabajando con los diterpenos del tipo I, en particular con **5** (bacrispina), se observa que la hidrogenación catalítica que conduce a **8**, está asociada a una pérdida de la bioactividad. Otro tanto ocurre con la hidrogenación de bacchotricuneatina A, **7**, el perhidroderivado obtenido también resulta inactivo. La necesidad de coexistencia de las funcionalidades γ -butirolactona- α,β -insaturada y del anillo furano como probables requisitos estructurales, comienza a ser evidenciada al observar los resultados obtenidos con el butanólido **10**, puesto que éste en lugar de actividad antialimentaria pareciera evidenciar propiedades de fagoestimulante. Pruebas adicionales han sido obtenidas al analizar el comportamiento de salviarina **11** ya si bien la funcionalización δ -lactona entre C-17-C-12 es similar tanto en conectividad como en esteoquímica con el compuesto **7**, su inactividad obedecería a que el doble enlace en el anillo A no está conjugado con la lactona C-18-C-19. Esta observación estaría de acuerdo con

la pérdida de actividad observada en el compuesto **12**, obtenido por reducción de **4** con LiAlH_4 .

En diterpenos del tipo II, aislados de especies del género *Teucrium*, los resultados obtenidos son acordes a los informados por otros autores sobre larvas de Noctuidos [Simmonds *et al.*, 1989; Malakov, 1994]. En todos los casos en que los valores de PIA resultan estadísticamente significativos está presente el anillo oxirano comprometiendo a C-4 α -C-18 conjuntamente con el anillo furano β -sustituido, tal como en los diterpenos **13**, **16** y **17**.

Sin embargo, cuando el anillo oxirano de **13** sufre apertura inducida por BF_3 -eterato al diol **18** o bien la transformación del metileno de C-18 en un grupo formilo por tratamiento con $\text{HCl}_{(g)}$ en Et_2O originando **19**, se observa para ambos productos una manifiesta pérdida de la bioactividad, pese a que el resto β -furilo permanece inalterado. Finalmente el derivado **20**, obtenido mediante un tratamiento con Br_2 en MeOH [Brawner Floyd, 1978], no evidencia actividad alguna pese a mantener inalterado el anillo oxirano. Estas observaciones llevan a postular que serían necesarias dos funcionalizaciones, el anillo oxirano y el grupo β -furilo, para el reconocimiento molecular con el receptor.

Una situación especial la constituyen los diterpenos **14** y **15**, el primero obtenido a partir de **13** por hidrólisis selectiva del aceta-

to en C-12 y el segundo por oxidación de 14 con reactivo de Jones. Tanto el alcohol como el 12-ceto-derivado resultan no activos. Esto se ha intentado explicar mediante estudios del comportamiento electrónico y conformacional de diferentes *neo-clerodanos* [Enriz *et al.* 1994, 2000] que sugieren la necesidad de dos sitios activos separados por 10 Å y la incidencia de factores tales como la flexibilidad conformacional para el ángulo de torsión del sistema β-furilo. No se ha observado una clara correlación entre la actividad antialimentaria sobre el modelo biológico por nosotros utilizados y los coeficientes de hidrofobicidad medidos experimentalmente [Luco *et al.*, 1994].

Actividad insecticida de lactonas sesquiterpénicas

Uno de los grupos de metabolitos secundarios que ha despertado mayor interés, tanto por el número de estructuras aisladas como por las actividades biológicas detectadas, es el de las lactonas sesquiterpénicas [Picman, 1986]. Estos productos naturales son típicos de especies de *Astereaceae* y a la fecha se conocen más de dos mil estructuras. Entre los diversos núcleos de lactonas aisladas se destacan los denominados germacranólidos, eudesmanólidos, guaianólidos y pseudoguaianólidos.

Como parte del estudio sistemático sobre el comportamiento de larvas de *T. molitor* frente a distintos metabolitos secundarios de plantas que estamos presentando, a continuación se resumen los resultados obtenidos por tratamiento crónico con seis sesquiterpenoides de tipo guaianólido y pseudoguaianólido [Sosa *et al.*, 1995].

Compuestos ensayados:

En Figura 4 se consignan Mexicanina I, 1 y helenalina 2 que fueron obtenidas a partir de *Gaillardia megapotamica* (Spreng.) Baker var. *radiata* (Del Vitto & Petenatti N° 2841 UNSL). Hymenina, 3, se aisló de *Parthenium hysterophorus* L. (Del Vitto N° 1672 UNSL). Ludartina, 4, se obtuvo de *Artemisia douglasiana* (Besser) (Del Vitto N° 55 UNSL). De *Artemisia mendozaana* D.C. var. *paramilloensis* (Ambrosetti, Roig & Del Vitto N° 1442

MERL) se aislaron los sesquiterpenos desacetoximatricarina, 5, y desacetilmatricarina, 6.

Bioensayo:

La incorporación de los productos naturales en el alimento se realizó suspendiendo 50 g del mismo en 150 ml de acetona destilada que contenían 5,0 mg de la lactona correspondiente. La eliminación del solvente en evaporador rotatorio al vacío, permitió obtener una mezcla homogénea y libre de acetona con una concentración de 100 ppm del producto bajo estudio. Los controles se prepararon de igual forma sin el agregado de las sustancias a ensayar.

Las larvas sometidas a un ayuno previo de 24 hs fueron ubicadas en número de veinte en cajas plásticas tapadas con gasa, en las que previamente se había colocado el alimento correspondiente a cada ensayo. Las observaciones se realizaron cada cinco días determinándose el porcentaje de mortalidad hasta el día veinticinco. Los resultados se presentan en la Tabla 2 y representan el promedio de diez experimentos por duplicado para cada uno de los productos ensayados. En todos los casos las comparaciones fueron realizadas mediante el estadístico χ^2 considerando no significativas las diferencias para $p > 0,05$.

Las lactonas sesquiterpénicas utilizadas corresponden a los grupos pseudoguaianólido 1-3, y guaianólido, 4-6. Con excepción de 5 y 6, en todas ellas está presente un grupo funcional γ-lactona que posee en C-α un grupo metileno exocíclico. La bioactividad de lactonas sesquiterpénicas es atribuida a este tipo de funcionalización, la que puede comportarse como aceptor de grupos tioles de enzimas que poseen grupos sulfhidrilos libres. Esto ha sido demostrado por la disminución de la actividad enzimática de fosfofructoquinasa y glucógenosintetasa en presencia de lactonas sesquiterpénicas [Picman, 1986]. Sin embargo otros grupos funcionales conjugados, como el anillo ciclopentenona, pueden actuar como sustratos. Tal es el caso de tenulina 8 que si bien no presenta un sistema γ-lactona-α,β-insaturado es activa frente a larvas de *Peridroma saucia* y *Ostrinia orbicularis* [Arnason *et al.*, 1987].

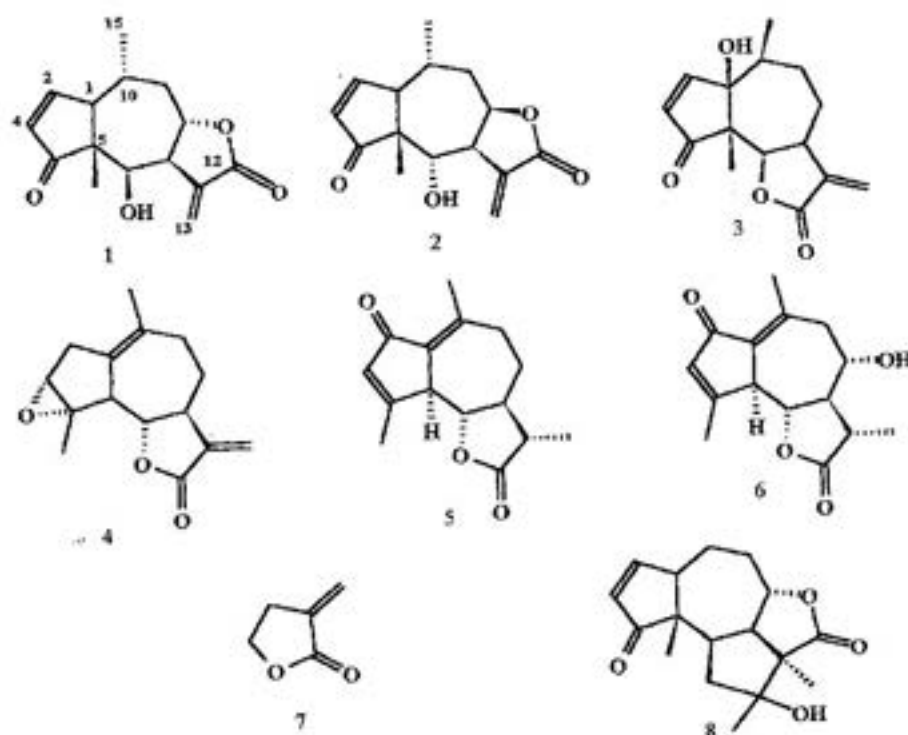


Fig. 4. (1) mexicanina I; (2) helenania; (3) hymenina; (4) ludartina; (5) desacetoximatricarina; (6) desacetilmatricarina; (8) tenulina.

Se observa que el producto natural más activo es **1**, presentando diferencias significativas con **2** y **3**. Es importante destacar que si bien **1** y **2** presentan la misma funcionalización, resultan tener distinta configuración en C-6 y C-8. En **1** el cierre de la lactona es C-8 α y el hidroxilo en C-6 ocupa una posición β mientras que en **2** dichos centros quirales poseen la configuración opuesta.

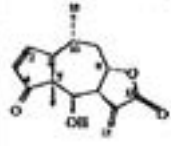
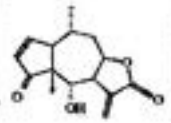
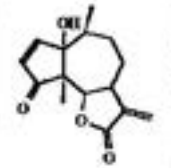
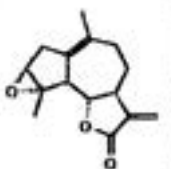
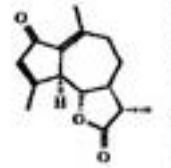
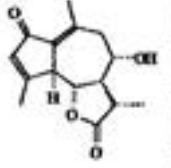
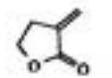
En relación a hymenina, **3**, el cierre de la lactona ocurre en posición C-6 β y sin embargo presenta una actividad biológica comparable a helenalina, **2**, con cierre en C-8 β . Aparentemente el cierre de la γ -lactona no tendría mayor incidencia en la actividad larvicida; esto ha sido observado también en compuestos análogos frente a larvas de *Heliothis zea* (Boddie) [Isman, 1983].

Cuando el bioensayo se realiza utilizando el producto comercial **7**, en concentración de 100 ppm, no se observan diferencias significativas respecto de mexicanina I, la más tóxica de las lactonas aquí ensayadas. Esto

confirma la importancia que ha sido asignada al anillo lactónico insaturado en la bioactividad.

El segundo grupo de compuestos naturales, ludartina, **4**, desacetoximatricarina, **5**, y desacetilmatricarina, **6**, pertenecen a la serie de los guaianólidos y los bioensayos no muestran diferencias significativas entre ellos. De estos tres compuestos sólo **4** posee un sistema α -metileno- γ -butirolactona y no presenta el anillo ciclopentenona mientras que los otros dos tienen esta última funcionalización y carecen de sistema lactónico insaturado. Estos resultados no pueden ser explicados satisfactoriamente en base al carácter aceptor de grupos nucleofílicos, en particular tioles, de estos productos. El sistema ciclopentenona en **5** y **6** tiene un grupo metilo en posición β que dificultaría o impediría estéricamente el ataque del nucleófilo. El conocimiento de los mecanismos a través de los cuales estas lactonas sesquiterpénicas ejercen su toxicidad requiere de estudios adicionales.

Tabla 2

Compuesto	Porcentaje de mortalidad±DS				
	Días				
	5	10	15	20	25
 1	15.5±5.5	25.0±5.7	33.5±5.8	46.0±4.6	57.0±5.9 ^a
 2	9.0±3.9	17.5±3.5	26.0±3.9	32.5±5.8	44.0±6.1 ^b
 3	10.5±3.7	21.5±4.7	27.0±4.8	35.0±5.3	45.0±8.5 ^b
 4	7.5±7.2	14.0±6.1	20.0±6.2	26.0±9.1	32.5±9.2 ^c
 5	9.5±1.6	17.5±4.2	22.5±6.8	30.0±7.4	36.0±8.4 ^c
 6	9.5±2.8	17.5±4.2	24.5±8.9	30.0±6.6	35.5±8.6 ^c
 7	12.5±4.2	25.5±4.5	33.3±9.3	45.8±9.7	55.8±7.4 ^a
Control	0	0.5±1.5	1.5±2.4	2.0±4.2	3.0±4.2

En base a los datos presentados no es posible determinar si el incremento en la mortalidad en los lotes experimentales se debe a un efecto antialimentario, a una disminución en la transformación de la ingesta en biomasa, a un efecto tóxico post ingesta o a alguna combinación de ellos.

Bioactividad de benzofuranos, derivados de cromenos y compuestos relacionados

Benzopiranos, benzofuranos y fenilpropanoides están presentes en un número importante de especies de plantas superiores, en particular Astereaceae. Han sido informadas diversas bioactividades tales como acción antitumoral, inhibidores del crecimiento bacteriano y agentes fototóxicos frente a hongos y bacterias [Hegnauer, 1977; Proksch & Rodriguez, 1983]. En este sentido, precoceno I,

1 y precoceno II, 2, Figura 5, un tipo especial de cromenos carentes del grupo metilcetona, han sido descritos como inductores de la diapausa e implicados en los fenómenos de metamorfosis cuando son aplicados por topicación o incorporados en la dieta [Harborne, 1988]. Encecalina, 3, ha sido presentada como la principal defensa química de especies del género *Encelia* [Proksch & Rodriguez, 1984; Isman & Proksch, 1985; Proksch *et al.*, 1987].

Investigaciones intensivas sobre el destino metabólico de encecalina cuando es administrada por topicación a larvas de insectos han sido llevadas a cabo utilizando técnicas de GLC-EM [Kunze *et al.*, 1996].

En nuestro laboratorio hemos evaluado, frente a *T. molitor* L., el efecto de los productos 4-18, aislados de diversas especies de Compuestas u obtenidos por transformación química [Carrizo *et al.*, 1997].

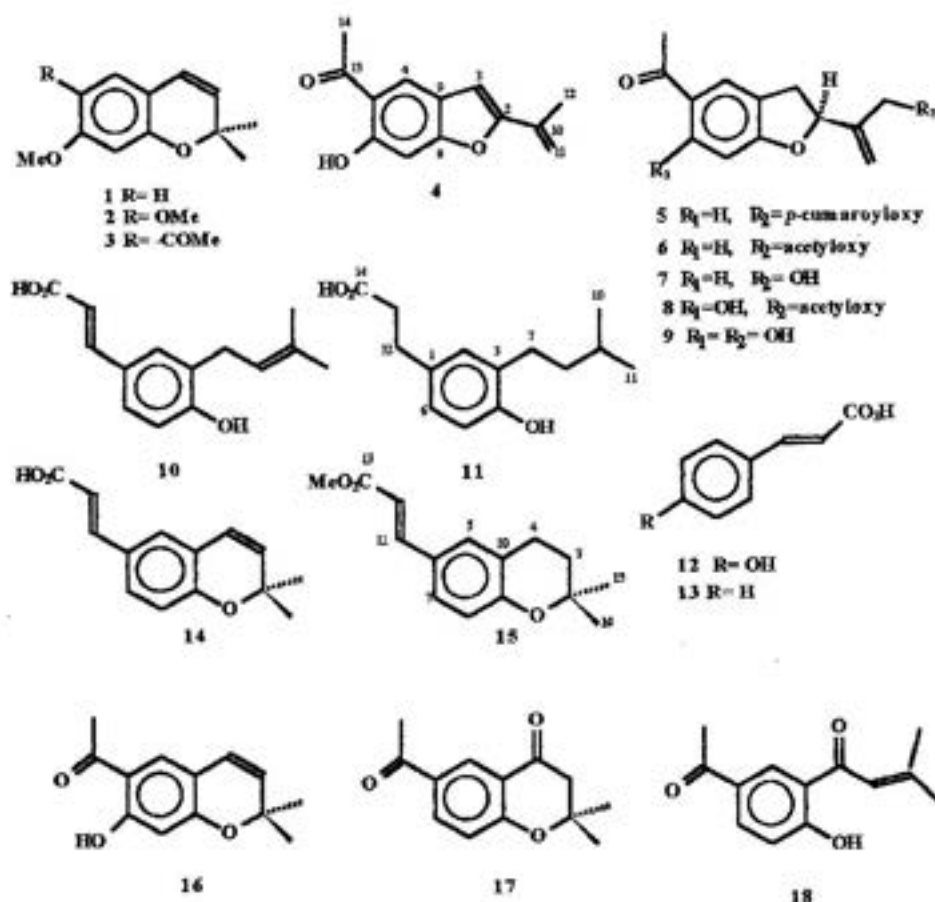


Fig. 5.

Compuestos ensayados:

Euparina **4**, fue obtenida a partir de *Flourensia oolepis* [Guerreiro *et al.*, 1979], en tanto que las tremetonas **5-7** se obtuvieron de distintas especies del género *Parastrephia* [Nieto *et al.*, 1994]. Los productos **8, 9, 16-18** aislados de partes aéreas de *Ophryosporus axilliflorus* [Favier *et al.*, 1998]. La tremetona **10** fue obtenida de *Baccharis grisebachii* Hyeronimus [Gianello y Giordano, 1987] y su derivado **11** se obtuvo por hidrogenación catalítica. El cromeno **14** se preparó a partir de **10** mediante reacción con DDQ en mezcla de benceno-1,4-dioxano 1:1 a temperatura ambiente durante un día mientras que el benzopirano **15** se obtuvo vía halociclación con 2,4,4,6-tetrabromo-2,5-ciclohexadienona [Tonn *et al.*, 1988], seguido de eliminación en medio básico para conducir a **14** o de reducción con *n*-Bu₃SnH /AIBN en benceno por 3 horas para la preparación de **15** (Esquema 1). Los compuestos **12-13** fueron obtenidos comercialmente.

Bioensayo:

Se diseñó un bioensayo que permitiera, simultáneamente, determinar el porcentaje de larvas que cumplen el proceso de metamorfosis de larva-pupa y el tiempo de duración de este último estadio. Los productos se aplicaron mediante topicación de 2 µl de una solución acetónica con una concentración de 60 mg/ml. Los controles sólo se topicaron con acetona. Los tiempos de duración del estadio

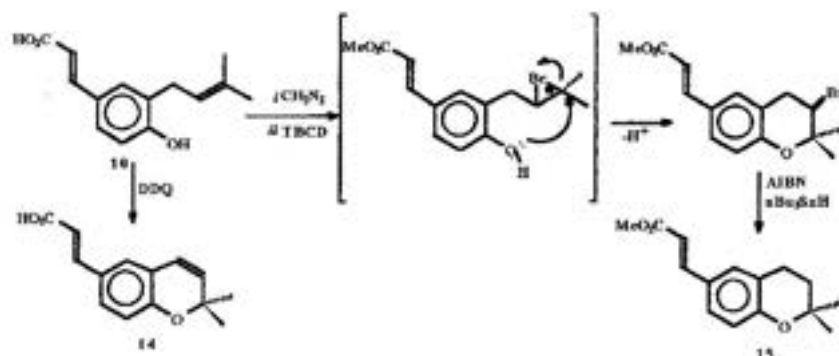
de pupa se registraron en días y se determinó el porcentaje de larvas que cumplieron satisfactoriamente la metamorfosis; asimismo se documentaron aquellos casos en que se produjeron anomalías morfológicas macroscópicas durante este proceso. Los resultados se analizaron estadísticamente mediante las pruebas de χ^2 y de Dunnet; los resultados se presentan en Tabla 3.

Tenebrio molitor tiene un número variable de estadios larvales durante su desarrollo postembrionario. En este sentido se requiere una cuidadosa selección en base al peso de las larvas con el objeto de minimizar la proporción de estadios larvales inciertos. Se ha informado que larvas entre 120-140 mg de peso pertenecen al último estadio larval [Quennedey & Quennedey, 1993]. En nuestras experiencias se utilizaron larvas cuyo peso quedaba incluido en el intervalo 136.7±23.7 mg.

En un desarrollo normal, está establecido que el período de pupa tiene una duración de nueve días [Quennedey & Quennedey, 1993] y en nuestros experimentos control se obtuvo un valor de 8.6±1.6 días.

Con el objeto de analizar la relación estructura-actividad los compuestos fueron agrupados en tres grupos principales; derivados de benzofurano (**4-9**), derivados del ácido trans-cinámico (**10-13**) y derivados de benzopirano (**14-17**).

De una evaluación previa de la relación dosis-respuesta para el compuesto **5**,



Esquema 1.

Tabla 3

Compuesto ^a	Porcentaje de larvas que pupan ^b	Duración del estadio de pupa ^c
4	83.0 (3.1) ^d	10.5 (2.1) ^e
5	26.0 (0.8) ^f	10.5 (1.0) ^e
6	75.0 (6.5) ^f	9.8 (2.2) ^g
7	75.0 (7.8) ^f	8.6 (0.5) ^g
8	73.3 (2.1) ^f	11.2 (2.3) ^f
9	73.0 (8.1) ^f	11.6 (2.1) ^f
10	63.0 (3.4) ^f	13.0 (1.3) ^f
11	50.0 (8.2) ^f	10.2 (1.3) ^e
12	87.0 (3.4) ^g	10.0 (2.1) ^e
13	92.0 (5.6) ^g	8.7 (1.9) ^g
14	77.0 (6.4) ^f	10.2 (0.9) ^e
15	87.0 (7.1) ^g	7.0 (1.4) ^g
16	66.6 (1.7) ^f	11.5 (2.1) ^f
17	87.0 (1.3) ^g	12.1 (2.4) ^f
18	75.0 (3.8) ^f	11.4 (2.1) ^f
Control	93.0 (6.1)	8.6 (1.6)

^a Dosis: 120 µg/larva; aplicación tópica.
^b Los valores son promedios (SE); n=60. Datos tratados por el test de χ^2 .
^c Los valores, en días, son promedios (SE); n=60. Datos tratados por el test de Dunnet.
^{d,e,f} Diferencias significativas (p<0.05, p<0.01 y 0.001), respectivamente) respecto del control mediante el test de χ^2 o de Dunnet.
^g Diferencias no significativas.

mediante un análisis de probit fue determinada la DE_{50} = 63.5 µg/larva. Con el objeto de asegurar se alcance la dosis tóxica de cada uno de los productos ensayados se utilizó una dosis de 120 µg/larva considerando que **5** resultaba el compuesto de mayor peso molecular.

En el grupo de los derivados de benzofurano (**4-9**), todos los compuestos mostraron un efecto significativo sobre el porcentaje de larvas que pupan en el punto final del experimento (30 días); pero la más importante bioactividad la presentó el compuesto **5**. En este caso sólo el 26.0% de las larvas tratadas lograron alcanzar el estado de pupa; el resto típicamente murió en el curso de los diez primeros días.

El cambio en la bioactividad al pasar de **5** a los derivados **6-9** puede ser adjudicado a presencia de un grupo funcional volumino-

so en C-2 (*p*-cumaroiloxy derivado). Ha sido observado que benzofuranos con funcionalización 2-(1'-oxo-5'-metil-4'-hexenil) sobre C-2 resultan insecticidas frente a larvas de *Christoneura fumiferata* Clem. [Findlay *et al.*, 1997].

En el segundo grupo de compuestos analizados (derivados del ácido *trans*-cinámico, **10-13**) los ácidos **12** y **13**, de distribución amplia en la naturaleza, resultaron esencialmente inactivos. El compuesto **10** mostró ambas actividades, tóxico en el último periodo larval y activo sobre la duración del estadio pupal. Sin embargo, cuando el producto **10** fue hidrogenado catalíticamente, el derivado **11** mínimamente afectó la duración del estado pupal pero aumenta la toxicidad.

Teniendo en cuenta la bioactividad de **10**, se prepararon los derivados **14** y **15**. El

primero vía una reacción de ciclación con DDQ [Schmitt, A. *et al.*, 1991] y el segundo vía una halociclación para dar la mezcla de enantiómeros del 3-bromo derivado de **15** seguido de una reducción con $n\text{Bu}_3\text{SnH}$ [Tonn, C.E. *et al.*, 1988] (Esquema 1). Estos nuevos productos pueden ser agrupados en la serie de derivados de benzopirano (**14-17**).

En este grupo de compuestos, el más activo resultó el cromeno **16** (demetilencecalina). Es conocido que el doble enlace C-3-C-4 en el anillo pirano es esencial para la actividad tóxica o anti-hormonal [Isman, M.B., 1989]. Este es el sitio de ataque de oxidasas de función múltiple las que producen epoxidación del doble enlace y a partir de este derivado oxigenado la apertura hidrolítica buscando el diol más soluble.

Sin embargo, la función oxirano en su posición bencílica puede ser centro de ataque de nucleófilos tales como grupos tiol de enzimas bloqueando la actividad enzimática [Kunze, A. *et al.*, 1996]. La ausencia de insaturación en el heterociclo del compuesto **15** podría ser la razón de la diferente actividad respecto de demetilencecalina.

Finalmente, un 3.0 % de las larvas tratadas con los compuestos **16-18** presentaron diferentes anomalías morfológicas. Estas fueron adultoides mostrando tarsos y antenas parcialmente insegmentadas (**16**), severa deficiencia en el proceso de disposición de nueva cutícula (**17**) y adultoides encapsulados en la exuvia pupal pero mostrando apéndices móviles. Ninguna de las larvas control presentó alguna de estas anomalías.

Bioactividad de flavonoides

Este grupo de compuestos ha sido informado como responsable de bioactividades frente a insectos tales como insecticidas e inhibitoria del crecimiento. *Heliothis virescens* (Fabricius) [Hedin *et al.*, 1992], *Spodoptera exigua* (Huebner), *Heliothis zea* (Boddie) [Isman *et al.*, 1983], *Manduca sexta* (L.) [Snook *et al.*, 1992] y *Dione juno* Cramer [Echeverri *et al.*, 1991], han sido utilizados como modelos para bioensayos frente a este tipo de metabolitos secundarios de plantas. En nuestro caso utilizamos larvas de *Tenebrio*

molitor L., recientemente mudadas al cuarto estadio, para evaluar la bioactividad de veinte compuestos flavonoides, la mayoría de ellos aislados en el curso de estudios fitoquímicos realizados sobre especies de la región de Cuyo [Sosa *et al.*, 2000]. En la Figura 6 se presentan sus estructuras y se aclara sobre su procedencia. Utilizando una concentración para cada flavonoide de 6.0 mmoles/g de alimento se evaluó su incidencia en el desarrollo larvario. Para ello se determinó la variación del peso y longitud de las larvas hasta los sesenta días del bioensayo.

El único compuesto de los veinte evaluados que mostró una actividad significativa en cuanto a una disminución del peso fue quercetina (**1**), en tanto que sobre el crecimiento longitudinal de las larvas tuvieron una disminución significativa aquellos lotes tratados con los compuestos **1, 4, 5, 10 y 13**.

La relación *o*-dioxigenada, que ha sido atribuida como la responsable de la bioactividad en flavonas, estaría asociada a la posibilidad de participar en reacciones de tipo óxido-reducción, probablemente que involucran a radicales libres. Es conocido que el proceso de barrido radicalario ("radical scavenging") de especies oxigenadas activas, está relacionado con el número y posición de grupos hidroxilo en el anillo B (Yoshiki *et al.*, 1995), resultando más efectivo en los casos de *o*-dihidroxilación que permite el paso a la estructura *o*-quinoide correspondiente a través de un mecanismo de óxido-reducción.

Podemos concluir que a partir de estos estudios se ha podido comprobar que *Tenebrio molitor* L. es un insecto sensitivo a los productos naturales, tanto a nivel de fagorepelencia, toxicidad aguda y alteraciones del desarrollo. En todos los casos las dosis utilizadas resultaron comparables a las presentadas por otros autores frente a diferentes modelos de insectos. Sin embargo, se observa que moléculas francamente activas frente a otras especies de insectos resultan inactivas frente a este coleóptero, y recíprocamente.

Son necesarios mayores estudios para obtener información más completa que permita diseñar productos sintéticos que puedan mimetizar las bioactividades aquí informadas.

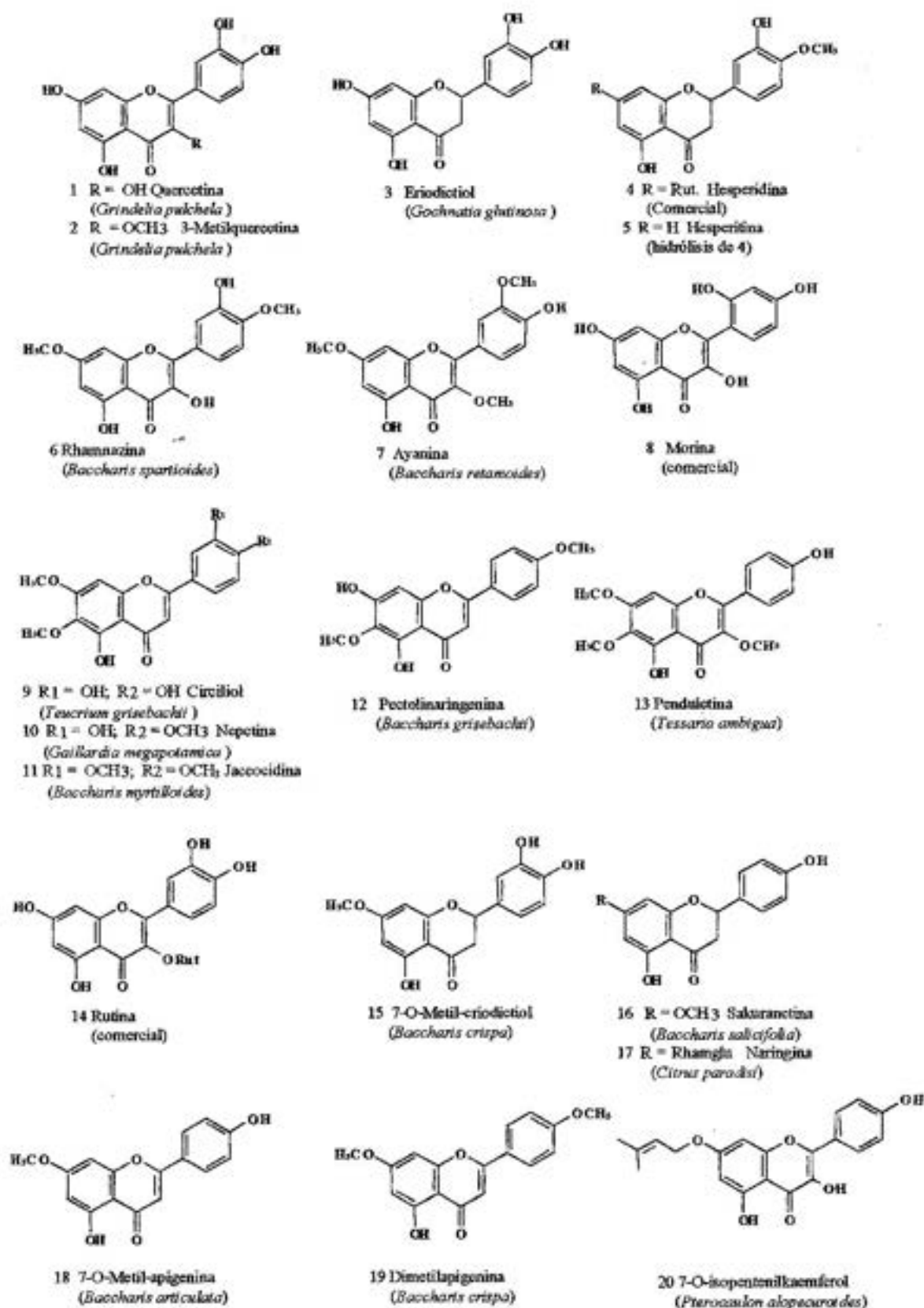


Fig. 6

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de San Luis y CONICET por los subsidios otorgados al Proyecto "Química y Aplicaciones de Productos Naturales de la Región de Cuyo". A los Dres. José Carlos Gianello y Matías Nieto, por su desinteresada colaboración en el suministro de algunos de los productos naturales ensayados. A los Dres. Pedro C. Rossomando y Carlos E. Ardanaz y al Lic. Eduardo E. García por los estudios espectroscópicos. A los Ings. Guido Mácola y José García Sáez (Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo) y al Dr. Eduardo Zerba (CIPEIN-CITEFA-CONICET) por su interés en el desarrollo de esta línea de trabajo.

Referencias

- Arnanson, J. T.; Isman, M.; Philogène, B.; Wadell, T. (1987). *J. Nat. Prod.*, 50 (4), 690.
- Belles, X; Camps, F; Coll, J.; Piulach, M.D. (1985). *J. Chem. Ecol.*, 11, 1439.
- Brawner Floyd, M. (1978). *J. Org. Chem.* 43, 1641.
- Camps, F.; Coll, J. (1993). *Phytochemistry*, 32 (6), 1361.
- Carrizo Flores, R.; Sosa, M.E.; Favier, L.S.; Penna, F.; Guerreiro, E.; Giordano, O.S.; Tonn, C.E. (1998). *J. Nat. Prod.* 61, 1209.
- Ceñal, J.P.; Giordano, O.S.; Rossomando, P.C.; Tonn, C.E. (1997). *J. Nat. Prod.*, 60, 490.
- Echeverri, F.; Cardona, G.; Torres, F.; Pelaez, W.; Quiñones, W.; Rentería, E. (1991). *Phytochemistry* 30, 153.
- Enriz, R.D.; Baldoni, H.; Jáuregui, E.; Sosa, M.E.; Tonn, C.E.; Giordano, O.S. (1994). *J. Agric. Food Chem.*, 42 (12), 2958.
- Enriz, R.D.; Baldoni, H.A.; Zamora, M.A.; Jáuregui, E.A.; Sosa, M.E.; Tonn, C.E.; Luco, J.M. and Gordaliza, M. (2000). *J. Agric. Food Chem.*, 48(4), 1384.
- Findlay, J.P.; Buthelezi, S.; Li, S.; Sevech, M.; Miller, J.D. (1997). *J. Nat. Prod.* 60, 1214.
- Favier, L.S.; Tonn, C.E.; Guerreiro, E.; Rotelli, A.; Peltzer, L. (1998). *Planta Medica* 64, 657.
- Fraenkel, G. (1959). *Science*, 129, 1466.
- Frazier, J.L.; Chyb, S. (1995). *Regulatory Mechanism in Insect Feeding*, Chapman and Hall, Cap. 13.
- Gallardo V. O.; Tonn, C.E.; Nieto, M.; Morales, G.; Giordano, O.S. (1996). *Natural Products Letters* 8, 189.
- Gianello, J.C.; Giordano, O.S. (1982). *Rev. Latinoamer. Química*, 13, 76.
- Gianello, J.C.; Giordano, O.S. (1987). *Anales Asoc. Química Argentina*, 75, 1.
- Gianello, J.C.; Giordano, O.S. (1989). *Anales Asoc. Química Argentina*, 77, 353.
- Guerreiro, E.; Kavka, J.; Giordano, O.S.; Gros, E.G. (1979). *Phytochemistry*, 18, 1235.
- Harborne, J. B. (1993). *Nat. Prod. Rep.*, 10, 327.
- Harborne, J.B. (1988). *Introduction to Ecological Biochemistry*, Academic Press, London.
- Harborne, J.B.; Tomás-Barberán, F.A. (1991). *Ecological Chemistry and Biochemistry of Plant Terpenoids*, Clarendon Press, Oxford. Cap. 16.
- Hedin, P.; Jenkins, J.; Parrol, W. (1992). *J. Chem. Ecol.* 18, 105.
- Hegnauer, R. (1977). *The Biology and Chemistry of the Compositae*, Academic Press, London, p. 283.
- Isman, M.B. In *Insecticides of Plant Origin*; Arnason, J.T.; Philogène, B.J.R.; Morand, P. Eds.; ACS Symposium Series 387; Washington DC, 1989; pp 44-58.
- Isman, M.B.; Proksch, P. (1985). *Phytochemistry*, 24, 1949.
- Isman, M.B.; Rodríguez, E. (1983). *Phytochemistry*, 22, 2709.
- Kubo, I.; Nakanishi, K. (1979). *Adv. Pestic. Sci. Symp. Paper 4th International Congress of Pesticide Chemistry*, Vol. 2, p.284.
- Kunze, A.; Aregullin, M.; Rodríguez, E.; Proksch, P. (1996). *J. Chem. Ecol.*, 22, 491.
- Lewis, A.C.; van Emden, H.F. (1986). *Insect Plant-Interactions*, Springer-Verlag, Cap. 4.
- Ley, S.V. (1990). *Ciba Foundation Symposium 154*, John Wiley & Sons, New York, pp. 80.
- Lidert, Z.; Taylor, D.H.; Thirugnanam, M. (1985). *J. Nat. Prod.*, 48, 843.
- Luco, J.; Sosa, M.E.; Cesco, J.; Tonn, C.E.; Giordano, O.S. (1994). *Pestic. Sci.*, 41, 1.
- Malakov, P.Y.; Papanov, G.Y.; Rodríguez, B.; de la Torre, M.C.; Simmons, M.S.J.; Blaney, W.M.; Boneva, I.M. (1994). *Phytochemistry*, 37, 147.
- Merrit, A.T.; Ley, S.V. (1992). *Nat. Prod. Rep.*, 9, 243.
- Nahrstedt, A. (1988). *Planta Medica*, 55, 333.
- Nieto, M.; Gallardo V. O.; Rossomando, P.C.; Tonn, C.E. (1996). *J. Nat. Prod.*, 59, 880.
- Nieto, M.; Gianello, J.C.; Tonn, C.E. (1994). *Anales Asoc. Química Argentina*, 82, 105.
- Picman, A.K. (1986). *Biochem. Syst. Ecol.*, 4, 256.
- Proksch, P.; Isman, M.B.; Witte, L.; Hartmann, T. (1987). *Phytochemistry*, 26, 2227.
- Proksch, P.; Rodríguez, E. (1983). *Phytochemistry*,

- 22, 2335.
- Proksch, P.; Rodriguez, E. (1984). *Biochem. Syst. Ecol.*, 12, 179.
- Quennedey, A.; Quennedey, B. (1993). *Tissue and Cell*, 25, 219.
- Reed, D.K.; Jacobson, M. (1983). *Experientia*, 39, 378.
- Simmonds, M.S.J.; Blaney, W.M.; Ley, S.V.; Savona, G.; Bruno, M.; Rodriguez, R. (1989). *Phytochemistry*, 28, 1989.
- Smith, A.; Telikepalli, H.; Mitscher, L. (1991). *Phytochemistry* 30, 3569.
- Snook, M.; Chori, O.; Sisson, V.; Castello, C. (1992). *Phytochemistry* 31, 1639.
- Sosa, M.E.; Tonn, C.E.; Guerreiro, E.; Giordano, O.S. (1995). *Rev. Soc. Entomol. Argent.* 54 (1-4) 89.
- Sosa, M.E.; Tonn, C.E.; Giordano, O.S. (1994). *J. Nat. Prod.*, 57, 1262.
- Sosa, M.E.; Guerreiro, E.; Giordano, O.S.; Tonn, C.E. (2000). *Rev. Soc. Entomol. Argent.* 59 (1-4), 177.
- Tonn, C.E.; Caltabiano, J.A.; Gianello, J.C.; Giordano, O.S. (1990). *Revista Latinoamer. Quím.*, 21, 52.
- Tonn, C.E.; Gianello, J.C.; Giordano, O.S. (1979). *Anales Asoc. Química Argentina*, 67, 1.
- Tonn, C.E.; Giordano, O.S. (1980). *Anales Asoc. Química Argentina*, 68, 237.
- Tonn, C.E.; Giordano, O.S.; Besalle, F.; Frolow, F.; Lavie, D. (1988). *Phytochemistry*, 27, 489.
- Tonn, C.E.; Giordano, O.S.; Delgado Martín, J.; Martín, V.S. (1989). *Phytochemistry*, 28, 1537.
- Tonn, C.E.; Palazón, J.M.; Ruiz-Pérez, C.; Rodríguez, M.L.; Martín, V.S. (1988). *Tetrahedron Letters*, 29, 3149.
- Urones, J.G.; Basabe, P.; Lithgow, A.M.; Marcos, I.S.; Jiménez, A.; Diez, D.; Gomez, A.; White, A.J.P.; Williams, D.J.; Simmonds, M.S.J.; Blaney, W.M. (1995). *Tetrahedron*, 51, 2117.
- Yoshiki, Y.; Okubo, K.; Onuma, M.; Igarashi, K. (1995). *Phytochemistry*, 39, 225.

Manuscrito recibido en octubre de 2000; aceptado en noviembre de 2000.

CONTROLES ESTRUCTURALES DEL LINEAMIENTO TUCUMÁN SOBRE EL MAGMATISMO NEÓGENO Y SUS MINERALIZACIONES ASOCIADAS DEL DISTRITO FARALLÓN NEGRO (CATAMARCA, ARGENTINA): UNA REVISIÓN

Eduardo A. Rossello

CONICET - Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Pabellón II, Ciudad Universitaria, (1428) Buenos Aires, Argentina.
E-mail: rossello@gl.fcen.uba.ar.

Resumen

Se describen los controles estructurales del Lineamiento Tucumán sobre el magmatismo y mineralizaciones contemporáneas del Distrito Farallón Negro, que se expresan desde escalas regionales a microtectónicas, y pueden ser aprovechados para el diseño de actividades mineras prospectivas, exploratorias y extractivas. El Lineamiento Tucumán es un corredor transpresivo dextral dispuesto con rumbo N 70° y localizado entre la Puna y las Sierras Pampeanas (Catamarca, Argentina), que se desarrolla en el antepaís andino durante el Neógeno como consecuencia de la convergencia oblicua que exhibe la subducción de la Placa de Nazca debajo de la Placa Sudamericana. La evolución tectónica de este lineamiento se relaciona temporoespacialmente con un eje de magmatismo Vicuña Pampa-Filo Colorado que se proyecta perpendicularmente desde el eje principal del arco volcánico de la Cordillera de los Andes e incluye al Complejo Volcánico Farallón Negro. En la intersección del Lineamiento Tucumán y el eje volcánico Vicuña Pampa-Filo Colorado, localizada en el centro de la provincia de Catamarca, se hospeda una de las mayores concentraciones de depósitos minerales metalíferos conocidas en la Argentina, muchos de ellos de categoría mundial, que incluye varios pórfidos cupríferos (Bajo La Alumbraera, Agua Rica, etc.) y depósitos epitermales de metales base y preciosos (Farallón Negro-Alto de la Blenda, Capillitas, etc.). La naturaleza cinemática transcurrente dextral del Lineamiento Tucumán sobre el basamento del antepaís Andino, determina ambientes dilatantes en los pandeos y resaltos derechos en estructuras sintéticas subparalelas y juegos de estructuras discontinuas subordinados antitéticas dispuesto en dirección NNO. Esta dirección ha sido preferencialmente aprovechada por el magmatismo Neógeno para emplazar los cuerpos hipabisales, diques y mineralizaciones asociadas a las conspicuas alteraciones hidrotermales de tipo pórfido cuprífero y epitermales de la región.

Palabras clave: Tectónica andina, transcurrencia, mineralizaciones, magmatismo, controles estructurales de yacimientos, Catamarca, Argentina.

Trabajo presentado con motivo de la entrega del premio "Horacio J. Harrington" en Geología Estructural, el 12 de noviembre de 1999.

Abstract

The structural controls at different scales of the Lineamiento Tucumán on the coeval magmatism and Farallón Negro mineralizations which could be used in the design of exploration and exploitation mining activities are described. The Lineamiento Tucumán is a dextral transpressive corridor 100 km wide and trending N 70° that is placed between the Puna and Sierras Pampeanas geological provinces (Catamarca, Argentina). It developed in the Andean foreland during Neogene as a consequence of the oblique convergence due to the subduction of the oceanic Nazca Plate beneath the continental South America Plate. The tectonic evolution of this megastructure is related both in time and space to the Vicuña Pampa-Filo Colorado magmatic axe perpendicular to the Cordillera de los Andes main volcanic arc and includes the Farallón Negro Volcanic Complex. On the intersection between the Lineamiento Tucumán and the Vicuña Pampa-Filo Colorado magmatic axe, in the Catamarca province took place one of the major Argentine metalliferous ore deposits including the Bajo La Alumbraera and Agua Rica porphyry copper world class deposits and the Farallón Negro-Alto de la Blenda and the Capillitas epithermal base-metal and precious deposits. The dextral transcurrent kinematics of the Lineamiento Tucumán determine dilatance conditions on i) subparallel sintectic structures showing right bends and step-overs and ii) subordinate antitectic discontinuous structures trending NNW. This last direction preferentially controlled the intrusion of the hypabissal stocks, dykes and mineralizations associated with conspicuous porphyry- and epithermal-types of hydrothermal alterations in the region.

Key words: Andean tectonics, wrenching, mineralisations, magmatism, structural controls of ore deposits, Catamarca, Argentina.

Introducción

La subducción de la placa oceánica Nazca, debajo de la placa del continente Sudamericano, genera la Cordillera de los Andes y deforma una extensa porción de su antepaís [véanse más detalles en Cahill & Isacks, 1992; Allmendinger et al., 1993; Cladouhos et al., 1994; Urreiztieta et al., 1996]. Al sur del codo de Arica, se determina una importante convergencia oblicua que permite el desarrollo de megalineamientos que concentran deformaciones transcurrentes (Figura 1).

Por otro lado, este escenario tectónico controla la disposición y evolución del volcanismo contemporáneo que se expresa variablemente a lo largo de diferentes segmentos. En particular, en la porción central de la Cordillera de los Andes, el volcanismo Neógeno tiende a evolucionar según ejes transversales radiales al Codo (Figura 2).

A la latitud de 27° S, en el centro de la provincia de Catamarca, se localiza la región de Farallón Negro [González Bonorino,

1950] que hospeda una de las mayores concentraciones de depósitos minerales conocidas en la Argentina. Dentro de los depósitos se incluyen, al menos, nueve desarrollos de pórfido cuprífero y tres depósitos epitermales de metales base y metales preciosos. De todos ellos, se destacan el Bajo La Alumbraera con sus 780 millones de toneladas de reservas con 0,52 % Cu y 0,67 g/t Au y Agua Rica con 750 millones de toneladas con 0,62 % Cu, 0,037 % Mo y 0,23 g/t Au [Rojas et al., 1999] que representan las acumulaciones cupríferas más importantes del país y por su tamaño, se pueden catalogar como de clase mundial.

El objetivo de este trabajo es la caracterización cinemática de los controles estructurales que ejerce el Lineamiento Tucumán sobre el volcanismo Neógeno y sus mineralizaciones hidrotermales relacionadas. En este sentido, se sumarizan las principales características geométricas y espaciales de los depósitos y del magmatismo asociado y se discuten los aspectos geoeconómicos de estos controles sobre las actividades de prospección,

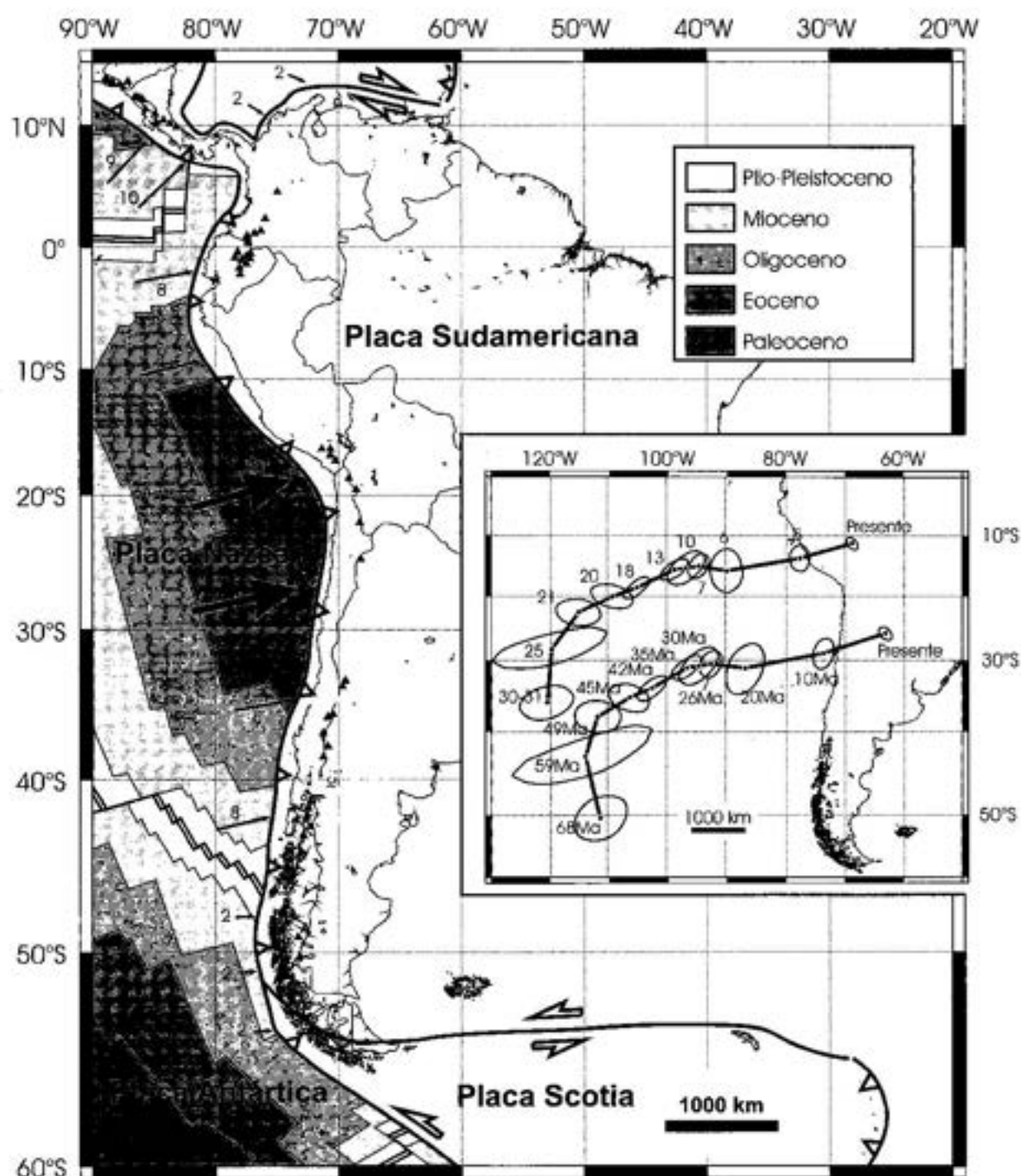


Fig. 1. Esquema del contexto tectónico del Terciario entre la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana. Las placas oceánicas subducen debajo del margen Andino de Sudamérica (línea con triángulos blancos) y se indican las zonas de generación de la corteza oceánica a partir de las cordilleras medio-oceánicas entre las placas Nazca y Antártica, donde las porciones más antiguas están con tonos más oscuros [Pardo-Casas & Molnar, 1987]. Actualmente, las placas convergen a razón de 2 a 10 cm/año (se indican los valores). Los triángulos negros indican la posición de volcanes Cuaternarios. [Modificada de Cobbold et al., 1999].

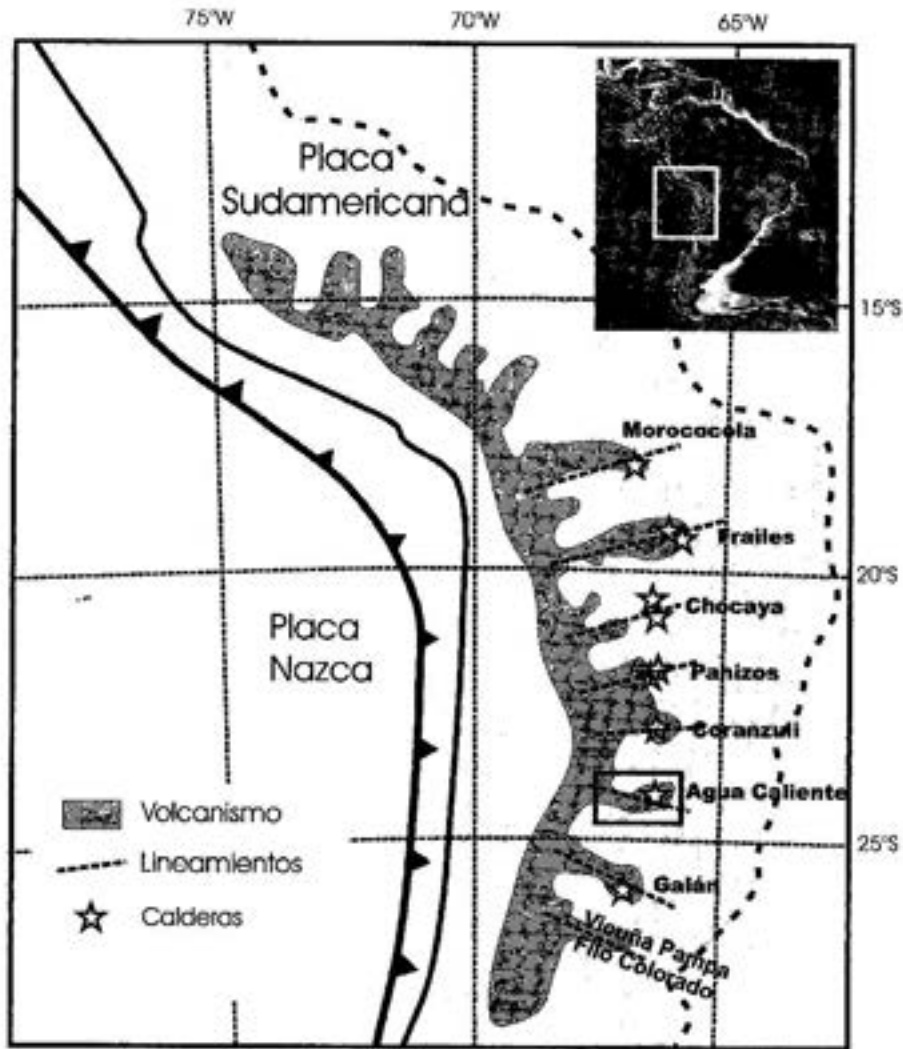


Fig. 2. Distribución del volcanismo Neógeno sobre la Cordillera de los Andes sobre la porción austral del Codo de Arica [tomada de Boudesseul et al., 1999]. Se indican los principales ejes perpendiculares (líneas discontinuas) a la subducción (línea continua con triángulos negros) que concentran la evolución del volcanismo. En el inserto de la esquina superior derecha se indica la posición relativa dentro de una topografía del continente sudamericano.

exploración y explotación de los mismos.

Marco geotécnico

La Cordillera de los Andes constituye un notable accidente topográfico que resalta la silueta sinuosa de la totalidad del margen occidental de la Placa Sudamericana debida a su interacción con las placas oceánicas del Océano Pacífico que subductan hacia el oriente (Figura 1). La placa Nazca exhibe, durante el Neógeno, una velocidad de convergencia mucho mayor [actualmente del orden de los

10 cm/año, Pardo-Casas & Molnar, 1987] con respecto a las vecinas placas Antártida y Cocos, determinante que la parte central de la Placa Sudamericana a la latitud de 20° S muestra la importante entrante del Codo de Arica [Cobbold et al., 1996 y 2000].

A pesar de la situación predominantemente transpresiva de los márgenes septentrional y meridional del continente, esta cadena montañosa es principalmente una faja continua con espesamiento cortical debido al acortamiento horizontal y a la adición de material magmático y sedimentario durante el

Cretácico tardío y Cenozoico [Marret et al., 1994; Coutaud et al. 2001, 1999]. Las esquinas noroccidental y sudoccidental del continente son, en consecuencia, áreas de transición, donde los Andes se curvan variando de rumbos submeridiales a sublatitudinales. De este modo, la cantidad de espesamiento cortical disminuye y la cantidad de transcurencia aumenta. Esta transición es la responsable por los cambios en los estilos estructurales a varias escalas de observación, que suelen presentar zonas de transferencias regionales [Dewey & Lamb, 1992] tal como ocurre a los 27° S con el Lineamiento Tucumán, la inversión de cuencas preexistentes como la del Grupo Salta [Grier et al., 1991; Rossello et al., 1999], e incluso, en la presencia y quimismo del volcanismo andino [González Farrar et al., 1985].

Como respuesta mecánica del antepaís a la deformación Neógena se desarrollan grandes corredores con deformación transcurrente, que tienden a absorber los acortamientos de modo frágil-dúctil. De este modo, pueden reconocerse una serie de lineamientos que limitan bloques que acusan grados de rotación variables [Abels & Bischoff, 1999] como los Lineamientos Tucumán y Desaguadero-Valle Fértil [Rossello et al., 1995].

El accionar conjugado de los lineamientos andinos coetáneos Valle Fértil y Tucumán, determinó la estructuración de todo el antepaís andino, representado en esta región por las Sierras Pampeanas, de bloques limitados por fallas con componentes transcurrentes.

El Lineamiento Valle Fértil y su continuación austral Desaguadero, dispuesta según un rumbo NNO a lo largo de unos 700 km, funcionó a partir del Neógeno tardío como una megafractura transpresiva, con componentes subordinadas senestrales, conjugada de la zona de transferencia dextral del Lineamiento de Tucumán [véanse más detalles en Rossello et al., 1995]. Se lo reconoce, tanto en afloramientos como en subsuelo, por el alineamiento de numerosos altos correspondientes a anticlinales, generalmente escalonados que exhiben en los núcleos desventrados sedimentitas del Paleozoico superior, hacia el norte, o del basamento cristalino, hacia el sur. Por

observaciones cinemáticas realizadas sobre planos de falla estriados, se determina un fallamiento transpresivo regional, que involucra al basamento pre-Terciario, aunque observó importantes reactivaciones desde el Paleozoico [Rossello & Mozetic, 1999a, 1999b].

Los bloques elevados y rotados de basamento, como las depresiones adyacentes, corresponden a sectores sometidos fundamentalmente a compresión [Rossello et al., 1995; Aubry et al., 1996]. Sin embargo, localmente las intersecciones de estas megafracturas definen compartimentos compresivos o distensivos según la geometría y la posición relativa de los bloques limítrofes. Ambas estructuras regionales determinan, por sus disposiciones oblicuas a la tendencia submeridiana de este tramo de la Cordillera de los Andes, la formación de una intersección sintaxial [de acuerdo con la terminología Christie-Blick & Biddle, 1985]. Esta sintaxis tectónica provoca una saliente de la porción occidental de las Sierras Pampeanas que se indenta en la Precordillera (Figura 3), denominada Espolón Umango-Maz debido a su comportamiento mecánico más resistente [Rossello et al., 1996a].

El Lineamiento Tucumán, según fue reconocido por Mon [1976], es un accidente tectónico de importancia regional que corresponde a una estructura transpresiva dextral mayor, dispuesta aproximadamente en dirección N 70° [Jordan et al., 1983], entre el extremo austral de la Puna y las Sierras Pampeanas [Allmendinger, 1986; Allmendinger et al., 1989; Urreiztieta et al., 1996, 1999]. Esta zona de transición está representada por una faja de aproximadamente unos 100 kilómetros de ancho que se ubica en torno a los 27° de latitud Sur y coincide con variaciones estructurales mayores que exhibe la cadena andina. Esta región marca un cambio importante en la geometría, naturaleza y tipo de subducción que influyó en las características magmáticas del volcanismo asociado [Allmendinger et al., 1997]. De este modo, hacia el Sur puede determinarse: i) una reducción importante de la anchura de la cadena andina, ii) una disminución de la topografía entre Puna y Sierras Pampeanas, iii) una reducción de la inclinación del plano de subducción de

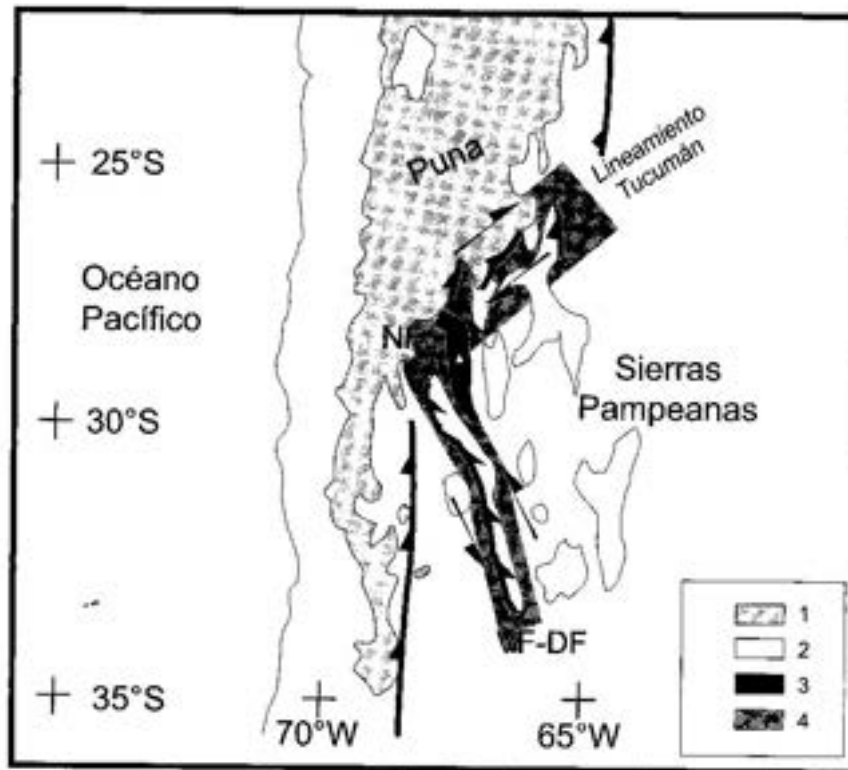


Fig. 3. Esquema tectónico del antepaís andino donde se indica la posición del Espolón del Nevado del Famatina (NF), localizado en el compartimento compresivo de la sintaxis tectónica generada por la transpresión dextral del Lineamiento Tucumán y la transpresión senestral del Lineamiento Valle Fértil-Desaguadero (VF-DF). 1: Fajas con deformación transcurrente, 2: Sierras Pampeanas, 3: Espolón Nevado del Famatina, 4: sectores con topografías superiores a 4.000 m

la Placa de Nazca, y iv) la ausencia de vulcanismo Neógeno entre 27° y 33° S.

La comarca del Lineamiento Tucumán se desarrolla en Sierras Pampeanas Occidentales que se caracteriza por bloques preferencialmente submeridionales basculados de basamento cristalino-metamórfico precámbrico con intrusiones graníticas cambro-devónicas, afectado por un conspicuo clivaje penetrativo dispuesto N 165°, subvertical [Le Corre & Rossello, 1994] intercalados con remanentes sedimentarios que ocupan las depresiones intermontanas. Los registros sedimentarios que se apoyan sobre peneplanicies labradas sobre el basamento son de edades cretácicas [Rossello et al., 1999a] y neógenas, y permanecieron preservados en bolsones intermontanos que exhiben una tectónica de tipo piel gruesa que provoca basculamiento y rotación de un verdadero mosaico de bloques submeridionales limitados por fallas inversas

de alto ángulo con vergencia andina antitética que data de unos 7 Ma, aunque fue más intensa entre 4 y 3,4 Ma (Figura 4).

Los relieves topográficos así generados, alternan con los potentes niveles continentales anteriormente descritos que constituyen las cuencas cenozoicas de antepaís y adquieren estilos estructurales de cuencas compresivas que varían desde las típicamente de antepaís hacia las de tipo hemi-rampas sobre una zona muy extensa que orla a la Cordillera de los Andes [Cobbold et al., 1993].

Estudios cinemáticos realizados por Urreiztieta et al. [1996] permiten reconocer dos campos de deformación superpuestos: i) uno con alcances más restringidos que posee ejes principales de acortamiento subhorizontales dispuestos NO que corresponde a una consecuencia local de la evolución estructural del borde SE del altiplano [Assumpção y Araujo, 1993], y otro ii) con significación más

regional cuyos ejes principales de acortamiento se localizan según direcciones E-O a OSO y corresponden a la cinemática global de placas determinado por la convergencia relativa de la Placa de Nazca con respecto a la Placa Sudamericana [Assumpção y Araujo, 1993; Gripp y Gordon, 1990; Pardo-Casas y Molnar, 1987]. La deformación así obtenida en la región del Lineamiento Tucumán puede ser interpretada como una combinación de cizallamiento simple paralelo a la dirección y cizallamiento puro con un estiramiento principal vertical.

El campo de deformación resultante genera una importante zona de transferencia sobre el frente andino que determina que diferentes bloques de basamento y su cubierta sedimentaria Neógena de las Sierras Pampeanas se vean particularmente afectados. Así, las sierras de El Durazno, Hualfin, Las Cuevas, Belén y Aconquija, como sus cuencas compresivas aledañas [Urreiztieta et al., 1993], están dispuestas en échelon, observando rotaciones según ejes verticales locales horarias [Aubry et al., 1995], con importantes componentes transcurrentes dextrales sobre las fallas que las limitan hacia el naciente [Urreiztieta et al., 1993 y 1996]. De esta manera, observan notables desviaciones con respecto a los sectores submeridionales ubicados más hacia el norte: Sierras de Quilmes, Cumbres Calchaquíes, etc., o al sur: Sierras de Ambato, Ancasti, Velasco, etc (Figura 4).

Depósitos minerales localizados sobre el Lineamiento Tucumán

Sobre la traza del Lineamiento Tucumán y su zona de influencia se reconoce una serie de manifestaciones minerales de gran potencial económico que pueden agruparse en lo que se denomina informalmente el Distrito Minero Farallón Negro (Figura 4). Actualmente algunas de ellas se encuentran en etapas de desarrollo y explotación.

Todos estos depósitos minerales acusan un origen hidrotermal asociado al volcanismo Neógeno y observan controles estructurales regionales comunes que expresan una relación directa con la cinemática transcurrente dextral del mismo. García [1970a] y

Angelelli [1984] reconocieron que muchos de ellos (Bajo Agua Tapada, Bajo Las Pampitas, Bajo El Espanto, Bajo Los Jejenes, Bajo San Lucas, Bajo Las Juntas) ocupan, desde el punto de vista espacial, una misma banda alineada en dirección NNO, o incluso en intersecciones de lineamientos como el Bajo La Alumbra y Bajo del Durazno [Bassi, 1987], aunque todos con disposiciones espaciales y geometrías comunes (Figura 5A). Por su parte, Sasso & Clark [1998, 1999] incrementan el conocimiento metalogenético de estos depósitos hidrotermales caracterizando su geoquímica y relaciones temporales (Figura 5B).

En el presente estudio se realiza un análisis dinámico integral de las estructuras mayores que controlan los cuerpos hipabisales y sus alteraciones Neógenas responsables de las mineralizaciones dentro del contexto temporoespacial del Lineamiento Tucumán. Los diferentes depósitos minerales descritos expresan una disposición espacial común que aprovecha las condiciones de dilatación que se genera subparalelamente al esfuerzo principal máximo que lo generó y una consanguinidad con respecto al volcanismo Neógeno.

Por esta razón, y con el objeto de correlacionar los controles estructurales de los depósitos localizados sobre la zona de influencia mecánica del Lineamiento Tucumán, a continuación se reseñan de modo muy simplificado y a partir de datos propios y de la bibliografía disponible las principales características geométricas y las disposiciones espaciales generales que acusan.

Bajo La Alumbra

El Bajo La Alumbra es un típico pórfido cupro-aurífero [véanse detalles en Bassi & Rochefort, 1980; Guilbert & Park, 1986; Sillitoe, 1988; Mahlburg Kay et al., 1988; Jones, 1996], asociado al Complejo Volcánico Farallón Negro [González Bonorino, 1950], sobre la porción central del Lineamiento Tucumán (Figura 4). Este complejo volcánico está constituido por un paquete efusivo mesosilícico potente, subordinadamente piroclástico, intruido por cuerpos hipabisales andesíticos, con edades isotópicas comprendidas entre $10,6 \pm 0,5$ a $6,0 \pm 0,2$ Ma y conspicuas alteraciones hidrotermales mucho más jóvenes.

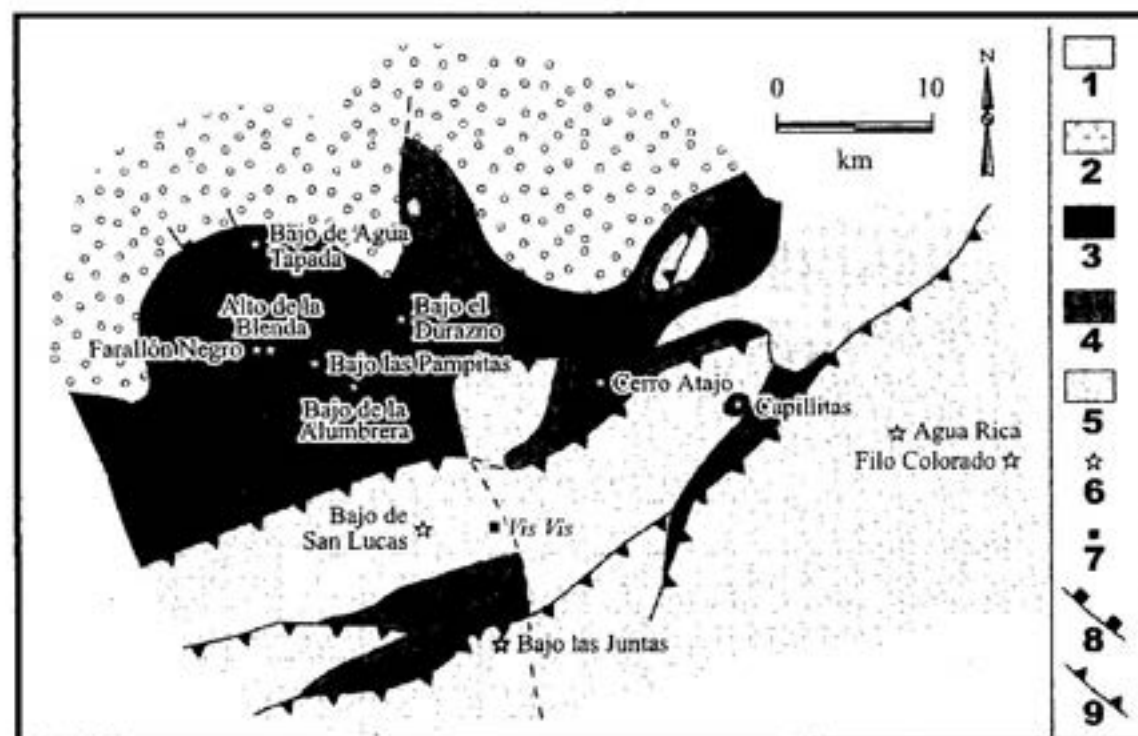
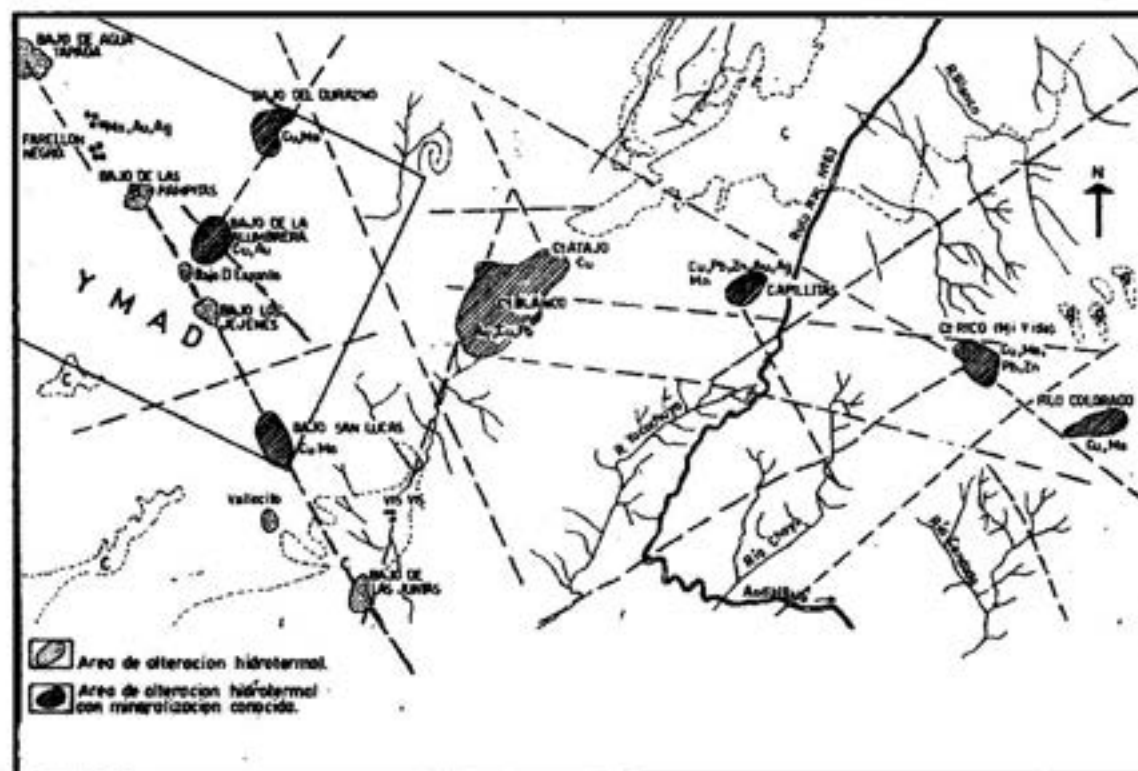


Fig. 5. *Arriba*. Las principales áreas de depósitos y alteración hidrotermal localizadas sobre el Lineamiento de Tucumán y los principales lineamientos interpretados [tomado de Angelelli, 1984]. *Abajo*: Equema tectónico regional y las principales manifestaciones económicas de la región de Farallón Negro [tomado de Sasso y Clark, 1999]. 1: Cubierta moderna, 2: Conglomerados Cuaternarios, 3: Volcanismo Neógeno, 4: Sedimentitas Terciarias, 5: Basamento, 6: Depósitos minerales, 7: Poblados, 8: Fallamiento extensivo, 9: Fallamiento compresivo.

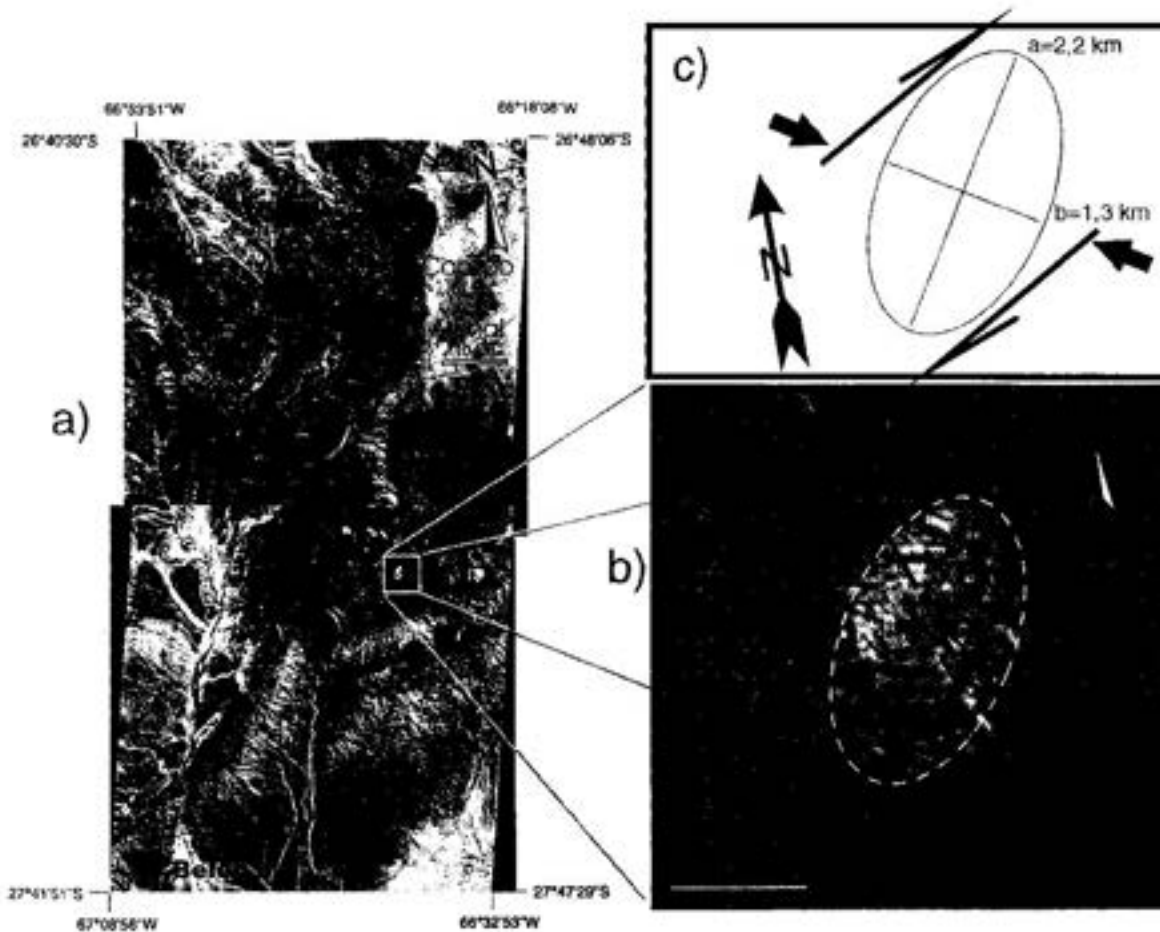


Fig. 6. a) Imágenes satelitales Spot (sistema XS - 3 canales espectrales) con resolución de 20 metros y un tamaño de 60 x 60 km. b) Detalle de la zona del Bajo de la Alumbraera que exhibe las características espectrales más claras de las rocas del Bajo La Alumbraera y la geometría elíptica de los afloramientos. c) Esquema que remarca la compatibilidad de la geometría de los afloramientos del Bajo La Alumbraera (ejes mayor y menor) con la cinemática con componente dextral local determinada por análisis microtectónico [Urreiztieta et al., 1993]. El eje principal de acortamiento (esfuerzos principales máximos) está indicado por las flechas negras [tomado de Rossello et al., 1996b].

nes [Caelles et al., 1971; Sasso & Clark, 1998 y 1999]. La mineralización está hospedada en unidades volcánicas del Complejo Volcánico Farallón Negro (con una edad comprendida entre 10,6 y 6 Ma) y sus encajantes del basamento cristalino [Llambías, 1970 y 1972]. Los depósitos de cobre porfídico del Complejo Farallón Negro se caracterizan por tener una edad Mioceno Superior [entre 8,56 a 6,75 Ma; Sasso & Clark, 1998], una zonación de alteración-mineralización potásica con halo filico y envolvente propilítica distal, una mineralización hipogénica de Cu asociada a stockwork de cuarzo-magnetita-calcopirita desarrollado en la alteración potásica, valores anómalos

altos de Au en la mena de Cu, núcleos con asociaciones ricas en magnetita y una generalizada ausencia de mineralización económica de Cu supergénico [Rojas et al., 1999].

Rossello et al. [1996b] asumen que la geometría pre-deformación del Bajo La Alumbraera se aproximaba a un cilindro dispuesto verticalmente y con un comportamiento mecánico global tal que permite su deformación homogénea. De esta manera, consideraron: i) por un lado, que los conductos volcánicos, sean de alimentación o de alteración, son tradicionalmente subcilíndricos, y ii) por otro lado, la naturaleza volcánica y la profundidad del emplazamiento que acusa permite

suponer que al menos alguna fracción de los materiales que lo componen se encontraba a mayor temperatura, en estado semisólido o en fusión, facilitando de esta manera, un comportamiento bastante similar del conjunto volcánico con respecto al basamento que los incluye. Para expresar su silueta aflorante, utilizaron tratamientos digitalizados de imágenes satelitales Spot (sistema XS - 3 canales espectrales) con resolución de 20 metros y un tamaño de 60 x 60 km (Figura 6a) que facilita la identificación y el cálculo de las magnitudes de las elipses consideradas.

El contraste cromático marcado que exhibe el Bajo La Alumbraera sobre las imágenes satelitales con respecto a las volcanitas y piroclastitas circundantes permite realizar un análisis cartográfico directo de la forma elíptica que muestran sus afloramientos (Figura 6A). De esta manera, se puede calcular una elipticidad $R = 1,69$; considerando como ejes mayor 2,2 km y menor 1,3 km (Figura 6b). La dirección del eje mayor de la elipse es $N 30^\circ$, por lo tanto presenta un ángulo horario de 20° con respecto a la dirección general del Lineamiento Tucumán (Figura 6c). Debido a la fuerte analogía que existe entre esta geometría con la elipse de deformación teórica generada a partir del funcionamiento del Lineamiento Tucumán se considera que el Bajo La Alumbraera es un megamarcador pasivo, cuya geometría ha podido ser adquirida bajo un régimen transpresivo dextral sin a postgenético con respecto a su emplazamiento. De esta manera, el patrón de esfuerzos y deformación general que determina el LT observarán componentes transcurrentes paralelas dextrales (R) y las $N130$ a $N140$ senestrales (R') que pueden ser interpoladas [Rossello et al., 1996b; Rossello, 2000].

El conjunto fue afectado tardíamente por diques, vetas y fracturas dispuestos en sistemas conjugados cuyas bisectrices se localizan en la dirección NNO y asociados a numerosas fracturas mayores que controlan mineralizaciones cogenéticas periféricas, como la de la Mina Farallón Negro-Alto de la Blenda, que se dispone $N 150^\circ$ y con un movimiento conjugado senestral. La dirección NNO extensiva que se determina a partir del análisis cinemático de la elipse de deformación

resultante (Figura 6c) es aprovechada para el emplazamiento de los diques tardíos que exhibe el Bajo La Alumbraera, tal como fue oportunamente cartografiado [véanse mayores detalles en Angelelli, 1984]. Con respecto a las edades, Sasso & Clark [1998] determinaron a partir de biotita magmática que el stock porfírico Los Amarillos (D) tiene $7,1 \pm 0,13$ Ma, el stock dacítico porfírico principal (C) arroja $6,98 \pm 0,08$ Ma, los diques porfíricos del Noroeste (B) dan $6,83 \pm 0,07$ Ma y los pórfiros tardíos (A) presentan sericita hidrotermal que arrojan una edad de $6,75 \pm 0,09$ Ma (Figura 7). Además, se registran diques post-minerales que aún no se dispone de su exacta asignación temporal.

La geometría adquirida por el Bajo La Alumbraera es una consecuencia de fenómenos volcánicos propios a su generación y a la evolución sin a postgenética de la deformación andina descrita en la región. En este sentido, resulta inicialmente válido considerar su estructuración dentro del contexto transpresivo dextral Neógeno del Lineamiento Tucumán [Rossello et al., 1996b]. El campo de deformación actuante sobre un macizo rocoso o una región puede ser evaluado directamente a partir de la deformación registrada sobre objetos preexistentes de forma inicial conocida o sobre objetos que se desarrollan durante la deformación, independientemente del tamaño de los mismos, a condición que estos objetos no sean más resistentes que los materiales circunyacentes. Así, los objetos inicialmente circulares permiten una rápida evaluación bidimensional de la deformación homogénea al generar directamente la elipse de deformación finita sufrida por los materiales que la conforman [Ramsay & Huber, 1983].

Farallón Negro-Alto de la Blenda

Los yacimientos Farallón Negro y Alto de la Blenda constituyen un sistema epitermal del tipo adularia-sericita rico en Au-Ag-Mn que se expresa en varios cuerpos biextendidos de mineralizaciones de cuarzo y carbonatos que contienen Au, Ag y Mn que se explotan con rendimiento económico a partir de labores subterráneos. Estos cuerpos que representan el cortejo hidrotermal tardío del magmatismo del Complejo Volcánico Farallón



Fig. 7. Esquema geológico del Bajo La Alumbarrera donde se indica la posición de los diques (grisado más oscuro) que lo intruyen tardíamente [tomado de Sasso & Clark, 1999]. Las letras indican la posición de muestreos realizados que se discuten en el texto.

Negro exhiben más de 1 km de corrida y varios metros de potencia a lo largo de una faja de unos 20 km con rumbos preferenciales sublatitudinales a NO a NNO. Están emplazados como el relleno de grandes fracturas que proporcionaron espacios abiertos dentro de diferentes unidades litológicas del Complejo Volcánico Farallón Negro [García, 1970a].

El yacimiento Alto de la Blenda es un sistema de cinco vetas mineralizadas principales con potencias variables entre 1,5 y 7 m que alcanzan una extensión máxima de aproximadamente 2 km y se emplazan dentro de la monzonita de la Blenda y brechas

volcánicas andesíticas (Figura 8A). Estas vetas observan rumbos comprendidos entre N20° a 30° O y 60-65° de inclinación al N (Veta Portezuelo) a N35° a 55° O con inclinaciones subverticales a 70° al NE (Veta Laboreo). La alteración filica vinculada con la mineralización ha sido datada en $6,55 \pm 0,14$ Ma [Alderete, 1999a].

La veta Farallón Negro exhibe una geometría arrosariada que presenta una corrida de unos 2 km dispuesta con un rumbo general sublatitudinal, con inclinaciones subverticales a 65 a 85° al N y potencias variables entre 1 y 19 m, aunque su promedio

se aproxima a los 10 m. Su continuación occidental (veta Los Viscos) se prolonga por unos 3 km, adopta rumbos N 60° O y su potencia se incrementa notablemente hasta alcanzar unos 32 m con numerosas vetas y guías subparalelas [Angelelli, 1984]. La veta Macho Muerto, es un cuerpo de 3,5 km de corrida y con potencias de hasta 11 m de potencia que se dispone más al norte con rumbo sublatitudinal.

Todas estas grandes vetas, pueden agruparse en un sistema transcurrente dextral controlado por una dirección regional ENE a sublatitudinal (próximo al Lineamiento Tucumán) donde los tramos que tuercen hacia el cuadrante NO ocupan posiciones más dilatantes por su disposición subparalela al esfuerzo principal máximo.

Bajo Agua Tapada

El Bajo de Agua Tapada es un típico pórfido cuprífero dacítico asociado estructuralmente al Complejo Volcánico Farallón Negro. Alderete [1999b] caracteriza geométricamente al Bajo de Agua Tapada por una pronunciada fábrica estructural NO, con un rumbo aproximado N 54° O (Figura 8B). Esta zona de debilidad controló el emplazamiento del stock de pórfido dacítico principal, sus cuerpos y diques asociados como vetas que se encuentran hacia su borde occidental (Pique Agua Tapada, La Jovita) y la intensa alteración hidrotermal que exhiben. Esta última fue canalizada con la misma orientación general que presenta el Bajo de Agua Tapada, con una zona en forma de ojo elongada NO.

Un dique temprano de andesita de grano fino y otro con textura porfídica, también dispuesto en la misma dirección, sugieren una historia prolongada del fallamiento pero siempre en esa orientación general que es la expresión de un patrón estructural regional generado por el Lineamiento Tucumán. Remarcando la importancia de esta dirección de extensión se reconocen varios pequeños diques, stocks y zonas de alteración con la misma disposición espacial NO.

Las estructuras presentes en este pórfido, como las que controlan algunos tramos de filones adyacentes sublatitudinales reconocidos mediante laboreos mineros (San-

to Domingo, La Josefa, Agua Tapada, etc.), se concentran en rumbos que ocupan el cuadrante NO (Figura 8B), paralelizándose con la dirección del esfuerzo principal máximo responsable del Lineamiento Tucumán.

Bajo Las Pampitas

El Bajo Las Pampitas es un depósito de tipo pórfido cuprífero con alteración hidrotermal que exhibe anomalías auríferas localizada en la depresión homónima dentro de un ambiente de basamento volcánico del Complejo Farallón Negro y de la monzonita Alto de la Blenda [García, 1970b]. Este depósito exhibe una silueta groseramente trapezoidal de unos 2 km² y escasos afloramientos aislados de pórfidos dacíticos y riódacíticos y brechas volcánicas con alteraciones filicas que se encuentran prácticamente cubiertos por materiales aluvionales modernos (Figura 8C).

La depresión está limitada por grandes fracturas submeridianales y sublatitudinales, aunque predominan las dispuestas NNO subverticales y con desplazamientos laterales decamétricos reconocibles por relevamientos de superficie [García, 1970b]. En el centro de la depresión se reconoce una chimenea de brecha que presenta una geometría ovalada y posiblemente vertical que presenta sectores con mineralización bandeada dispuesta con rumbos que varían desde Az. 70° a 120° [Alderete, 1999c]. Diques de pórfido dacítico y andesítico, como contactos geológicos entre las principales unidades que constituyen su encajante, se disponen NO.

Cerro Atajo

El Cerro Atajo es un distrito aurífero que abarca unos 8 km² con numerosas vetas de sulfuros polimetálicos portadores de oro y plata y stockworks y brechas que definen varios sectores mineralizados localizados en su periferia (Figura 9A). Peralta [1999] describe la geología del distrito constituida por diferentes unidades volcánicas lávicas, brechosas y aglomerádicas miocenas que presentan dos grandes diques intrusivos (Cerro Blanco y Cerro Atajo) emplazados a modo de domos lacolíticos cuyas mayores dimensiones en planta se disponen en dirección NNO y donde

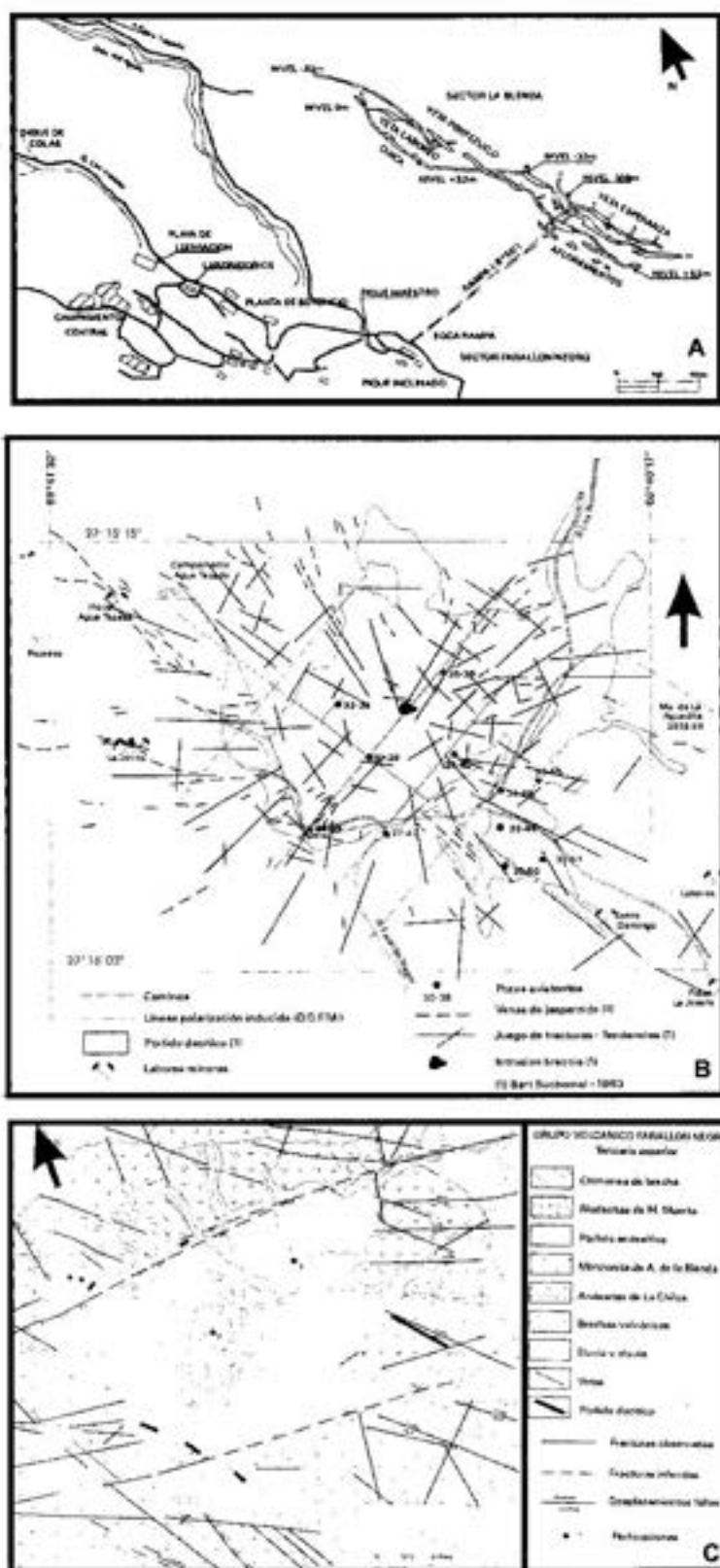


Fig. 8. A) Esquema de la posición espacial de las principales labores sobreveta de las Mina Farallón Negro-Alto de la Blenda [tomado de Alderete, 1999a]. B) Esquema estructural del Bajo de Agua Tapada, donde se indica la disposición de las principales fracturas [tomado de Alderete, 1999b]. C) Esquema del Bajo Las Pampitas que exhibe la disposición de las principales estructuras [tomado de García, 1970b].

una datación sobre biotita magmática del intrusivo Cerro Atajo arrojó $5,5 \pm 0,1$ Ma.

La estructura principal del distrito está dominada por dos grandes fallas comprensivas que se pueden reconocer a lo largo de varios kilómetros: a) Falla Atajo, dispuesta sublatitudinal y claras evidencias plurihectométricas de desplazamiento dextral, y b) Falla Lavadera con rumbo NE y 50° de inclinación al SE que hace cabalgar al basamento cristalino sobre las volcanitas Neógenas. Además, Peralta [1999] menciona muchas fracturas menores dispuestas con rumbos NO que estima que actuaron como "canales" para las soluciones hidrotermales que determinaron las mineralizaciones económicas.

Capillitas

El yacimiento de Cu-Au Capillitas, conocido desde épocas precolombinas, es un depósito epitermal polimetálico de alta sulfuración localizado al este del Distrito Farallón Negro (Figura 4) en una diatrema elipsoidal cónica constituida por volcanitas ácidas brechosas, porfiritas y diques básicos de composición basáltica, donde la dacita Pan de Azúcar y riolitas arrojaron $5 \pm 0,5$ Ma [Márquez-Zavalía, 1999]. El cuerpo volcánico exhibe un eje mayor de unos 1,5 km que se dispone NE al igual que la estructura regional representada por una falla NE que limita al contacto entre el cuerpo volcánico y el basamento cristalino con fracturas subverticales que afectan al granito y una dominante orientación NNO y trenes subordinados NE [Márquez-Zavalía, 1999].

Las vetas que rellenan fracturas, como los diques volcánicos subsidiarios, se disponen con rumbos NE y NO. Por ello, Angelelli [1984] considera que el yacimiento está integrado por diversas vetas que pueden agruparse en dos sistemas principales: uno que comprende La Grande, Rosario, Restauradora II, Argentina y Nueva Esperanza con rumbo ENE, y el segundo por Restauradora I, Carmelitas, Restauradora IV y veta 9, orientadas ONO, todas con inclinación preponderante hacia el S (Figura 9B).

Si se analiza su disposición espacial en conjunto se puede determinar que ellas constituyen un sistema sigmoidal con pandeos

de alivio derechos que remarcan la cinemática dextral del Lineamiento Tucumán. De este modo, los tramos que adoptan direcciones NO (se paralelizan con los esfuerzos principales máximos) se emplazan dentro del Complejo Volcánico Capillitas y observan las mayores potencias y corridas de hasta 300 m (Vetas Capillitas, San Salvador). Del mismo modo, los tramos de las vetas dispuestas con rumbos generales NE (La Grande, Luisita, Argentina) que tuercen para disponerse sublatitudinalmente, adquieren allí mayores potencias por remarcar el pando distensivo.

Agua Rica

El depósito de Cu-Mo-Au de Agua Rica, actualmente a la espera de su explotación, está asociado a stocks porfíricos y brechas hidrotermales que afloran en un área groseramente elíptica en dirección NNO de aproximadamente $2,5 \times 2$ km. Observan un alto contenido de Mo y mineralización supergénica económica de Cu, presencia de grandes diatremas y dos sistemas de pórfidos (Melcho y Quebrada Seca-Trampeadero) localizadas en el contacto entre metasedimentitas del complejo Sierra de Aconquija y una granodiorita porfírica del batolito de Capillitas [véanse detalles en Roco & Koukharsky, 1999].

Rojas et al. [1999] caracterizan al depósito de Agua Rica por presentar varios lineamientos estructurales y estructuras pobremente definidas con direcciones dominantes NO y NE, donde la más prominente coincide con el valle de la Quebrada de Minas con rumbo N 30° a 40° O (Figura 10A). Otros lineamientos con rumbos N 30° a 45° E se observan en las quebradas Yegüitas y Agua Rica y cabalgamientos que inclinan 60° a 25° al SE.

La mineralización hipogénica de Cu-Mo-Au aparece en asociaciones de alteración tipo pórfido y epitermal en los sectores Melcho, Quebrada Seca y Trampeadero, mientras que la mineralización supergénica de Cu ocurre en quebrada Seca-Trampeadero (Figura 10B). Los eventos de alteración y mineralización hipogénica forman parte de un sistema hidrotermal de sólo 1,4 Ma ocurrido entre 6,29 y 4,88 Ma [Rojas et al., 1999]. De esta manera, las dataciones K-Ar realizadas indican

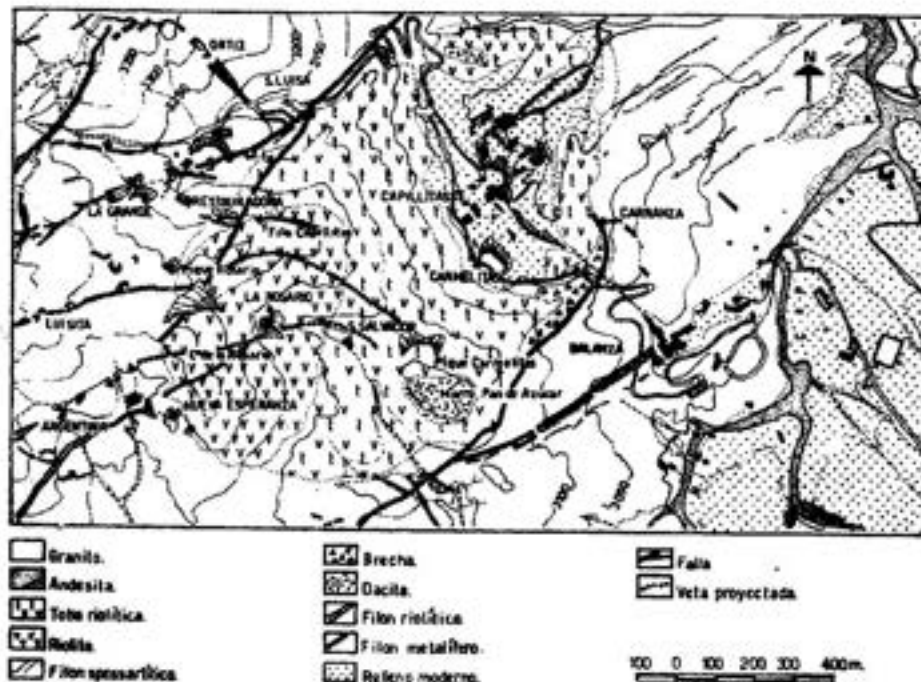
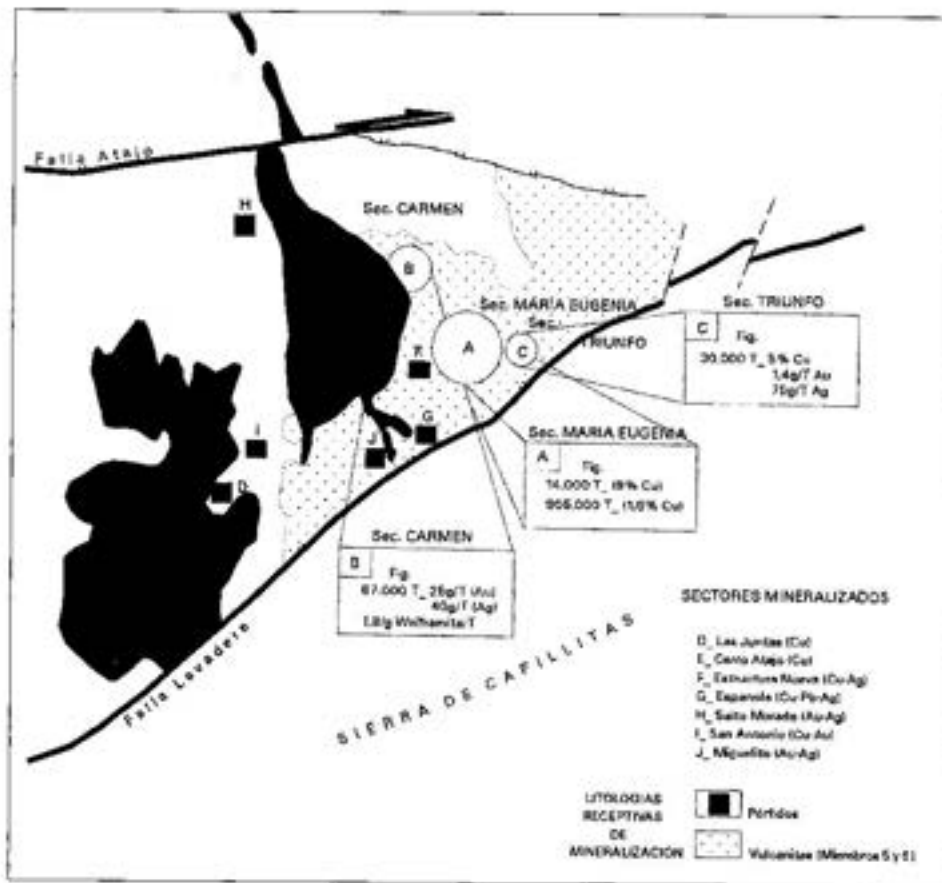


Fig. 9. Arriba) Esquema geológico del Cerro Atajo, donde indica la posición de los intrusivos y de las componentes transcurrentes del fallamiento principal [tomado de Peralta, 1999]. Abajo) Esquema geológico del Distrito Capillitas [tomado de Angelelli, 1984].

edades comprendidas entre el Mioceno Superior a Plioceno Inferior para la alteración asociada a la mineralización hipogénica y mucho más recientes por una muestra de alunita proveniente de una venilla masiva probablemente supergénica que arrojó una edad de $3,94 \pm 0,05$ Ma [Sasso & Clark, 1999].

Filo Colorado

El depósito de Filo Colorado es un típico pórfido de cobre [Guillou, 1999] y está representado por tobas brechosas que se emplazan en el contacto entre granitos y metasedimentitas típico del basamento cristalino de las Sierras Pampeanas que se dispone con rumbo NO [Alderete et al., 1987] y ocupa la posición más oriental de todas las manifestaciones minerales de la región afectada por Lineamiento Tucumán (Figura 4).

Si bien no se dispone de mapeos detallados, a partir de Chipulina & González [1983] es posible reconocer diques doleríticos terciarios periféricos al núcleo de tobas y brechas volcánicas que se disponen preferencialmente con rumbos NO y NE. De este modo se describe un área de mineralización de Cu-Mo que se expresa a través de la presencia de sulfuros dispuestos en vetillas y disseminados asociados a áreas de alteración potásica y filica pirítica zonal que se desarrolla entre 400 y 800 m de diámetro rodeada por un halo de alteración propilítica de 400 m (Figura 10C).

Las principales zonas mineralizadas, expresadas por los mayores contenidos de sulfuros y anomalías geoquímicas, se ubican dentro de los sectores intruidos por dacitas porfídicas en forma de cuellos y donde son notables zonas de brechas y fallas localizados a lo largo de la Quebrada Colorado que se dispone preferencialmente NO (Figura 10C).

Caldera Vicuña Pampa

La Caldera Vicuña Pampa [Rossello, 1980 y 2001] se emplaza en el borde austral de la Puna y sobre una posición occidental y casi en el límite septentrional del Lineamiento Tucumán (Figura 4). A pesar de estar localizada por fuera del Distrito Farallón Negro se considera oportuno integrarla al análisis regional de este trabajo, ya que posee rasgos de consanguinidad con respecto sus manifesta-

ciones volcánicas y acusa controles estructurales semejantes vinculados con el Lineamiento Tucumán.

La Caldera Vicuña Pampa posee manifestaciones metalogenéticas vetiformes y disseminadas aún no profundamente reconocidas [Rossello, 1984 y 1990; Rossello & Jones, 1999] y que incrementan el ya importante potencial económico que acusa este sector de Catamarca [García & Rossello, 1984]. Morfológicamente, se localiza sobre el escalón erosivo que limita la Puna de las Sierras Pampeanas, razón por la cual exhibe una silueta semilunar abierta hacia el sudeste por la erosión del río Vicuña Pampa edificada sobre un zócalo o basamento peneplanizado que actualmente se localiza a unos 4.000 m s.n.m. Sus características geológicas pueden ser resumidas subdividiéndose en el basamento prevolcánico, el Complejo Volcánico Vicuña Pampa que integra las litologías vinculadas con la caldera y los rellenos modernos que tapizan su depresión central y alrededores [Rossello, 1983; García & Rossello, 1984]. El basamento está integrado por el Grupo Cachiñán (sedimentitas y ectinitas con metamorfismo dinámicos y térmicos de Fm. Loma Corral, rocas carbonáticas y brechosas variablemente metamorfozadas de Fm. Totorillas y metabasitas del Cuerpo La Cuesta) y las plutonitas de la Fm. Chango Real relacionada con la Fm. Famabalasto (gneisses y esquistos), el Granito La Cuesta y la Fm. Papachacra [Rossello et al., 2000].

El edificio volcánico del Complejo Volcánico Vicuña Pampa está integrado por tres unidades litoestratigráficas principales [Rossello, 1983]: a) Asociación Volcánica Inferior piroclástica-efusiva y composición ácida a mesosilícica. Una edad K/Ar roca total (INGEIS) de pórfidos gábricos de las Lomas del Medio y al Sur del Campo Quinchamal arrojaron $25,0 \pm 1,0$ Ma; b) Fm. Chucolay constituida por aglomerados y brechas volcánicas ignimbríticas. Edades K/Ar roca total (INGEIS) de diques felsíticos arrojaron $14,0 \pm 0,5$ Ma y de una riolita ignimbrítica $19,0 \pm 1,0$ Ma; c) Asociación Volcánica Superior integrada por volcanitas ácidas y básicas con olivina y afinidad alcalina que constituye la estructura periclinal de los sectores remanen-

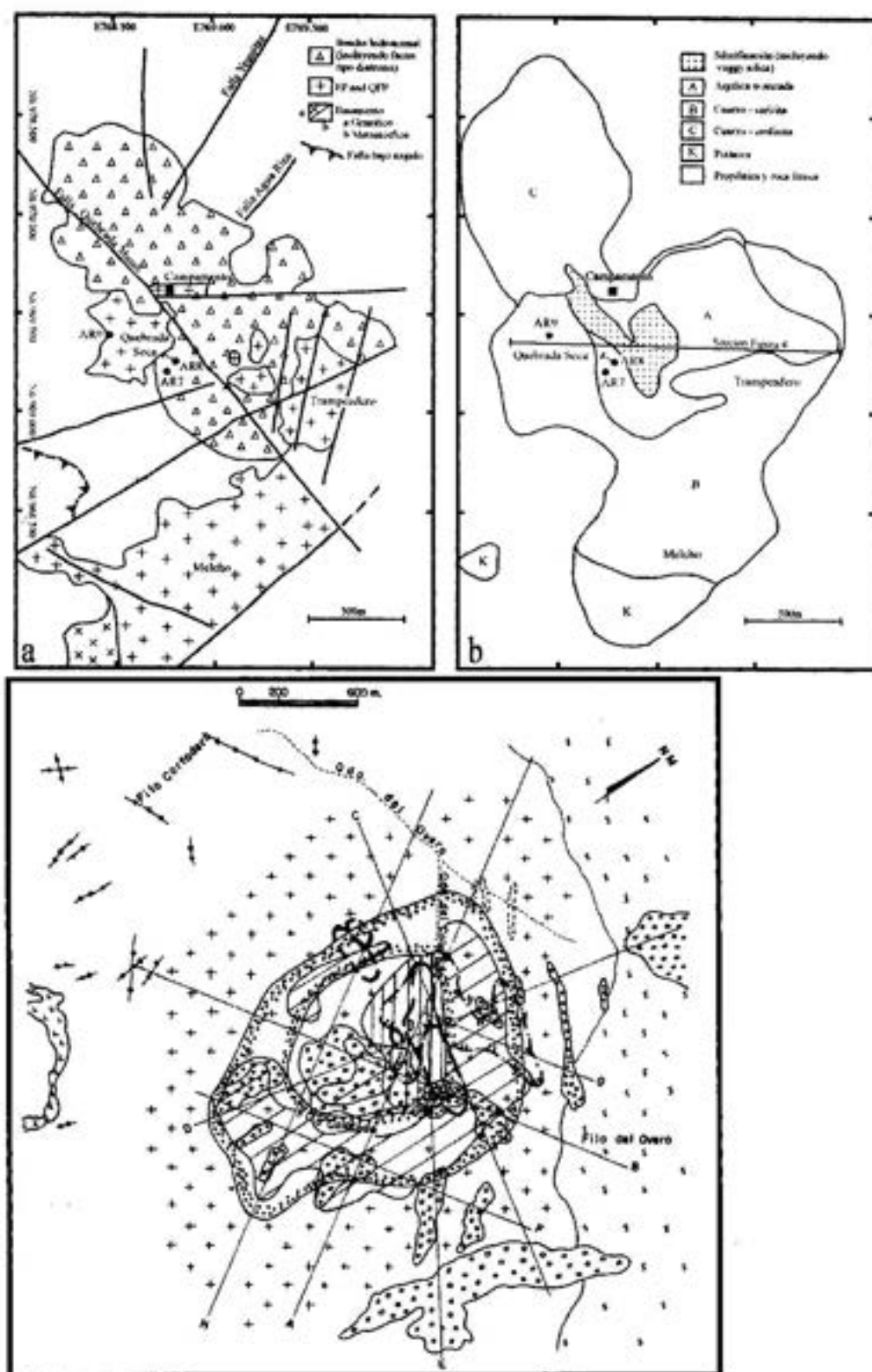


Fig. 10. *Arriba*) Esquema geológico simplificado de Agua Rica [tomado de Rojas et al., 1999], donde a) indica la posición de los intrusivos y de las componentes transcurrentes del fallamiento principal, y b) exhibe la distribución en planta de la alteración). *Abajo*) Esquema geológico de Filo Colorado, donde se indica la posición de las principales unidades litoestratigráficas [tomado de Chipulina & González, 1983].

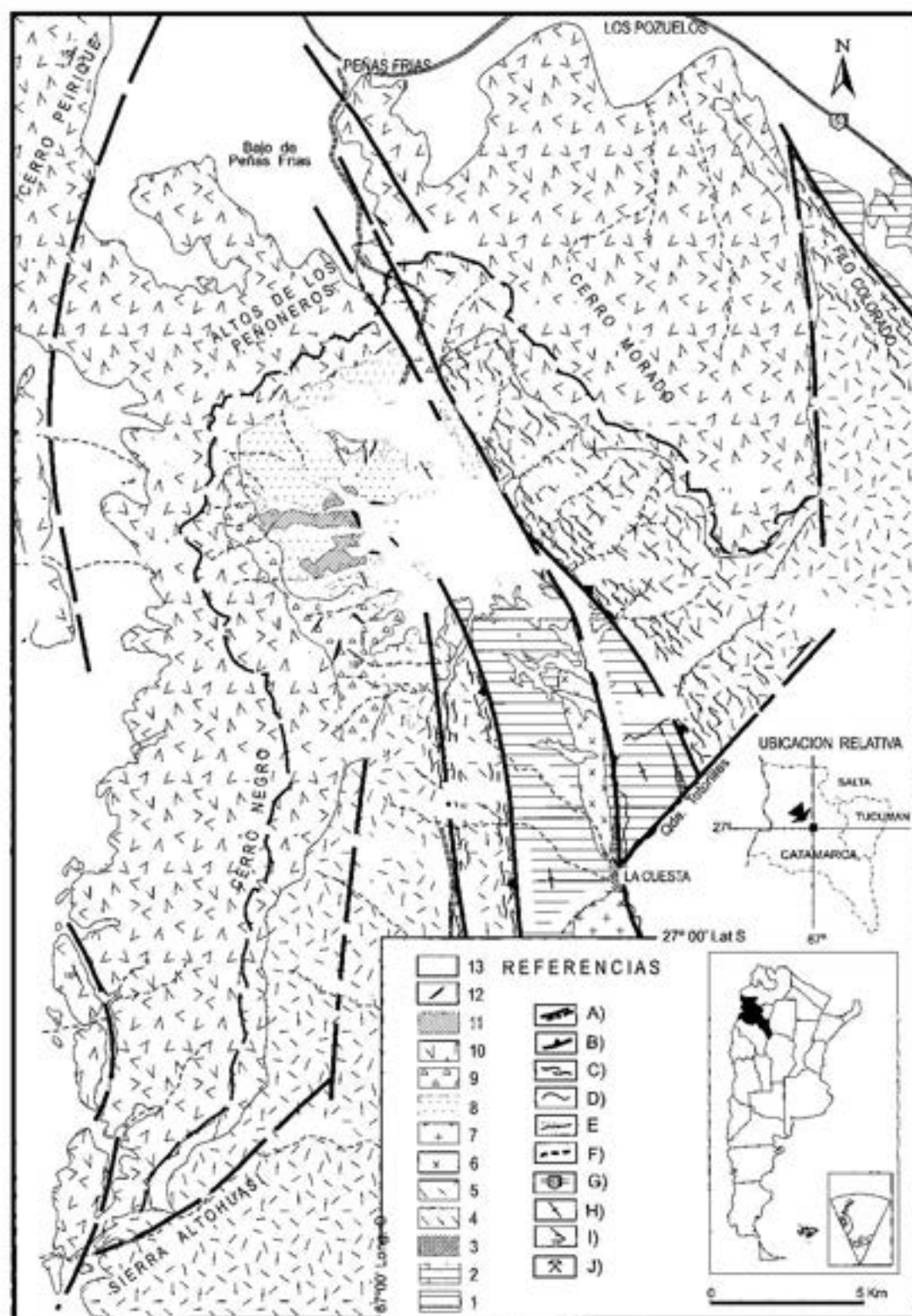


Fig. 11. Esquema geológico de la Caldera Vicuña Pampa [simplificada de Rosello, 1983]. 1: Grupo Cachián, 2: Migmatitas, 3: Intrusivos prevolcánicos, 4: Asociación Volcánica Inferior, 5: Intrusivos, 6: F. Chucolay, 7: Asociación Volcánica Superior, 8: relleno moderno y 9: traza interna de la caldera y 10: Fallas principales. Las letras indican la posición de: a: Vetas Lomas del Medio, b: Vetas del Portezuelo, c: Vetas Punta de Bramadores, d: Vetas Hornito, e: Cuerpos Gábricos Porfíroides, f: Los Bayitos, g: Campo del Quinchamal.



Fig. 12. Localización del Lineamiento Tucumán sobre una topografía digitalizada (véase en el inserto de la esquina superior derecha su ubicación relativa dentro de la Argentina). Se indica la posición de manifestaciones volcánicas Neógenas en dos grandes ejes: uno involucra a la Caldera Cerro Galán y el otro que incluye a la Caldera Vicuña Pampa y Filo Colorado atraviesa al Lineamiento Tucumán en la región del Distrito Farallón Negro.

tes externos del Complejo Volcánico Vicuña Pampa. A partir del Plioceno, comienzan a erosionarse estas litologías, y durante el Pleistoceno, las porciones deprimidas de la comarca comienzan a recibir sedimentos pobremente consolidados aterrazados y no consolidados, con potencias variables, coluvioaluviales que convergen hacia porciones centrales donde dominan los materiales eólicos y de planicies aluviales.

Sobre el flanco occidental se reconocen anomalías de color de Los Bayitos y Campo Quinchamal (Figura 11), distinguibles en imágenes satelitales, constituidas por rocas eruptivas y piroclásticas ácidas a mesosilíceas de la Asociación Volcánica Inferior con variables características texturales y minera-

lógicas con alteraciones hipogénicas y supergénicas que pueden agruparse según modelos hidrotermales de tipo pórfido relacionadas con intrusivos subvolcánicos enmascarados por la alteración argílica [Rossello & Jones, 1999].

La Caldera Vicuña Pampa exhibe una estructuración que coincide con el patrón de esfuerzos y deformación general que determina el Lineamiento Tucumán, tal como pueden ser reconocidas en la comarca de Farallón Negro. Sin embargo, existen importantes diferencias de sus niveles de erosión, puesto que los depósitos del Distrito Minero Farallón Negro sufrieron un grado mucho más intenso que permiten aflorar sus raíces subvolcánicas. En cambio, la Caldera Vicuña Pampa presen-

ta una erosión incompleta y relativamente débil que aún conserva al cortejo de rocas efusivas cercanas e inmediatamente por encima de ellos.

Conclusiones

Sobre la zona de influencia del Lineamiento Tucumán se observan importantes cambios en la disposición regional submeridiana de los cordones montañosos que constituyen el frente Andino expresados claramente por la topografía y la disposición de las estructuras Neógenas (Figura 12). Además, se aprecia que el eje del magmatismo Vicuña Pampa-Filo Colorado se proyecta desde el arco principal intersectando al Lineamiento Tucumán en el Distrito Farallón Negro.

Rossello et al. [1996b] encontraron una compatibilidad muy fuerte entre la forma y disposición espacial de los afloramientos elípticos del Bajo La Alumbra y de sus diques con el campo de deformación Neógeno que determina el Lineamiento Tucumán. En un todo de acuerdo con este arreglo espacial, las estructuras que controlan la mayoría de las geometrías bidimensionales de los restantes depósitos minerales relacionados con manifestaciones subvolcánicas Neógenas, variablemente mineralizadas con Cu, Mo y Au de la región (Distrito Farallón Negro, Cerro Atajo, Capillitas, Agua Rica y Filo Colorado), también se relacionan con los mismos ejes principales del campo de esfuerzos actuante durante el Neógeno (Figura 13A). Incluso, la Caldera Vicuña Pampa se localiza sobre una misma megatrazada NNO de funcionamiento antitético, al igual que lo hacen las manifestaciones de tipo pórfido cuprífero del Distrito Minero de Farallón Negro (Bajos Agua Tapada-La Josefa, Las Pampitas, Alumbra, Espano, Jejenes, San Lucas y Las Juntas).

De esta manera, la totalidad de las estructuras que aparecen relacionadas con estos depósitos pueden considerarse dispuestas en la dirección preferencial de dilatación de acuerdo con direcciones antitéticas R' [Riedel, 1929] de un sistema transcurrente dextral expresado por el Lineamiento Tucumán. Así es posible reconocer rasgos extensivos locales vinculados con pandeos o

resaltos derechos [véanse detalles de nomenclaturas en Christie-Blick & Biddle, 1985; Rossello, 2000] que adquieren diferentes tamaños. Algunos cuerpos vetiformes (Capillitas, Farallón Negro-Alto de la Blenda), tienden a aumentar sus potencias cuando sus rumbos se tuercen para disponerse en posiciones que se aproximan a la de los esfuerzos principales máximos responsables de la deformación que expresa el Lineamiento Tucumán (Figura 13C).

Con respecto a las variaciones de edad que exhibe el magmatismo Andino, es posible reconocer una migración de hot spots desde el Mioceno hasta el Plio-Pleistoceno que progresa hacia el oriente. De este modo, la Caldera Vicuña Pampa, que ocupa una posición más occidental, tiene una edad significativamente mayor (19 a 14 Ma) con respecto al Complejo Farallón Negro (6 y 10 Ma), e incluso con Agua Rica (Figura 13B). Esta migración apoya en términos generales el hecho de que en Chile los pórfidos cupríferos sean más viejos que los que se localizan en el territorio argentino [Camus & Duhalde, 1982; Levi et al., 1988; Skewes & Stern, 1994; McKee et al., 1994; Jones et al., 1996].

Finalmente, puede concluirse que la conjunción del control estructural que ocurre entre el Lineamiento Tucumán y el eje magmático Vicuña Pampa-Filo Colorado determina el desarrollo de un metalotecto que alberga las mayores reservas económicas de metales cupríferos y preciosos actualmente reconocidos en el territorio argentino. El reconocimiento de ambos factores controlantes pueden contribuir muy favorablemente, a diferentes escalas, a la optimización de las actividades prospectivas, exploratorias y mineras de la comarca. En este sentido, se estima que puede aplicarse este modelo estructural a sectores cubiertos o poco conocidos que aún restan en la comarca estudiada.

Agradecimientos

Deseo expresar mi agradecimiento a todos aquellas personas e instituciones que contribuyeron a la realización del presente estudio a lo largo de más de 20 años. Especialmente, a los doctores Héctor H. García y

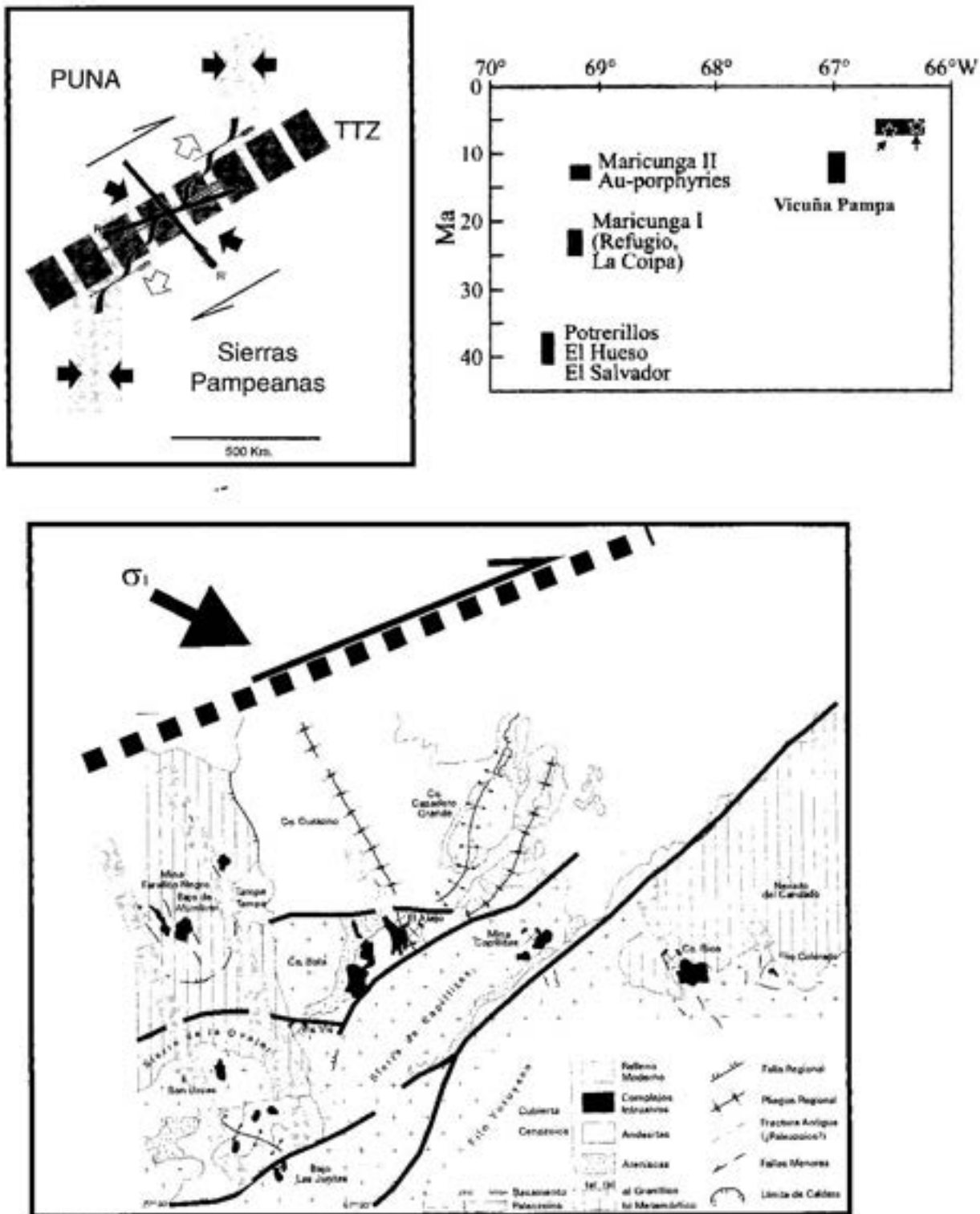


Fig. 13. Arriba) Izquierda: Esquema interpretativo (sin escalas) representando la deformación andina dentro del contexto cinemático del Lineamiento Tucumán (banda discontinua). La zona en gris representa el frente externo andino. Los ejes principales de la deformación fueron determinados por un análisis microtectónico de fallas (flechas negras: acortamiento y flechas blancas: estiramiento). Las estructuras transcurentes conjugadas principales reconocidas en el campo están marcadas por estructuras Riedel R y R' [Riedel, 1929]. Derecha: Cuadro de edades [adaptada de Sasso y Clark, 1999]. Abajo) Posición geográfica relativa de los principales depósitos hidrotermales de la comarca andina a la latitud del Lineamiento Tucumán.

Arturo J. Amos que, como mis primeros maestros y luego apreciados colegas y amigos, me introdujeron en la apasionante temática del control estructural de los yacimientos geoeconómicos. También deseo agradecer a los Dres. Peter R. Cobbold, Claude A. Le Corre, Armando C. Massabie, Denis Gapais, Marc Urrezieta, Isabelle Coutand, Luis F. Navarro García y al Lic. Jorge R. Morelli por las innumerables y jugosas discusiones mantenidas sobre el Lineamiento Tucumán y temas afines que han enriquecido y facilitado notablemente la percepción teórico-práctica del problema. Los Dres. Jorge Patricio Jones, Pablo Marcet y Ricardo Sureda aportaron motivaciones mineras a este estudio. El señor Cristóbal Bordarampé contribuyó con la edición final de las ilustraciones y del texto. Finalmente, deseo agradecer a la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales la honrosa distinción que me ha hecho al otorgarme el premio "Horacio J. Harrington" en Geología Estructural y la invitación de publicar la presente contribución, que expresa una síntesis de mi actividad en los controles estructurales del noroeste argentino.

Este trabajo contribuye al proyecto UBACyT 1998-2000: Proyecto UBA (TX 015).

Referencias

- Abels, A. & L. Bischoff, 1999. Clockwise block rotations in northern Chile: Indications for a large-scale domino mechanism during the middle-late Eocene. *Geology* 27 (9), 751-754.
- Alderete, M.C., 1999a. Distrito Farallón Negro-Alto de la Blenda, Catamarca. En: Recursos Minerales de la República Argentina (Ed. E.O. Zappettini). Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR (Buenos Aires), *Anales* 35, 1637-1642.
- Alderete, M.C., 1999b. Bajo de Agua Tapada, Catamarca. En: Recursos Minerales de la República Argentina (Ed. E.O. Zappettini). Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR (Buenos Aires), *Anales* 35, 1475-1478.
- Alderete, M.C., 1999c. Prospecto minero Las Pampitas, Catamarca. En: Recursos Minerales de la República Argentina (Ed. E.O. Zappettini). Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR (Buenos Aires), *Anales* 35, 1467-1470.
- Alderete, M.C., P. Bortolotti, R. Moyano, J. Ojeda & A. Antonio-Gutiérrez, 1987. Estructuras y mineralización-sector sur Sierras de Aconquija. 10º Congreso Geológico Argentino (Tucumán), *Actas* 1, 381-385.
- Allmendinger, R.W., 1986. Tectonic development, southeastern border of the Puna Plateau, northwestern Argentina Andes. *Geological Society of America. Bulletin* 97: 1070-1082.
- Allmendinger, R.W., M. Strecker, J.E. Eremchuk & P. Francis, 1989. Neotectonic deformation of the southern Puna plateau, NW Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 2, 111-130.
- Allmendinger, R.W., T. Gubbels, B. Isacks & T. Cladouhos, 1993. Lateral variations in late Cenozoic deformation, Central Andes, 20-28°S (extended abstract), Second International Symposium of Andean Geodynamics, *Colloques et Séminaires, ORSTOM (Paris)*, 155-158.
- Allmendinger, R.W., Jordan, T.E. Kay, S.M. & Isacks, B.L., 1997. The evolution of the Altiplano-Puna Plateau of the Central Andes. *Annual Reviews Earth Planet. Sci.* 25, 139-174.
- Assumpção, M. & M. Araujo, 1993. Effect of the Altiplano-Puna plateau, South America, on the regional intraplate stresses. *Tectonophysics* 221: 475-496.
- Aubry, L., Roperch, P., Urrezieta, M. de, Rossello, E.A. y Chauvin, A., 1995. Tectonic evolution of the Eastern Andes of North-West Argentina: paleomagnetic constraints. *Journal of Geophysical Research*. En prensa.
- Angelelli, V., 1984. Yacimientos metalíferos de la República Argentina. *Comisión de Investigaciones Científicas Provincia de Buenos Aires (La Plata)*, 2 tomos, 704p.
- Bassi, H.L., 1987. Evaluación geológico-minera del yacimiento aurocuprífero con Pb-Zn del Bajo del Durazno, Catamarca, Argentina. 10º Congreso Geológico Argentino (Tucumán), *Actas* 1, 43-46.
- Bassi, H.L. & G. Rochefort, 1980. Estudio geológico del yacimiento cuproaurífero de la Alumbraera, Provincia. de Catamarca. *Anales XVIII. Servicio Minería Secretaría Estado de Minería (Buenos Aires)*, 150p.
- Boudesseul, N., Bremond d'Ars, J. de, Cobbold, P.R., Gapais, D. & Hallot, E., 1999. Relationships between Cenozoic volcanism and tectonics in Central Andes. EUG X, Strasbourg.
- Caelles, J.C., A.H. Clark, E. Farrar, S.L. McBride & S. Quirt, 1971. Potassium-argon ages of porphyry copper deposits and associated

- rocks in the Farallón Negro, Capillitas District, Catamarca, Argentina. *Economic Geology* 66 (6), 961-964.
- Cahill, T. & B.L. Isacks, 1992. Seismicity and shape of the subducted Nazca Plate. *Journal of Geophysical Research* 97, 17503-17529.
- Camus, F. & Duhalde, M.A., 1982. Geología de los yacimientos hidrotermales de oro en Chile. *Revista Geológica de Chile* 17, 47-70.
- Chipulina, M.A. & R.A. González, 1983. Síntesis de la investigación geofísico minera en el Noroeste Argentino. 2° Congreso Nacional de Geología Económica (San Juan, Argentina), *Actas* 2, 425-442.
- Christie-Blick, N. & K.T. Biddle, 1985. Deformation and basin formation along strike-slip faults. In Biddle, K.T. & N. Christie-Blick (eds): Strike-slip deformation, Basin formation and sedimentation. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (Tulsa), *Special Publication* 37, 1-34.
- Cladouhos, T.T. R.W. Allmendinger, B. Coira & E. Farrar, 1994. Late Cenozoic deformation in the Central Andes: Fault kinematics from the northern Puna, northwest Argentina and southwest Bolivia. *Journal of South American Earth Sciences* 7, 209-228.
- Cobbold, P.R., P. Davy, D. Gapais, E.A. Rossello, E. Sadybakasov, J.C. Thomas, J.J. Tondji-Biyo & M. de Urreiztieta, 1993. Sedimentary basins and crustal thickening. In: S. Cloetingh, W. Sassi, F. Horvath & C. Puigdefabregas (Eds.), Basin Analysis and Dynamics of Sedimentary Basin Evolution. *Sedimentary Geology* (Amsterdam, Países Bajos) 86, 77-89.
- Cobbold, P.R., P. Szatmari, C. Lima & E.A. Rossello, 1996. Cenozoic deformation across South America: continent-wide data and analogue models. III International Symposium on Andean Geodynamics, *ORSTOM-Géosciences Rennes* (Saint Maló, Francia), 21-24.
- Cobbold, P.R., M. Diraison & E.A. Rossello, 1999. Bitumen veins and Eocene transpression, Neuquén Basin, Argentina. *Tectonophysics* (Amsterdam, Países Bajos), 314 (4), 423-442.
- Cobbold, P.R., Rossello, E.A. & Lima, C., 2000. Physical models of plate tectonics and intracontinental deformation, applied to South America. XXXI° International Geological Congress (Rio de Janeiro, Brasil).
- Coutand, I., P.R. Cobbold, A. Chauvin, E.A. Rossello & O.R. López-Gamundí, 1999. Cenozoic deformation and tectonic style of the Puna Plateau (Northwestern Argentina, Central Andes). IV° International Symposium on Andean Geodynamics (Göttingen, Alemania), 192-196.
- Coutand, I., P.R. Cobbold, M. de Urreiztieta, P. Gautier, A. Chauvin, D. Gapais, E.A. Rossello & O.R. López-Gamundí, 2001. Style and history of Andean deformation, Puna plateau, Northwestern Argentina. *Tectonics* (Londres, Reino Unido), 20 (2), 210-234.
- Dewey, J.F. & Lamb, S.H., 1992. Active tectonics of the Andes. *Tectonophysics* 205, 79-85.
- García, H.H., 1970a. Control estructural de las vetas de Alto de LA Blenda, Departamento Belén. *Opera Lilloana* 19, 1-87.
- García, H.H., 1970b. Geología del yacimiento tipo pórfido cuprífero: Bajo Las Pampitas, departamento Belén, provincia de Catamarca, República Argentina. Asociación Geológica Argentina, *Revista* 25, 319-328.
- García, H.H. & E.A. Rossello, 1984. Geología y yacimientos minerales de Papachacra, Departamento Belén, Catamarca, Argentina. IX° Congreso Geológico Argentino (Bariloche), *Actas* 7, 245-259.
- González Bonorino, F., 1950. Geología y petrografía de las hojas 12d (Capillitas) y 13d (Andalgalá), Catamarca. Dirección General de Industria Minera, *Bol.* 70, 1-100.
- González-Farrar, O., Baker, P.E. & Rex, D.C., 1985. Tectonic-volcanic discontinuity at Latitude 27° South Andean range, associated with Nazca plate subduction. *Tectonophysics* 112, 423-441.
- Grier, M.E., J.A. Salfity & R.W. Allmendinger, 1991. Andean reactivation of the Cretaceous Salta rift, northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 4, 351-372.
- Guilbert, J.M. & C.F. Park, Jr., 1986. *The geology of ore deposits*. Freeman & Co. (New York), 985p.
- Guillou, J., 1999. El pórfido Cuprífero Filo Colorado, Catamarca. En: Recursos Minerales de la República Argentina (Ed. E.O. Zappettini). Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR (Buenos Aires), *Anales* 35, 1493-1494..
- Gripp, A.E. & R.G. Gordon, 1990. Current plate velocities relative to the hotspots incorporating the NUVEL-1 global plate motion model. *Geophysical Research Letters* 17(8): 1109-1112.
- Jones, J.P., 1996. The Farallón Negro-Bajo de la Alumbraera volcano-plutonic cluster. 13° Congreso Geológico Argentino-3° Congreso de Hidrocarburos (Buenos Aires), *Actas* 3, 17-27.
- Jones, J.P., Martínez, R.D. & Rossello, E.A., 1996.

- La faja volcánica terciaria del Valle del Cura (San Juan, Argentina): sus alcances y potencial para localizar World Class Deposits. 13° Congreso Geológico Argentino-3° Congreso de Hidrocarburos (Buenos Aires), *Actas* 3, 55-71.
- Jordan, T.E., B.L. Isacks, V.A. Ramos & R.W. Allmendinger, 1983. Mountain building in the Central Andes. *Episodes*: 20-26.
- Le Corre, C.A. & E.A. Rossello, 1994. Kinematics of Early Paleozoic ductile deformation in the basement of NW Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 7 (3/4), 301-308.
- Levi, B., Nyström, J.O., Thiele, R. & Aberg, G., 1988. Geochemical trends in Mesozoic-Tertiary volcanic rocks from the Andes in central Chile, and tectonic implications. *Journal of South American Earth Sciences* 1 (1), 167-177.
- Llambías, E.J., 1970. Geología de los yacimientos mineros Agua de Dionisio (Provincia de Catamarca, República Argentina). Asociación Argentina de Mineralogía, Petrología y Sedimentología, *Revista* I (1), 2-32.
- Llambías, E.J., 1972. Estructura del grupo volcánico Farallón Negro, Catamarca, República Argentina. Asociación Geológica Argentina, *Revista* 27 (2), 161-169.
- Mahlburg Kay, S., Maksaev, V., Moscoso, R., Mpodozis, C., Nasi, C. & Gordillo, C.E., 1988. Tertiary Andean magmatism in Chile and Argentina between 28° S and 33° S: correlation of magmatic chemistry with a changing Benioff zone. *Journal of South American Earth Sciences* 1 (1), 21-38.
- Marquez-Zavalía, M.F., 1999. El yacimiento Capillitas, Catamarca. En: Recursos Minerales de la República Argentina (Ed. E.O. Zappettini). Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR (Buenos Aires), *Anales* 35, 1643-1652.
- Marrett, R.A., R.W. Allmendinger, R.N. Alonso, & R.E. Drake, 1994. Late Cenozoic tectonic evolution of the Puna Plateau and adjacent foreland, northwestern Argentine Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 7 (2): 179-207.
- McKee, E.H., Robinson, A.C., Rybuta, J.J., Cuitiño, L. & Moscoso, R.D., 1994. Age and Sr isotopic composition of volcanic rocks in the Maricunga Belt, Chile: implications for magma sources. *Journal of South American Earth Sciences* 7 (2), 167-177.
- Mon, R., 1976. La tectónica del borde oriental de Los Andes en las Provincias de Salta, Tucumán y Catamarca, República Argentina. Asociación Geológica Argentina, *Revista* 31 (1), 65-72.
- Pardo-Casas, F. & P. Molnar, 1987. Relative motion of the Nazca (Farallón) and South American Plates since Late Cretaceous time. *Tectonics* 6: 233-248.
- Peralta, E., 1999. Distrito aurífero de Cero Atajo, Catamarca. En: Recursos Minerales de la República Argentina (Ed.: Zappettini, E.O.). Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR (Buenos Aires), *Anales* 35, 1653-1657.
- Ramsay, J.G. & M.I. Huber, 1983. *The Techniques of Modern Structural Geology*. Volume 1: Strain analysis. Academic Press (Londres), 307p.
- Riedel, W., 1929. Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen. *Zentralbl. Mineral. Geol. Paläontol.*, Abh.B, 354-368.
- Roco, R. & M. Koukharsky, 1999. El pórfiro cupromolibdenífero Agua Rica y las manifestaciones epitermales asociadas, Catamarca. En: Recursos Minerales de la República Argentina (Ed. E.O. Zappettini). Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR (Buenos Aires), *Anales* 35, 1479-1492.
- Rojas, N., J. Perelló, P. Harman, J. Cabello, C. Devaux, L. Fava & E. Etchart, 1999. Situación minera, geología y ampliación de reservas en Agua Rica, un depósito de cobre, molibdeno y oro, provincia de Catamarca, Argentina. In G. González Bonorino, R. Omarini & J. Viramonte. Geología del Noroeste Argentino. XIV° Congreso Geológico Argentino (Salta). *Relatorio*, 14-25.
- Rossello, E.A., 1980. Nuevo Complejo Volcánico Vicuña Pampa, Departamento Belén, provincia de Catamarca. Asociación Geológica Argentina, *Revista* 35 (3), 436-438.
- Rossello, E.A., 1983. Geología del Complejo Volcánico Vicuña Pampa. Dpto. Belén, Provincia de Catamarca. Universidad de Buenos Aires. *Tesis Doctoral* N° 1806, 195 p.
- Rossello, E.A., 1984. Posibilidades económicas de la comarca del Complejo Volcánico Vicuña Pampa, en función de su localización geotectónica regional. Primeras Jornadas de Geología de Catamarca (Universidad Nacional de Catamarca), *Actas* 1, 1-9.
- Rossello, E.A., 1990. Metalogénesis de la comarca de Vicuña Pampa (Departamento Belén), Catamarca, Argentina. *Tras. Jornadas Regionales de Ciencia y Técnica* (NOA), Recursos Mineros. Universidad Nacional de Catamarca.
- Rossello, E.A., 2000. Sistemas tectónicos transcurrentes. X° Reunión de Microtectónica (Bue-

- nos Aires, Noviembre 2000). Asociación Geológica Argentina, *Publicación Especial* (Buenos Aires, Argentina). En evaluación.
- Rossello, E.A., 2001. La caldera Vicuña Pampa (27° 00' S - 67° 00' O, Catamarca, Argentina): implicancias geotectónicas y económicas. *Asociación Geológica Argentina, Revista* (Buenos Aires). En revisión.
- Rossello, E.A., Mozetic, M.E., Cobbold, P.R. y Urreiztieta, M. de, 1995. El límite entre Precordillera y Sierras Pampeanas (Andes centrales de Argentina): consecuencias tectónicas y topográficas regionales. Nove-no Congreso Latinoamericano de Geología (Caracas). *Actas microregistradas*.
- Rossello, E.A., M.E. Mozetic, P.R. Cobbold, M. de Urreiztieta & D. Gapais, 1996a. El espolón Umango-Maz y la conjugación sintaxial de los lineamientos Tucumán y Valle Fértil (La Rioja, Argentina). 13° Congreso Geológico Argentino - 3° Congreso de Hidrocarburos (Buenos Aires, Argentina), *Actas* 2, 187-194.
- Rossello, E.A., Urreiztieta, M. de, Gapais, D., Le Corre, C. & Cobbold, P.R., 1996b. La elipticidad del Bajo La Alumbra y la Caldera del Cerro Galán Catamarca, Argentina): ¿Reflejo de la deformación Andina?. *Asociación Geológica Argentina, Revista* 51 (3), 3-10.
- Rossello, E.A., Mozetic, M.E. & López de Luchi, M.G., 1999. El Basalto La Puerta de San José (Belén, Catamarca): Un nuevo testimonio del rifting Cretácico en el Noroeste Argentino. IVX° Congreso Geológico Argentino (Salta, Argentina), *Actas* 2, 194-196.
- Rossello, E.A. & M.E. Mozetic, 1999a. Tectonic recurrence of the Desaguadero-Valle Fértil Lineament from new K/Ar ages on volcanics at the Cerro Rajado anticline (San Juan and La Rioja Provinces, Argentina). *II South American Symposium on Isotope Geology* (Villa Carlos Paz, Argentina), 354-356.
- Rossello, E.A. & M.E., Mozetic, 1999b. Caracterización estructural y significado geotectónico de los depocentros Cretácicos continentales del Centro-Oeste Argentino. 5° Simposio sobre el Cretácico de Brasil - 1° Simposio sobre el Cretácico de América del Sur (Serra Negra, Brasil), *Actas*, 107-113.
- Rossello, E.A. & J.P. Jones, 1999. Potencial geomínero de la Caldera Vicuña Pampa (27°00 S-67°00 W), Catamarca. XIV° Congreso Geológico Argentino (Salta, Argentina), *Actas* 2, 294-297.
- Rossello, E.A., López de Luchi, M.G. & Osters, H., 2000. La Formación Papachacra (Belén, Catamarca, Argentina): Edades K/Ar y significados tectónicos y metalogénicos. IX° Congreso Geológico Chileno (Puerto Varas, Chile), Sesión Temática N° 2, *Actas* I, 360-364.
- Sasso, A.M. & Clark, A.H., 1998. The Farallón Negro Group, Northwest Argentina: magmatic, hydrothermal and tectonic evolution and implications for Cu-Au metallogeny in the Andean back-arc. *SEG Newsletter* 34, 1-18.
- Sasso, A.M. & Clark, A.H., 1999. El Grupo Farallón Negro: evolución magmática, hidrotermal y tectónica e implicancias para la metalogenia de cobre-oro en el retroarco Andino, Catamarca. En: Recursos Minerales de la República Argentina (Ed. E.O. Zappettini). Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR (Buenos Aires), *Anales* 35, 1437-1450.
- Sillitoe, R.W., 1988. Epochs of intrusion-related copper mineralization in the Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 1 (1), 89-108.
- Skewes, M.A. & Stern, C.R., 1994. Tectonic trigger for the formation of late Miocene Cu-rich breccia pipes in the Andes of central Chile. *Geology* 22, 551-554.
- Urreiztieta, M. de, E.A. Rossello, D. Gapais, C. Le Corre & P.R. Cobbold, 1993. Neogene dextral transpression at the southern edge of the Altiplano-Puna (NW Argentina). *II International Symposium on Andean Geodynamics*, ORSTOM-Oxford University (Oxford, Reino Unido). 267-269.
- Urreiztieta, M. de, Gapais, D., Le Corre, C., Cobbold, P.R. & Rossello, E.A., 1996. Cenozoic dextral transpression and basin development at the southern edge of the Altiplano-Puna, northwestern Argentina. *Tectonophysics* 254, 17-39.
- Urreiztieta, M. de, O. Bourgeois, D. Gapais, P.R. Cobbold, C. Le Corre, E.A. Rossello & D. Rouby, 1999. Restoration in map view of the Pampean ranges province, southern edge of the Puna plateau, Argentina. *III International Symposium on Andean Geodynamics*, ORSTOM-Géosciences Rennes (Saint Maló, Francia), 517-520.

Manuscrito recibido y aceptado en julio de 2001.

ESTUDIO ANALÍTICO DE CUENCAS DINÁMICAS DE HOPF EN FLUJOS BIFÁSICOS EN CANALES

Darío F. Delmastro y Luis E. Juanicó

Centro Atómico Bariloche e Instituto Balseiro.

Resumen

Se presenta un modelo algebraico bidimensional en demoras de la dinámica de canales de dos fases en ebullición tanto horizontales como verticales. Su simplicidad permite un tratamiento completamente analítico del problema, tanto lineal como no lineal, preservando una descripción realista de los principales mecanismos involucrados. Utilizando métodos perturbativos se identificaron cuencas de estabilidad asociadas a bifurcaciones de Hopf de ambos tipos, subcríticas y supercríticas, estableciéndose un criterio analítico para la transcripción de uno a otro tipo. El análisis lineal permitió observar un efecto inestabilizante del término gravitatorio sobre las oscilaciones de ondas de densidad. Además, incrementando la preponderancia del término gravitatorio, se extiende el carácter subcrítico de esta bifurcación hacia subenfriamientos más altos. En suma, la gravedad tiene un efecto inestabilizante sobre la dinámica de canales en ebullición frente al fenómeno de ondas de densidad. Se reducen los márgenes de estabilidad lineal y además se acentúa el carácter no conservativo del análisis lineal de estabilidad.

Palabras clave: Dinámica no lineal, flujo de dos fases, bifurcación de Hopf.

Abstract

A bidimensional algebraic delay model is presented in order to study the two-phase boiling channels dynamic, either horizontal or vertical ones. Its simplicity allows a fully analytical treatment of the system dynamic, both linear and nonlinear, while preserving a realistic description of the main mechanisms involved. Both kinds of Hopf bifurcation's, subcritical and supercritical were identified and treated using perturbation methods. A fully analytical criterion for Hopf bifurcation transcription was determined. The linear stability boundaries were analytically obtained. An unstabilizing effect of the gravity term over density-wave oscillations was found. It was found that increasing the gravity term, the subcritical character of the bifurcation is extended towards higher subcoolings. So, gravity produces an unstabilizing effect over the boiling channel dynamic, considering the density-wave phenomenon. It reduces the lineal stability margin and the linear analysis approach becomes less conservative.

Key words: Nonlinear dynamic, two phase flow, Hopf's bifurcation.

Trabajo presentado con motivo de la entrega del premio "Ernesto E. Galloni", -instituido por la familia Galloni- en Ingeniería Nuclear, al Dr. Darío F. Delmastro, el 12 de noviembre de 1999.

Introducción

El fenómeno de inestabilidades dinámicas en canales en ebullición, conocidas como ondas de densidad, ha sido extensamente estudiado durante los últimos 30 años (Lahey and Drew, 1980; Rizwan Uddin, 1994). Éstas pueden presentarse bajo ciertas condiciones de operación en los sistemas en ebullición, para las cuales éstos se vuelven inestables debido a retardos producidos sobre los mecanismos de realimentación en las caídas de presión. Perturbaciones iniciadas en la entrada del canal viajan con el fluido, causando demoras en el transporte de los cambios en las variables de estado locales. Bajo ciertas condiciones de operación dadas, estas demoras pueden originar realimentaciones autosostenidas (Lahey and Moody, 1977).

El fenómeno de inestabilidad de ondas de densidad en sistemas bifásicos en ebullición, además de ser interesante desde el punto de vista científico, tiene serias implicaciones prácticas para muchas industrias. Intercambiadores de calor con cambio de fase, varios equipos de procesos químicos, reactores nucleares de agua en ebullición (BWRs), y generadores de vapor, en forma abreviada, son candidatos potenciales a experimentar este tipo de inestabilidad. Sin embargo, ha sido relativamente escaso el trabajo de investigación enfocado sobre la influencia de la gravedad en la estabilidad de flujos bifásicos en ebullición. No obstante, éste podría ser de interés para los nuevos diseños de reactores bajo circulación natural (Durnan, 1988; Kataoka et al., 1988).

Los métodos utilizados para predecir las inestabilidades pueden clasificarse en dos categorías: lineales y no lineales. La herramienta clásica utilizada ha sido el análisis lineal en el dominio frecuencial, orientada a la determinación de los límites de estabilidad para perturbaciones infinitesimales. Esta herramienta no permite en cambio predecir la respuesta del sistema ni las características de los comportamientos oscilatorios.

Para estudiar el comportamiento del sistema ante perturbaciones finitas es ne-

cesario considerar efectos esencialmente no lineales relacionados con las realimentaciones en las caídas de presión en el sistema. En un entorno del umbral de estabilidad lineal, la dinámica del sistema puede caracterizarse por una bifurcación normal de Hopf (Achard et al., 1985). Se han utilizado técnicas especiales de bifurcaciones de Hopf para estudiar analítica y numéricamente su amplitud, frecuencia y carácter (subcrítico o supercrítico) en canales horizontales (Clausse et al., 1996; Delmastro et al., 1998a) o sólo numéricamente en canales verticales (Delmastro y Juanicó, 1998b).

El estudio de los flujos en ebullición nos presentan ejemplos muy interesantes de fenómenos inherentemente no lineales. Consideremos por ejemplo los puntos de equilibrio (puntos fijos) de un canal en ebullición uniformemente calefaccionado sujeto a un salto de presión externo constante. Estos suelen poseer nodos inestables o puntos de retorno (*saddle-node bifurcation point*) (Dorning, 1989). Es por este motivo que los diagramas de bifurcación de las variables en función de un parámetro presentan forma de S o efectos de histéresis, como se puede observar en la Fig. 1, correspondiendo la rama intermedia inestable a la inestabilidad de Ledinegg.

En muchos casos el punto fijo de la rama inferior (ver Fig. 1) pierde su estabilidad a través de una bifurcación de Hopf supercrítica (Dorning, 1989) conduciendo a las conocidas ondas de densidad, proyectando un ciclo límite en el espacio de las fases. De este modo este punto fijo se convierte en un foco inestable que da origen a un atractor periódico en este sistema disipativo dinámico. Es posible también que el punto fijo anterior pierda su estabilidad a través de una bifurcación subcrítica, teniendo entonces las oscilaciones características divergentes y siendo de esperar que otras no linealidades entren posteriormente en juego.

En este trabajo se presenta un modelo algebraico bidimensional en demoras de la dinámica de canales de dos fases en ebullición tanto horizontales como verticales. Su simplicidad permite un tratamiento

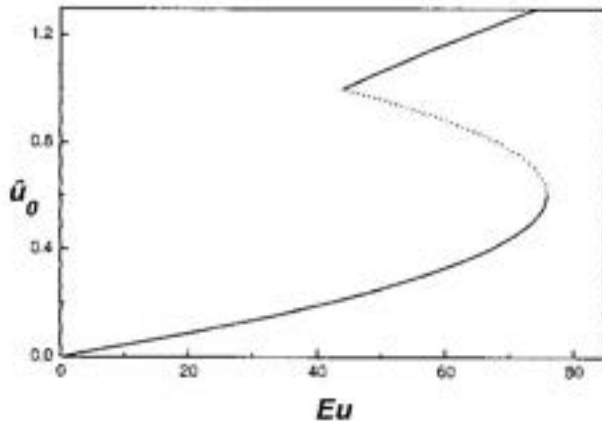


Fig. 1.- Diagrama de bifurcación de un canal en ebullición.

completamente analítico del problema, tanto lineal como no lineal, preservando una descripción realista de los principales mecanismos involucrados. Utilizando métodos perturbativos se identificaron cuencas de estabilidad asociadas a bifurcaciones de Hopf de ambos tipos, subcríticas y supercríticas, estableciéndose un criterio analítico para la transcripción de uno a otro tipo. Se observa un efecto inestabilizante del término gravitatorio sobre los márgenes de estabilidad ante ondas de densidad y además se extiende el carácter subcrítico de esta bifurcación hacia subenfriamientos más altos.

Modelo de canal en ebullición

Consideremos el canal en ebullición esquematizado en la Fig. 2. En él, el líquido ingresa subenfriado a temperatura constante y es calefaccionado uniformemente a lo largo del canal. En una cierta posición el fluido alcanza su temperatura de saturación y comienza a hervir, saliendo del canal como una mezcla bifásica.

Se asumieron las siguientes hipótesis en el modelado del flujo bifásico (Delmastro et al. 1998):

- El flujo es homogéneo (ambas fases tienen igual velocidad, es decir, sin deslizamiento).

- La presión del sistema es constante.

- El flujo de calor es constante en espacio y tiempo.

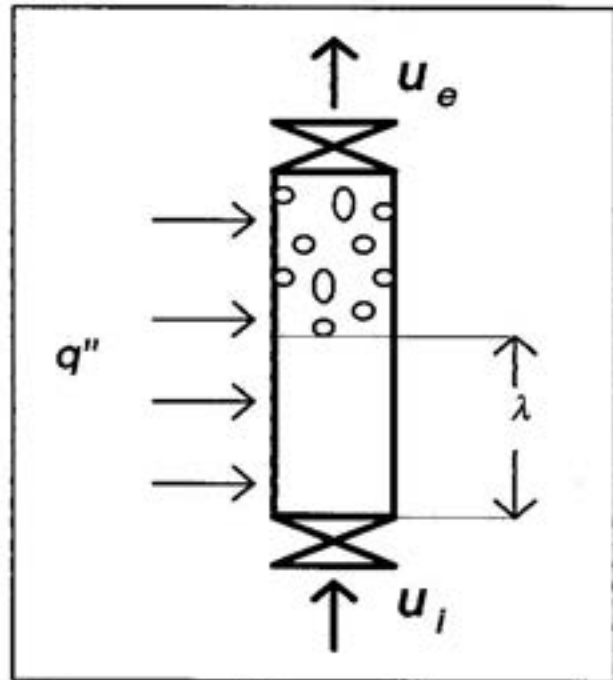


Fig. 2.- Canal en ebullición.

- Ambas fases son incompresibles.
- Las fases se encuentran en equilibrio termodinámico.
- Los términos de disipación viscosa y de generación interna de calor son despreciables en la ecuación de energía.
- La fricción se considera solamente concentrada sobre la entrada y la salida del canal.

Sobre estas hipótesis, las ecuaciones unidimensionales de conservación de masa y energía se pueden escribir como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = 0 \quad (1a)$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho h u)}{\partial z} = q \quad (1b)$$

La entalpía y la densidad se pueden relacionar por la siguiente ecuación de estado:

$$\rho = \rho_f, \quad \text{si } h \leq h_f \quad (2a)$$

$$\rho = \left[v_f + \frac{(h - h_f)}{h_g} v_g \right]^{-1} \quad \text{si } h > h_f. \quad (2b)$$

Combinando las ecuaciones (1b) y (2b) obtenemos para la región de dos fases:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = q \frac{v_{fg}}{h_{fg}} \equiv \Omega \quad (3a)$$

Similarmente, para la región de una fase:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (3b)$$

Integrando las ecuaciones (3) a lo largo del canal:

$$u_e = u_i + \Omega (L_{ch} - \lambda) \quad (4)$$

siendo la longitud de líquido subenfriado

$$\lambda(t) = \int_{t-v}^t u_i(t') dt' \quad (5)$$

En ésta, v es el tiempo necesario para que una partícula ingresante al canal alcance su temperatura de saturación:

$$v = \frac{\Delta h_{sub} \rho_f}{q} \quad (6)$$

Para bajas frecuencias podemos aproximar (Juanicó, 1998; Clause et al., 2000):

$$\lambda(t) \equiv v u_i(t-v/2) \quad (7)$$

Asumiendo un balance cuasiestático de fuerzas en la ecuación de momento, el salto de presión impuesto externamente al canal se balancea con las fuerzas de fricción, gravedad y aceleración, esto es

$$(k_i - 1)\rho_f u_i^2 + (k_e + 1)\rho_e u_e^2 + \frac{M_{ch} g}{A_{cr}} = \Delta p \quad (8)$$

Si siguiendo la aproximación cuasiestática, podemos asumir que el flujo saliente sigue la historia del flujo ingresante al canal (Clause et al., 1995) siendo:

$$\rho_e(t) u_e(t) = \rho_f u_i(t - \tau) \quad (9)$$

donde τ es una dada demora de transporte. Esta demora puede ser razonablemente reemplazada por v si el tiempo de residencia

en la región de dos fases es pequeño, (i.e. altos subenfriamientos de entrada).

En este caso, la densidad promedio en la región bifásica está próxima a su valor de salida, ρ_e , y la masa dentro del canal puede aproximarse como (Delmastro y Juanicó, 1998):

$$M_{ch} = A_{cr} \rho_f [\lambda + u_i(t-v)/\Omega] \quad (10)$$

Las ecuaciones (4), (7), (8), (9) y (10) pueden ser combinadas en una única ecuación en demoras que relaciona los valores de la velocidad a la entrada, u_i , en tres instantes diferentes: t , $t-v/2$ and $t-v$.

Escribiendo este mapeo bidimensional en forma adimensional, usando los valores de referencia: $L_r = L_{ch}$, $u_r = L_r/v$ y $\rho_r = \rho_f$ obtenemos la siguiente expresión:

$$k \hat{u}_i^2(t) + \hat{u}_i(t-v) \left[\hat{u}_i(t) + N_{sub} (1 - \hat{u}_i(t-v/2)) \right] + N_g \left[\hat{u}_i(t-v/2) + \frac{\hat{u}_i(t-v)}{N_{sub}} \right] = \frac{Eu}{k_e + 1} \quad (11)$$

Análisis de estabilidad lineal

Los puntos fijos del mapeo bidimensional dado por la ecuación (11) se pueden obtener sustituyendo $\hat{u}_n = \hat{u}_{n-1} = \hat{u}_{n-2} = \hat{u}_0$. El parámetro \hat{u}_0 representa la fracción subenfriada del canal, esto es:

$$\hat{u}_0 = \frac{\lambda_0}{L_{ch}} = \frac{N_{sub}}{N_{pch}}$$

Linearizando la ecuación (11) alrededor de un punto fijo, obtenemos la siguiente ecuación característica:

$$\left[(2k + 1)\hat{u}_0 \right] x^2 + (Ng - N_{sub} \hat{u}_0) x + \left[\hat{u}_0 + N_{sub} (1 - \hat{u}_0) + \frac{Ng}{N_{sub}} \right] = 0 \quad (12)$$

donde $x = e^{\alpha \tau}$.

El sistema se encuentra marginalmente estable en \hat{u}_0 si x es un punto sobre el círculo unitario en el plano complejo. Dependiendo del carácter de x (i.e., real o complejo) el sistema pierde su estabilidad oscilatoriamente (autovalores complejos) o excursivamente (autovalores reales).

Inestabilidad de Ondas de Densidad. Para autovalores complejos el margen de inestabilidad se establece en:

$$\hat{u}_0^{ds} = \frac{N_{sub} + Ng/N_{sub}}{N_{sub} + 2k} \quad (13)$$

Esta inestabilidad presenta un carácter oscilatorio, que se manifiesta en ondas de densidad viajando a lo largo del canal, dando su nombre al fenómeno.

Inestabilidad excursiva o de Ledinegg. Para autovalores reales se presenta un punto de ensilladura cuando el mayor autovalor x es mayor que 1. En este caso, el sistema alcanza la inestabilidad excursiva o de Ledinegg (Lahey and Moody, 1977). Esta última condición implica que

$$\hat{u}_0^{led} = \frac{N_{sub} + Ng + \frac{Ng}{N_{sub}}}{2(N_{sub} - k - 1)} \quad (14)$$

el punto donde las ecuaciones (13) y (14) se interceptan corresponde a la transición de autovalores inestables complejos a reales:

$$\hat{u}_0^{ds-led} = \frac{2\left(N_{sub} + \frac{Ng}{N_{sub}}\right) + Ng}{3N_{sub} - 2} \quad (15)$$

Mapas de Estabilidad Lineal. Los criterios de estabilidad, dados por las ecuaciones (13) y (14) se ilustran en el plano biparamétrico (N_{sub}, N_{pch}) de la Fig. 3. Se considera tanto el caso de un canal horizontal ($Ng=0$) como uno vertical con un término gravitatorio apreciable ($Ng=10$). Nótese de ellas que el término gravitatorio causa un efecto inestabilizante sobre las inestabilidades de ondas de densidad y un efecto estabilizante sobre las inestabilidades de Ledinegg.

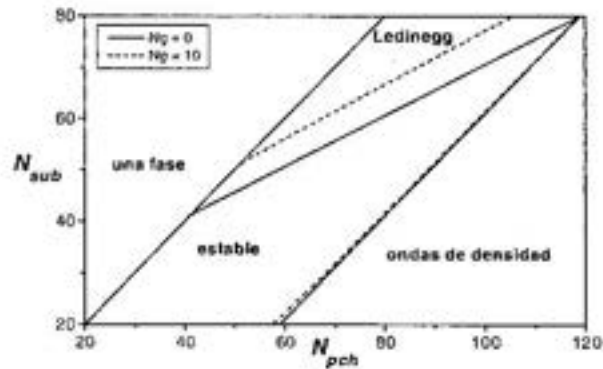


Fig. 3.- Mapa de estabilidad lineal.

Comparando los mapas de estabilidad lineal de este modelo algebraico con el completamente diferencial (Delmastro *et al.*, 1991 y 1998a), encontramos buen acuerdo para un amplio rango de números de subenfriamiento y gravitatorio.

Frecuencia Lineal. Consideremos que el sistema se encuentra bajo condiciones marginalmente inestables (autovalores complejos). La frecuencia angular, $\hat{\omega}$, puede entonces evaluarse a partir de los valores de los autovalores, x . Siendo $x = \exp(\alpha v / 2)$, entonces

$$\hat{\omega} = \omega v = 2 \arccos (Re) \quad (16)$$

donde Re es la parte real de los autovalores complejos calculada sobre el límite lineal. Es decir:

$$\hat{\omega} = 2 \arccos \left[\frac{N_{sub} - \frac{Ng(2k + N_{sub})}{N_{sub} + \frac{Ng}{N_{sub}}}}{2(2k + 1)} \right] \quad (17)$$

La frecuencia angular adimensional, dada por la ecuación (17) se grafica en la Fig. 4. Se observa allí que la gravedad incrementa los valores de la frecuencia para un dado subenfriamiento. Esta tendencia también fue observada experimentalmente (Juanicó, 1998).

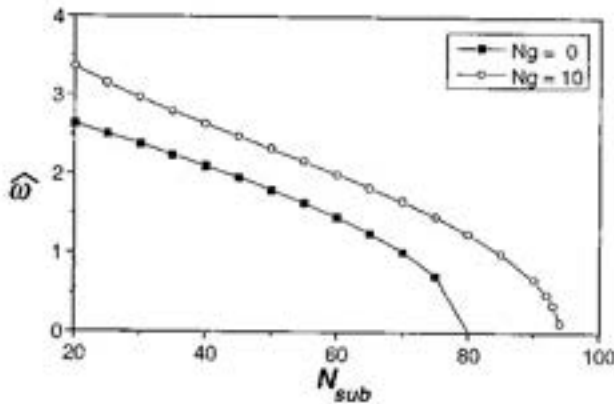


Fig. 4.- Frecuencia lineal angular adimensional ($k = 19.5$).

Bifurcación de Hopf

Consideremos que el sistema se encuentra en condiciones marginalmente estables (autovalores complejos), en cuyo caso el valor de k , k_0 , viene determinado de (13), como:

$$k_0 = \frac{N_{sub}(1 - \hat{u}_0)}{2\hat{u}_0} + \frac{Ng/N_{sub}}{2\hat{u}_0} \quad (18)$$

Cuando k es menor que k_0 , la solución estacionaria pierde estabilidad. El teorema de la bifurcación de Hopf establece que encontraremos una solución periódica que se bifurca desde \hat{u}_0 si

$$\alpha|_{\mu=0} = -\bar{\alpha}|_{\mu=0} \neq 0,$$

$$\text{Re} \left[\frac{d\alpha}{d\mu} \Big|_{\mu=0} \right] \neq 0,$$

donde α viene de resolver la (12), es decir:

$$\alpha = -\frac{1}{\tau} \log x \text{ y } \mu = k - k_0. \quad (19)$$

Reemplazando x obtenido de resolver la ecuación (12) en (19), obtenemos

$$\alpha|_{\mu=0} = -\bar{\alpha}|_{\mu=0} = \frac{j \arctan \left(\frac{Im}{Re} \Big|_{\mu=0} \right)}{\tau} \neq 0, \quad (20a)$$

$$\text{Re} \left[\frac{d\alpha}{d\mu} \Big|_{\mu=0} \right] < 0 \quad (20b)$$

donde Re e Im son las partes real e imaginaria de x calculadas sobre el límite lineal, es decir:

$$Re = \frac{N_{sub} \hat{u}_0 - Ng}{2[\hat{u}_0 + N_{sub}(1 - \hat{u}_0) + Ng/N_{sub}]}, \quad (21a)$$

$$Im = \sqrt{1 - \left\{ \frac{N_{sub} \hat{u}_0 - Ng}{2[\hat{u}_0 + N_{sub}(1 - \hat{u}_0) + Ng/N_{sub}]} \right\}^2} \quad (21b)$$

Entonces, es posible encontrar una bifurcación en nuestra ecuación en demoras. Para investigar ésta, consideraremos la forma «local», o perturbada, de la ecuación (11):

$$(k_0 + i)(2\hat{u}_0 \ddot{a}_0 + \dot{a}_0^2) + \hat{u}_0(\ddot{a}_0 + \dot{a}_2) + \ddot{a}_0 \dot{a}_2 - N_{sub}[\hat{u}_0(\delta_1 + \delta_2) + \delta_1 \delta_2 - \delta_2] + Ng \left(\delta_1 + \frac{\delta_2}{N_{sub}} \right) = 0 \quad (22)$$

$$\text{donde } \hat{u}_n = \hat{u}_0 + \delta_n, \hat{u}_{n-1} = \hat{u}_0 + \delta_{n-1} \text{ y } \hat{u}_{n-2} = \hat{u}_0 + \delta_{n-2}$$

Escribiendo $\delta_n = \epsilon y_n$, donde ϵ es un parámetro pequeño, obtenemos

$$(k_0 + \mu)(2\hat{u}_0 y_0 + \epsilon y_0^2) + \hat{u}_0(y_0 + y_2) + \epsilon y_0 y_2 - N_{sub}[\hat{u}_0(y_1 + y_2) + \epsilon y_1 y_2 - y_2] + Ng \left(y_1 + \frac{y_2}{N_{sub}} \right) = 0 \quad (23)$$

Expandiendo ahora las siguientes expresiones

$$\mu = \mu_{(1)} \epsilon + \mu_{(2)} \epsilon^2 + \dots \quad (24a)$$

$$t = \theta \left(\frac{1}{\omega_c} + \tau_{(1)} \epsilon + \tau_{(2)} \epsilon^2 + \dots \right) \quad (24b)$$

$$y_0 = y_{0(0)} + y_{0(1)} \epsilon + y_{0(2)} \epsilon^2 + \dots \quad (24c)$$

$$y_1 = y_{1(0)} + y_{1(1)} \epsilon + y_{1(2)} \epsilon^2 + \dots \quad (24d)$$

$$y_2 = y_{2(0)} + y_{2(1)} \epsilon + y_{2(2)} \epsilon^2 + \dots \quad (24e)$$

donde $\omega_c = Im(\alpha)$.

La expansión en serie de la variable temporal introducida en (24b) implica sobre las demoras:

$$y_{1(\omega)} = y_{0(\omega)} \left(\theta - \frac{\tau}{\omega_c^{-1} + \chi} \right) = y_{0(\omega)}(\theta - \tau\omega_c) + \left. \frac{dy_{0(\omega)}(\theta - \tau\omega_c)}{d\chi} \right|_{\chi=0} \chi + \left. \frac{d^2 y_{0(\omega)}(\theta - \tau\omega_c)}{d\chi^2} \right|_{\chi=0} \chi^2 + \dots \quad (25a)$$

$$y_{2(\omega)} = y_{0(\omega)} \left(\theta - \frac{2\tau}{\omega_c^{-1} + \chi} \right) = y_{0(\omega)}(\theta - 2\tau\omega_c) + \left. \frac{dy_{0(\omega)}(\theta - 2\tau\omega_c)}{d\chi} \right|_{\chi=0} \chi + \left. \frac{d^2 y_{0(\omega)}(\theta - 2\tau\omega_c)}{d\chi^2} \right|_{\chi=0} \chi^2 + \dots \quad (25b)$$

donde $\chi = \tau_{(1)} \varepsilon + \tau_{(2)} \varepsilon^2 \dots$.

En adelante redefiniremos

$$y_{1(\omega)} = y_{0(\omega)}(\theta - \tau\omega_c) \quad (26a)$$

$$y_{2(\omega)} = y_{0(\omega)}(\theta - 2\tau\omega_c) \quad (26b)$$

Combinando las (23) a (25) obtenemos:

$$L_\omega(y_{n(\omega)}) = 0, \quad (27a)$$

$$L_\omega(y_{n(l)}) = S_{(l)}, \quad (27b)$$

$$L_\omega(y_{n(\omega)}) = S_{(\omega)}. \quad (27c)$$

La derivación de las funciones L_ω y $S_{(l)}$ se encuentra desarrollada en el Apéndice.

Para buscar soluciones periódicas, (con período 2π), ésta nos impone la condición de ortogonalidad siguiente:

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y_{n(l)} e^{-j\theta} d\theta = 1 \quad (28)$$

Recordando que

$\delta_n = \varepsilon y_n = \varepsilon (y_{n(\omega)} + y_{n(1)} \varepsilon + y_{n(2)} \varepsilon^2 + \dots)$, entonces la (28) implica

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \delta_n e^{-j\theta} d\theta = 1 \quad (29)$$

La condición necesaria y suficiente para que las ecuaciones (27) tengan una solución periódica es bien conocida como "alternativa de Fredholm":

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} S_{(l)} e^{-j\theta} d\theta = 1 \quad (30)$$

Una solución (real) que satisface las ecuaciones (27a) y (28) es

$$y_{0(\omega)} = \frac{1}{2} (e^{j\theta} + e^{-j\theta}) \quad (31)$$

la cual junto con las (25) determinan las soluciones demoradas $y_{1(\omega)}$ y $y_{2(\omega)}$.

Para $l = 0$, siendo $S_{(0)} = 0$, la ecuación (30) se satisface trivialmente. Para $l = 1$, la (30) implica

$$\begin{aligned} & -k_0 \int_0^{2\pi} y_{0(\omega)}^2 e^{-j\theta} d\theta - 2\hat{u}_0 \mu_{(1)} \int_0^{2\pi} y_{0(\omega)} e^{-j\theta} d\theta - \\ & \int_0^{2\pi} y_{0(\omega)} y_{2(\omega)} e^{-j\theta} d\theta + N_{sub} \int_0^{2\pi} y_{1(\omega)} y_{2(\omega)} e^{-j\theta} d\theta + \\ & \tau\omega_c^2 \tau_{(1)} \left(N_{sub} \hat{u}_0 - Ng \right) \int_0^{2\pi} \frac{dy_{1(\omega)}}{d\chi} e^{-j\theta} d\theta - \\ & 2 \left(\hat{u}_0 + N_{sub} (1 - \hat{u}_0) + \frac{Ng}{N_{sub}} \right) \int_0^{2\pi} \frac{dy_{2(\omega)}}{d\chi} e^{-j\theta} d\theta = 0 \end{aligned} \quad (32)$$

Combinando las ecuaciones (25a,b), (26a,b), y (31), obtenemos,

$$\int_0^{2\pi} y_{0(\omega)}^2 e^{-j\theta} d\theta = 0, \quad (33a)$$

$$\int_0^{2\pi} y_{0(\omega)} e^{-j\theta} d\theta = \pi, \quad (33b)$$

$$\int_0^{2\pi} \frac{dy_{1(\omega)}}{d\chi} e^{-j\theta} d\theta = -\pi\tau\omega_c^2 j. \quad (33c)$$

$$\int_0^{2\pi} \frac{dy_{2(\omega)}}{d\chi} e^{-j\theta} d\theta = -2\pi\tau\omega_c^2 j \quad (33d)$$

$$\int_0^{2\pi} y_{0(\omega)} y_{2(\omega)} e^{-j\theta} d\theta = 0 \quad (33e)$$

$$\int_0^{2\pi} y_{1(\omega)} y_{2(\omega)} e^{-j\theta} d\theta = 0 \quad (33f)$$

Partiendo de las (32) y (33) se deduce que $\mu_{(2)} = \tau_{(2)} = 0$.

Para $l = 2$, la ecuación (27c), junto con $\mu_{(2)} = \tau_{(2)} = 0$, implica

$$-2k_0 \int_0^{2\pi} y_{0(\omega)} y_{0(\omega)} e^{-j\theta} d\theta - 2\hat{u}_0 \mu_{(2)} \int_0^{2\pi} y_{0(\omega)} e^{-j\theta} d\theta$$

$$- \int_0^{2\pi} (y_{0(\omega)} y_{2(\omega)} + y_{0(\omega)} y_{2(\omega)}) e^{-j\theta} d\theta -$$

$$2 \left[\hat{u}_0 + N_{sub}(l - \hat{u}_0) + \frac{Ng}{N_{sub}} \right] \tau \omega_c^2 \tau_{(2)} \times$$

$$\int_0^{2\pi} \frac{dy_{2(\omega)}}{d\chi} e^{-j\theta} d\theta +$$

$$(N_{sub} \hat{u}_0 - Ng) \tau \omega_c^2 \tau_{(2)} \int_0^{2\pi} \frac{dy_{1(\omega)}}{d\chi} e^{-j\theta} d\theta$$

$$+ N_{sub} \int_0^{2\pi} (y_{1(\omega)} y_{2(\omega)} + y_{2(\omega)} y_{1(\omega)}) = 0 \quad (34)$$

Introduciremos una solución (real) de $y_{0(j)}$, la cual satisface las ecuaciones (30) y (34), de la forma

$$y_{0(j)} = a + b e^{j\theta} + \bar{b} e^{-j\theta} + c e^{2j\theta} + \bar{c} e^{-2j\theta} \quad (35)$$

En ésta, el parámetro a es real y b y c son complejos. Las magnitudes demoradas correspondientes a la solución introducida son:

$$y_{1(\omega)} = a + b e^{j(\theta - \tau \omega_c)} + \bar{b} e^{-j(\theta - \tau \omega_c)} + c e^{2j(\theta - \tau \omega_c)} + \bar{c} e^{-2j(\theta - \tau \omega_c)} \quad (36a)$$

$$y_{2(\omega)} = a + b e^{j(\theta - 2\tau \omega_c)} + \bar{b} e^{-j(\theta - 2\tau \omega_c)} + c e^{2j(\theta - 2\tau \omega_c)} + \bar{c} e^{-2j(\theta - 2\tau \omega_c)} \quad (36b)$$

Usando las ecuaciones (32), (35) y (36) podemos calcular:

$$\int_0^{2\pi} y_{0(\omega)} y_{0(\omega)} e^{-j\theta} d\theta = \pi(a + c) \quad (37a)$$

$$\int_0^{2\pi} y_{2(\omega)} y_{0(\omega)} e^{-j\theta} d\theta = \pi(a + c e^{-4\tau \omega_c j}) \quad (37b)$$

$$\int_0^{2\pi} y_{1(\omega)} y_{2(\omega)} e^{-j\theta} d\theta = \pi(a e^{-4\tau \omega_c j} + c) \quad (37c)$$

$$\int_0^{2\pi} y_{2(\omega)} y_{1(\omega)} e^{-j\theta} d\theta = \pi(a e^{-\tau \omega_c j} + c e^{-3\tau \omega_c j}) \quad (37d)$$

$$\int_0^{2\pi} y_{0(\omega)} y_{2(\omega)} e^{-j\theta} d\theta = \pi(a e^{-2\tau \omega_c j} + c e^{2\tau \omega_c j}) \quad (37e)$$

Reemplazando las ecuaciones (33c,d) y (37) en la (34), obtenemos la condición de Fredholm sobre $l = 2$:

$$\begin{aligned} & -2k_0(a + c) - 2\hat{u}_0 \mu_{(2)} - (a + c e^{-4\tau \omega_c j}) + \\ & + N_{sub}(a e^{-2\tau \omega_c j} + c) \\ & + N_{sub}(a e^{-2\tau \omega_c j} + c e^{-3\tau \omega_c j}) - \\ & (a e^{-2\tau \omega_c j} + c e^{2\tau \omega_c j}) \\ & + \left\{ -2 \left[\hat{u}_0 + N_{sub}(l - \hat{u}_0) + \frac{Ng}{N_{sub}} \right] e^{-2\tau \omega_c j} + \right. \\ & \left. + (N_{sub} \hat{u}_0 - Ng) e^{-\tau \omega_c j} \right\} \tau \omega_c^2 \tau_{(2)} j = 0 \quad (38) \end{aligned}$$

Los coeficientes a y c pueden ser calculados combinando las ecuaciones (35) y (27b), siendo:

$$a = \frac{\left(\frac{N_{sub}(l - \hat{u}_0) + \frac{Ng}{N_{sub}}}{\hat{u}_0} + [e^{2\tau \omega_c j} + e^{-2\tau \omega_c j}] - N_{sub}(e^{\tau \omega_c j} + e^{-\tau \omega_c j}) \right)}{\left\{ 2 \left[N_{sub} + \hat{u}_0 + \frac{Ng}{N_{sub}} \right] - 3N_{sub} \hat{u}_0 + Ng \right\}}$$

(39a)

$$c = \frac{\left(\frac{N_{sub}(1-\hat{u}_0) + \frac{Ng}{N_{sub}}}{8\hat{u}_0} \right)^{2m_2 j} + \frac{1 - N_{sub}e^{-2m_2 j}}{4}}{\left(N_{sub}(1-\hat{u}_0) + \hat{u}_0 + \frac{Ng}{N_{sub}} \right) 2 \cos(2m_2 j) + (Ng - N_{sub})} \quad (39b)$$

Combinando las ecuaciones (38) y (39) se obtiene la siguiente expresión analítica para el coeficiente $\mu_{(2)}$:

$$\begin{aligned} 2\hat{u}_0\mu_{(2)} = & -\frac{N_{sub}(1-\hat{u}_0) + Ng/N_{sub}}{\hat{u}_0} (a+c_1) - \\ & c_1(Re^4 - 6Re^2Im^2 + Im^4) - a \\ & + 4c_2(Re^3Im - ReIm^3) + N_{sub}a(Re^2 - Im^2) + \\ & + N_{sub}(c_1 + aRe) \\ & + N_{sub}c_1(Re^3 - 3ReIm^2) - \\ & N_{sub}c_2(3Re^2Im - Im^3) - 2c_2ReIm \\ & - (a+c_1)(Re^2 - Im^2) + Im\{Ng - N_{sub}\hat{u}_0 + \\ & 4Re[\hat{u}_0 + N_{sub}(1-\hat{u}_0) + Ng/N_{sub}]\} \\ & \left[\frac{(N_{sub}(1-\hat{u}_0) + Ng/N_{sub})c_2}{\hat{u}_0} - N_{sub}c_2 - \right. \\ & N_{sub}c_1(3Re^2Im - Im^3) - aN_{sub}Im \\ & - N_{sub}c_2(Re^3 - 3ReIm^2) + 4c_1(Re^3Im - ReIm^3) + \\ & c_2(Re^2 - Im^2) \\ & + c_2(Re^4 - 6Re^2Im^2 + Im^4) + \\ & \left. - 2(a-c_1)ReIm - 2aN_{sub}ReIm \right] / \\ & \left\{ N_{sub}\hat{u}_0 - Ng \right\} Re - \left[\hat{u}_0 + N_{sub}(1-\hat{u}_0) + \right. \\ & \left. Ng/N_{sub} \right] 2(Re^2 - Im^2) \} \equiv f(N_{sub}, Ng, \hat{u}_0) \quad (40) \end{aligned}$$

donde c fue separado en su parte real e imaginaria como $c = c_1 + j c_2$.

Análisis y discusión de los resultados

La ecuación (40) constituye un resultado importante concerniente a las propiedades no lineales del modelo en demoras de la dinámica de canales bifásicos presentado en este trabajo. En primer lugar, el signo de $\mu_{(2)}$ determina el carácter de la bifurcación. Dado que

$Re[\partial\alpha(\mu = 0)/\partial\mu] < 0$, el criterio es
 $\mu_{(2)} > 0 \Rightarrow$ bifurcación subcrítica,
 $\mu_{(2)} < 0 \Rightarrow$ bifurcación supercrítica.

Bajo condiciones subcríticas, dentro de la región linealmente inestable el sistema se vuelve inestable ante excitaciones de cualquier amplitud. Más aún, éste es también inestable en alguna región linealmente estable ante excitaciones de amplitud suficientemente grandes. Por otra parte, un sistema supercrítico es siempre estable dentro de la región del margen de estabilidad lineal, y exhibe soluciones periódicas finitas (ciclos límites) dentro de alguna región de inestabilidad lineal (Lahey, 1986). En la Fig. 5 se representan los distintos comportamientos y sus regiones, asociados a las cuencas de Hopf subcríticas y supercríticas. La condición límite $\mu_{(2)} = 0$, representa el punto de transición donde el sistema muda de subcrítico a supercrítico. Éste determina una curva en el espacio paramétrico (N_{sub}, \hat{u}_0) :

$$f(N_{sub}, Ng, \hat{u}_0) = 0. \quad (41)$$

Se resolvió numéricamente esta ecuación para distintos Ng como se muestra en la Fig. 6. En ésta puede verse el aumento de la cuenca dinámica subcrítica hacia subenfriamientos mayores, conforme se incrementa el término gravitatorio. Cabe destacar no obstante, que independientemente del valor de éste, para números de subenfriamientos grandes el carácter de la bifurcación está determinado sólo por el valor de \hat{u}_0 , verificándose que:

$$\lim_{N_{sub} \rightarrow \infty} \hat{u}_0(\mu_{(2)}) = 1/2. \\ \forall Ng < \infty$$

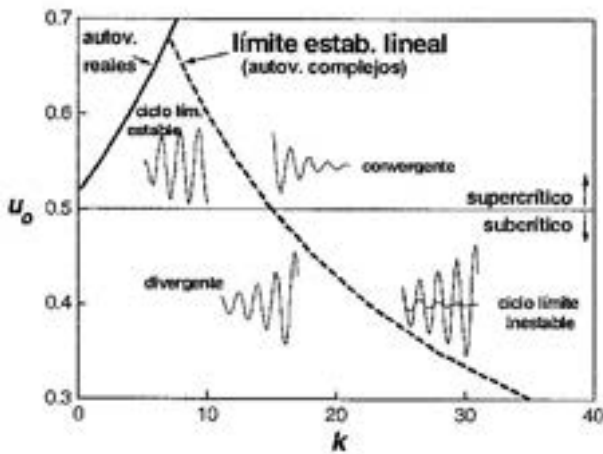


Fig. 5.- Esquema de comportamientos no lineales ($N_{sub} = 30, Ng = 0$).

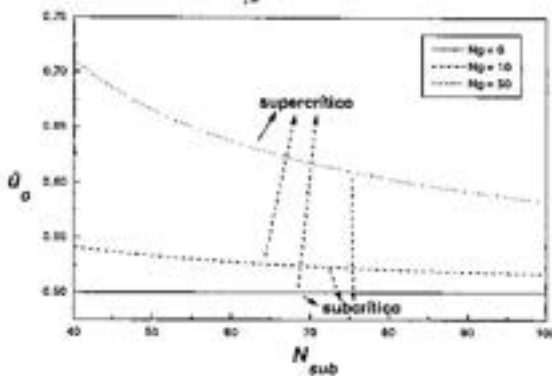


Fig. 6.- Carácter de la bifurcación de Hopf para distintos Ng .

Otra aplicación de la ecuación (40) es el cálculo de la amplitud de los ciclos límites (en bifurcaciones supercríticas), o alternativamente el tamaño de la mínima perturbación que dispara la inestabilidad dentro del dominio de estabilidad lineal (en bifurcaciones subcríticas). Tomando sólo los términos de menor (segundo) orden en las ecuaciones (24) se pueden expresar:

$$\mu = \mu_{(2)} \epsilon^2, \quad (42a)$$

$$\theta = \omega_c t, \quad (42b)$$

$$y_0 = y_{0(\omega)} = \cos \theta, \quad (42c)$$

$$\delta_0 = \epsilon y_0' \quad (42d)$$

Combinando las ecuaciones (40) y (42), la amplitud relativa de la perturbación

puede ser relacionada con el apartamiento de k desde el límite lineal, k_0 , por:

$$\frac{|\delta_0|^2}{\hat{u}_0^2} = \frac{I(\mu)}{R(k_0)}, \quad (43)$$

donde R se define como:

$$R = \frac{\hat{u}_0^2}{N_{sub}(1-\hat{u}_0) + Ng/N_{sub}} f(N_{sub}, Ng, \hat{u}_0) \quad (44)$$

El significado de R puede ser deducido de la ecuación (43). Para bifurcaciones subcríticas ($R > 0$), cuanto más alto sea el valor de R , menor lo será la perturbación requerida para desestabilizar una condición linealmente estable. Por lo tanto, en regiones estables donde R es alto, debería prestarse atención especial a la respuesta del sistema ante perturbaciones de amplitud finita. Por otra parte, para bifurcaciones supercríticas ($R < 0$), cuanto más bajo sea el valor de R , otro tanto lo será la amplitud del ciclo límite. Por consiguiente, en regiones inestables donde R es bajo, la respuesta del sistema podría ser aceptable para el diseño, cuando las oscilaciones se mantuviesen dentro de los rangos controlables. En general R puede ser visto como un indicador de «riesgo», en el sentido de que mayores R implican situaciones más peligrosas.

En las Fig. 7 se ilustra la dependencia de R con N_{sub} para diferentes \hat{u}_0 y para dos Ng distintos. Se observa, en concordancia con el aumento de subcriticidad antes notado, que incrementando Ng aumenta el «riesgo» del sistema.

Similarmente al factor antes estudiado, para N_{sub} grandes R, R_∞ , depende únicamente de \hat{u}_0 . Este límite fue analíticamente calculado y se refleja su comportamiento en la Fig. 8. Hay dos resultados interesantes a destacar:

- máximo (R_∞) = 0.201, ocurre en $\hat{u}_0 = 0.211$.
- $\lim_{\hat{u}_0 \rightarrow 0} R_\infty = 0.1875$.

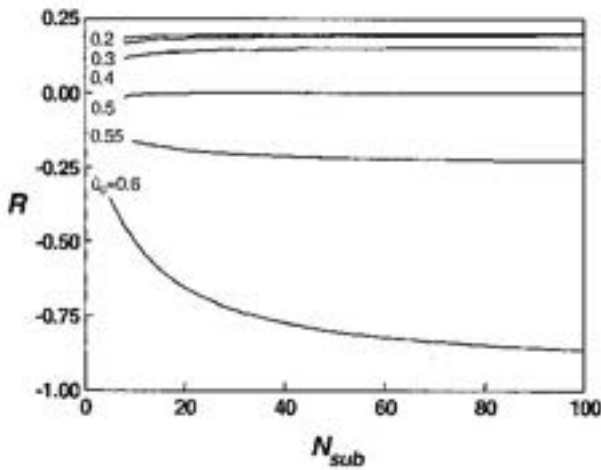


Fig. 7a.- Indicador de riesgo para distintos \hat{u}_0 y $N_g = 0$.

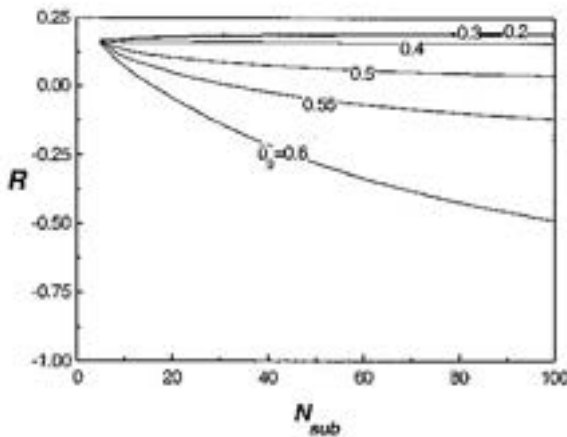


Fig. 7b.- Indicador de riesgo para distintos \hat{u}_0 y $N_g = 10$.

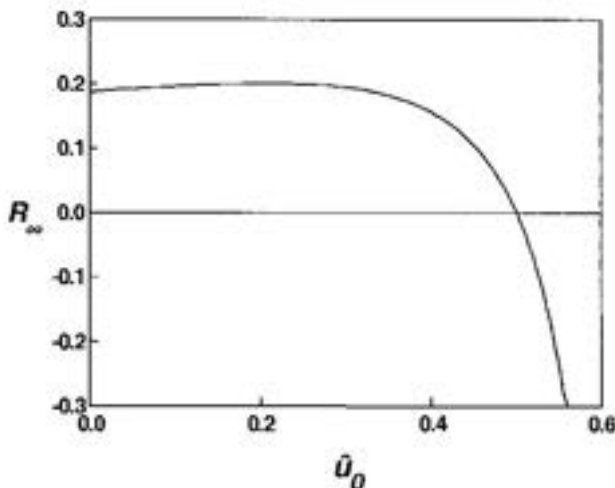


Fig. 8.- Indicador de riesgo para N_{sub} grandes.

Conclusiones

Se derivó un modelo matemático de la dinámica de flujos bifásicos en canales verticales u horizontales, basado en ecuaciones en demoras a partir de las ecuaciones de conservación de una mezcla bifásica homogénea. Se obtuvo así un mapeo bidimensional como resultado de asumir demoras de transporte constantes a lo largo del canal. La estabilidad de la dinámica discreta fue analizada perturbando linealmente alrededor del estado estacionario. Se encontraron soluciones oscilatorias y excursivas, correspondientes a inestabilidades del tipo de ondas de densidad y de Ledinegg respectivamente.

Las características de las inestabilidades oscilatorias fueron estudiadas usando métodos perturbativos de Hopf. El análisis permitió identificar cuencas dinámicas asociadas a bifurcaciones de Hopf subcríticas y supercríticas. Fue posible describir en forma analítica el comportamiento no lineal del sistema usando una función de "riesgo", la cual provee una medida de la amplitud de los ciclos límites (estables o inestables).

En suma, la gravedad tiene un efecto inestabilizante sobre la dinámica de canales en ebullición frente al fenómeno de ondas de densidad. Se reducen los márgenes de estabilidad lineal y además se acentúa el carácter no conservativo del análisis lineal de estabilidad.

Apéndice

Combinando las ecuaciones (23) a (25) obtenemos:

$$\begin{aligned} & (k_0 + \mu_{(1)}\epsilon + \mu_{(2)}\epsilon^2 + \dots) \left[2\hat{u}_0 (y_{0_{(1)}} + y_{0_{(1)}}\epsilon + \right. \\ & \left. y_{0_{(2)}}\epsilon^2 + \dots) + \epsilon (y_{0_{(1)}}^2 + 2\epsilon y_{0_{(1)}} y_{0_{(1)}} + \dots) \right] + \\ & \hat{u}_0 (y_{0_{(1)}} + y_{0_{(1)}}\epsilon + y_{0_{(2)}}\epsilon^2 + \dots) + \epsilon (y_{0_{(1)}} + y_{0_{(1)}}\epsilon + \end{aligned}$$

$$y_{0_{(2)}}\epsilon^2 + \dots \left[y_{2_{(1)}} + \frac{dy_{2_{(1)}}}{d\chi} (\tau_{(1)}\epsilon + \dots) + y_{2_{(1)}}\epsilon + \dots \right] +$$

$$+ \hat{u}_0 \left[y_{2,\epsilon} + \frac{dy_{2,\epsilon}}{d\chi} (\tau_{(1)}\epsilon + \tau_{(2)}\epsilon^2) + \frac{d^2 y_{2,\epsilon}}{d\chi^2} \tau_{(1)}^2 \epsilon^2 + \dots \right] \times \left[y_{2,\epsilon} + \frac{dy_{2,\epsilon}}{d\chi} (\tau_{(1)}\epsilon + \dots) + y_{2,\epsilon} \epsilon + \dots \right] \quad (45)$$

$$y_{2,\epsilon} \epsilon + \frac{dy_{2,\epsilon}}{d\chi} \tau_{(1)} \epsilon^2 + y_{2,\epsilon} \epsilon^2 + \dots \Big] +$$

$$Ng \left[y_{1,\epsilon} + y_{1,\epsilon} \epsilon + \frac{dy_{1,\epsilon}}{d\chi} (\tau_{(1)}\epsilon + \tau_{(2)}\epsilon^2) + \right.$$

$$\left. \frac{d^2 y_{1,\epsilon}}{d\chi^2} \tau_{(1)}^2 \epsilon^2 + \frac{dy_{1,\epsilon}}{d\chi} \tau_{(1)} \epsilon^2 + y_{1,\epsilon} \epsilon^2 + \right]$$

$$- N_{sub} \hat{u}_0 \left[y_{1,\epsilon} + y_{1,\epsilon} \epsilon + \frac{dy_{1,\epsilon}}{d\chi} (\tau_{(1)}\epsilon + \tau_{(2)}\epsilon^2) + \right.$$

$$\left. \frac{d^2 y_{1,\epsilon}}{d\chi^2} \tau_{(1)}^2 \epsilon^2 + \frac{dy_{1,\epsilon}}{d\chi} \tau_{(1)} \epsilon^2 + y_{1,\epsilon} \epsilon^2 + \dots \right]$$

$$+ N_{sub} \left[y_{2,\epsilon} + \frac{dy_{2,\epsilon}}{d\chi} (\tau_{(1)}\epsilon + \tau_{(2)}\epsilon^2) + \frac{d^2 y_{2,\epsilon}}{d\chi^2} \tau_{(1)}^2 \epsilon^2 + \right.$$

$$\left. y_{2,\epsilon} \epsilon + \frac{dy_{2,\epsilon}}{d\chi} \tau_{(1)} \epsilon^2 + y_{2,\epsilon} \epsilon^2 + \dots \right] (1 - \hat{u}_0)$$

$$+ \frac{Ng}{N_{sub}} \left[y_{2,\epsilon} + \frac{dy_{2,\epsilon}}{d\chi} (\tau_{(1)}\epsilon + \tau_{(2)}\epsilon^2) + \right.$$

$$\left. \frac{d^2 y_{2,\epsilon}}{d\chi^2} \tau_{(1)}^2 \epsilon^2 + y_{2,\epsilon} \epsilon + \right.$$

$$\left. \frac{dy_{2,\epsilon}}{d\chi} \tau_{(1)} \epsilon^2 + y_{2,\epsilon} \epsilon^2 + \dots \right]$$

$$- N_{sub} \epsilon \left[y_{1,\epsilon} + \frac{dy_{1,\epsilon}}{d\chi} (\tau_{(1)}\epsilon + \dots) + y_{1,\epsilon} \epsilon + \dots \right]$$

Colectando en potencias de ϵ , obtenemos el siguiente sistema de ecuaciones: (ϵ^0)

$$(2k_0 + 1)\hat{u}_0 y_{0,\epsilon} + \hat{u}_0 y_{2,\epsilon} + N_{sub} \left[(1 - \hat{u}_0) y_{2,\epsilon} - \hat{u}_0 y_{1,\epsilon} \right] + Ng \left(y_{1,\epsilon} + \frac{y_{2,\epsilon}}{N_{sub}} \right) = 0, \quad (46a)$$

o, $L_0(y_{n,\epsilon}) = 0$.

(ϵ^1):

$$(2k_0 + 1)\hat{u}_0 y_{0,\epsilon} - N_{sub} \hat{u}_0 y_{1,\epsilon} + [\hat{u}_0 + N_{sub}(1 - \hat{u}_0)] y_{2,\epsilon} + Ng \left(y_{1,\epsilon} + \frac{y_{2,\epsilon}}{N_{sub}} \right) = -k_0 y_{0,\epsilon}^2 - 2\hat{u}_0 \mu_{(1)} y_{0,\epsilon} - y_{0,\epsilon} y_{2,\epsilon} + N_{sub} y_{1,\epsilon} y_{2,\epsilon} + \hat{u}_0 \tau \omega_c^2 \left(N_{sub} \frac{dy_{1,\epsilon}}{d\chi} - 2 \frac{dy_{2,\epsilon}}{d\chi} \right) \tau_{(1)} - Ng \tau \omega_c^2 \left(\frac{dy_{1,\epsilon}}{d\chi} - 2 \frac{dy_{2,\epsilon}}{d\chi} \right) \tau_{(1)} \quad (46b)$$

o, $L_0(y_{n,\epsilon}) = S_{\omega}$

(ϵ^2):

$$(2k_0 + 1)\hat{u}_0 y_{0,\epsilon} + [\hat{u}_0 + N_{sub}(1 - \hat{u}_0)] y_{2,\epsilon} - N_{sub} \hat{u}_0 y_{1,\epsilon} + Ng \left(y_{1,\epsilon} + \frac{y_{2,\epsilon}}{N_{sub}} \right) =$$

$$\begin{aligned}
 & 2k_0 y_{0,01} y_{0,11} - 2\hat{u}_0 \mu_{(2)} y_{0,01} - \\
 & \mu_{(1)} \left(2\hat{u}_0 y_{0,11} + y_{0,11}^2 \right) - \\
 & \hat{u}_0 \left(\frac{dy_{2,01}}{d\chi} \tau \omega_c^2 \tau_{(2)} + \frac{d^2 y_{2,01}}{d\chi^2} \tau \omega_c^2 \tau_{(1)} + \right. \\
 & \left. \frac{dy_{2,11}}{d\chi} \tau \omega_c^2 \tau_{(1)} \right) - y_{2,01} y_{0,11} + \\
 & N_{sub} \hat{u}_0 \left(\frac{dy_{1,01}}{d\chi} \tau \omega_c^2 \tau_{(2)} + \frac{dy_{1,11}}{d\chi} \tau \omega_c^2 \tau_{(1)} + \right. \\
 & \left. \frac{d^2 y_{1,01}}{d\chi^2} \tau \omega_c^2 \tau_{(1)} \right) - \\
 & y_{0,01} \left(\frac{dy_{2,01}}{d\chi} \tau \omega_c^2 \tau_{(1)} + y_{2,11} \right) + \\
 & N_{sub} y_{2,01} \left(\frac{dy_{1,01}}{d\chi} \tau \omega_c^2 \tau_{(1)} + y_{1,11} \right) + \\
 & - N_{sub} y_{1,01} \left(\frac{dy_{2,01}}{d\chi} \tau \omega_c^2 \tau_{(1)} + y_{2,11} \right) - \\
 & N_{sub} (1 - \hat{u}_0) \tau \omega_c^2 \left(\frac{dy_{2,01}}{d\chi} \tau_{(2)} + \frac{d^2 y_{2,01}}{d\chi^2} \tau_{(1)} + \right. \\
 & \left. \frac{dy_{2,11}}{d\chi} \tau_{(1)} \right) - Ng \tau \omega_c^2 \tau_{(2)} \left(\frac{dy_{1,01}}{d\chi} + \frac{d^2 y_{2,01}}{d\chi^2} \right)
 \end{aligned}
 \tag{46c}$$

o también, $L_0(y_n^{(w)}) = S_{(w)}$.

En general, $L_0(y_n^{(w)}) = S_{(w)}$. Nótese que mientras que la forma de $L_0(y_n^{(w)})$ permanece sin cambios, $S_{(w)}$ se ve incrementada en complejidad, mayormente para $l \geq 2$.

Referencias

- Achard J. L., D. A. Drew and R. T. Lahey, "The analysis of non-linear density-wave oscillations in boiling channels", *J. Fluid Mech.* **155**, 213-232 (1985).
- Clausse A., D. F. Delmastro and L. Juanicó, "A simple delay model for two-phase flow dynamics", *NUREG-CP-0142*, **4**, 3232-3244, *NURETH-7 Conference*, Saratoga Springs, (1995).
- Clausse A., D. F. Delmastro and L. Juanicó, "A simple delay model for the dynamics of boiling channels", *Latin Am. Applied Research* **26**, 185-191 (1996).
- Delmastro "Aplicación de la Teoría de Sistemas Dinámicos al Análisis de Inestabilidades Termohidráulicas", Tesis de doctorado en Ing. Nuclear, Instituto Balseiro, 1993.
- Delmastro D., L. Juanicó y Clausse A. "A fully analytical treatment of Hopf bifurcations in a model of boiling channel", *Latin American Applied Research*, **28**, 165-173, 1998.
- Delmastro D. y L. Juanicó. "The influence of gravity on the dynamic of two phase boiling channels", 7º Congreso Latinoam. de Transferencia de Calor y Materia, Vol. 3, 801-805, Univ. Nac. de Salta, en Salta, octubre 1998.
- Delmastro D., Juanicó, L. y Clausse, A. "A delay theory for boiling flow stability analysis". En prensa, aceptado para su publicación en *International Journal of Multiphase Flow*, 2000.
- Dorning J., "An introduction to chaotic dynamics in two-phase flow". En Yalim B. Yilmaz Ed., *Heat Transfer - Philadelphia*, 1989, 241-248.
- Durnan J.D., "SBWR, a simplified boiling water reactor", *Nucl. Eng. Design*, **109**, 73-77, 1988.
- Lahey R.T., "Advances in the analytical modelling of linear and non-linear density-wave instability modes", *Nuc. Eng. and Design* **95**, 5-34 (1986).
- Lahey R.T. and D.A. Drew, "An Assessment of the Literature Related to LWR Instability Modes", *NUREG Report*, *NUREG/CR-1414* (1980).
- Lahey R.T. and F.J. Moody, "The Thermal hydraulics of a Boiling Water Nuclear Reactor", *ANS Monograph*, (1977).
- Juanicó, L., "Identificación de cuencas dinámicas en flujos con ebullición", Tesis de doctorado en Ing. Nuclear, Instituto Balseiro, 1998.
- Rizwan-Uddin, "On density-wave oscillations in

two phase flows", *Int. J. in Multiphase Flow*, 20(4), 721-737 (1994).

Kataoka Y. et al., "Conceptual design and thermal-hydraulics characteristics of natural circulation boiling water reactors". *Nucl. Technol.*, 82, 147-156, 1988.

Lista de símbolos

- Eu número de Euler, $Eu = \frac{\Delta p}{\rho_f u_r^2}$
- f función definida en ec. (41),
- h entalpía específica,
- h_{fg} $h_g - h_f$
- k_i coeficiente de fricción a la entrada,
- k_e coeficiente de fricción a la salida,
- k $(k_i - 1)/(k_e + 1)$
- j unidad imaginaria,
- L_{ch} longitud calefaccionada,
- N_{pch} número de cambio de fase, (N_{sub}/\hat{u}_0) ,
- N_{sub} número de subenfriamiento,
- $$N_{sub} = v \Omega = \frac{\Delta h_{sub} v_{fg}}{h_{fg} v_f},$$
- Ng número gravitatorio, $Ng = \frac{gL}{u_r^2 (k_e + 1)}$
- p presión,
- q potencia volumétrica,
- q'' flujo de calor,
- R factor de riesgo (definido en ec. (45)),
- t tiempo,
- u velocidad,
- v volumen específico,

v_{fg} $v_g - v_f$,

z coordenada espacial.

Griegas

- δ perturbación de la velocidad,
- ε parámetro pequeño,
- λ posición de la frontera de ebullición o longitud de la zona líquida,
- ρ densidad,
- ν tiempo de la partícula en la región líquida,
- τ tiempo de la partícula en la región bifásica,
- Ω $q v_{fg} / h_{fg}$.

Subíndices

- e egreso,
- f líquido (saturación),
- g vapor,
- i ingreso,
- n paso temporal,
- l orden del término,
- o estado estacionario,
- r referencia.
- ∞ $N_{sub} \rightarrow \infty$.

Otros

- \wedge adimensional.

Manuscrito recibido y aceptado en mayo de 2000.

III

COMUNICACIONES CIENTÍFICAS

BERNARDO A. HOUSSAY, SU TIEMPO

Andrés O. M. Stoppani

Académico Titular y ex Presidente de la Academia Nacional de Ciencias Exactas,
Físicas y Naturales.

Introducción

Houssay fue fisiólogo eminente, Premio Nobel, maestro de muchas generaciones de médicos y creador de una escuela que formó investigadores sobresalientes, entre ellos, otro Premio Nobel, Luis F. Leloir. Houssay fue también propulsor incansable de la investigación y la docencia superior, enseñó las normas severas del cumplimiento del deber, el culto por la justicia y la verdad, la integridad moral, el amor a la patria y a la humanidad. En el Instituto de Fisiología, en el Consejo Directivo de la Facultad de Medicina, en las varias Academias que lo contaron entre sus miembros, en la Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias, que él creó, en el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, que presidió desde su fundación hasta su muerte, en la Sociedad Argentina de Biología, que también creó y sostuvo, en fin, en todos los órdenes de una actividad tan útil como variada, Houssay demostró siempre sus cualidades morales, su inextinguible vocación de servicio público y su capacidad de organizador.

Adolescencia y juventud

Nacido en 1887 y Bachiller a los 13 años, Houssay ingresó en 1900 a la entonces Escuela de Farmacia de la Universidad de Buenos Aires, en la que fue alumno destacado recibiendo el título de Farmacéutico a los 17 años de edad.

Para evocar esos períodos de la vida de Houssay, nada mejor que recordar sus palabras en dos conferencias pronunciadas en 1933 y 1956 en Jornadas de la Sociedad de Farmacia de Buenos Aires, la primera y más antigua sociedad científica argentina. Dijo entonces Houssay: *"Aunque considero como uno de mis títulos muy queridos, el de farmacéutico, no tengo competencia especial en muchos capítulos de la farmacia, por lo que pienso que la invitación que se me ha hecho de hablar en este acto, se debe principalmente a mi dedicación a la ciencia, mi interés por el progreso cultural del país y mis esfuerzos por el progreso de la carrera universitaria farmacéutica, encarada en sus aspectos más nobles y transcendentales. A los catorce años ingresé a la Universidad y me inscribí en la Escuela de Farmacia, junto con mis tres mejores condiscípulos e íntimos amigos. Había decidido bastarme económicamente sin recibir ayuda de mis padres, y por eso quería tener pronto un medio de vida. Estaba convencido de que en esa escuela adquiriría conocimientos de química que me servirían en mi futura carrera de médico, como en efecto sucedió en grado superior a mis previsiones. Realicé mis prácticas iniciales en la Farmacia La Rosa, San Martín y Corrientes, donde aprendí a preparar papeles de ácido bórico, bicarbonato de sodio y sulfato de magnesio y a confeccionar sellos. El mismo año, 1901, ingresé como interno de Farmacia en el Hospital Francés de donde iba y volvía a pie dos veces por día a la Facultad, pues no tenía con qué pagar el tran-*

vía. Me dieron casa y comida y algunos meses después, un sueldo de diez pesos mensuales. Estudié con ahínco, aunque no tuve recursos para pagar los derechos arancelarios para ser alumno regular, pero en diciembre conseguí un préstamo con el que pude pagar los derechos y dar examen libre, obteniendo altas calificaciones. Esto permitió que al año siguiente consiguiera eximirme del pago de aranceles universitarios, por mis altas notas y un certificado de pobreza. También por estas calificaciones fui nombrado practicante menor y luego mayor de Farmacia del Hospital de Clínicas, con el sueldo mensual de cuarenta y siete pesos con cincuenta centavos (o sea cincuenta pesos y 5% de descuento)".

"Durante mi internado realicé prácticas magistrales y oficinales, confeccioné píldoras, sellos, pomadas, emulsiones y pociones. En ese tiempo se confeccionaban en las farmacias muchos preparados galénicos, en especial los de origen vegetal. En la Escuela de Farmacia fueron mis profesores los doctores J. Boeri, M. Puiggari, A. Mujica, M. Irizar, P. Arata, R. Schatz, A. Quiroga y J. Domínguez, todos muy respetados por sus alumnos. Arata me ofreció en 1910 la cátedra de Fisiología de la Facultad de Veterinaria, donde fui luego nombrado titular siendo decano Schatz. Irizar me dio su voto decisivo para mi nombramiento de profesor de Fisiología de la Facultad de Medicina".

Terminados los estudios de farmacia, a los 17 años Houssay ingresó a la Facultad de Medicina para cumplir su verdadera vocación. Médico a los 23 años, con muy altas calificaciones, la lectura de la Introducción a la Medicina Experimental, del fisiólogo Claude Bernard, lo decidió tempranamente por la investigación fisiológica. Los trabajos de Cushing sobre el papel de la hipófisis en la acromegalia, lo indujeron al estudio de las glándulas endocrinas, tema al que dedicaría su obra, cuyos notables resultados lo llevarían al Premio Nobel en 1947. Pocos tuvieron como él la suerte de iniciarse muy joven en la ardua tarea de la investigación y la enseñanza superior. Pero con cuantos esfuerzos, agotadoras fatigas y amargos sinsabores tuvo que pagar Houssay ese pequeño favor del destino. Sin grandes maestros, en un medio indi-

ferente y hasta hostil a la ciencia pura, dio vida a la investigación científica en nuestro país. Todo lo dejó por la ciencia: las seguras ganancias materiales; la medicina clínica que había empezado a ejercer con éxito; un elevado cargo en el Instituto Bacteriológico; el profesorado en la Facultad de Agronomía y Veterinaria y una jefatura de servicio hospitalario. Desde su designación, en 1919, como Profesor de Fisiología en la Facultad de Medicina, Houssay se consagró totalmente a la Cátedra y a la investigación. Fue el primero en el país en dar a la Universidad la plenitud de su tiempo y de sus esfuerzos, la dedicación exclusiva, por la que bregaría toda su vida, para imponerla como norma. Muchos años después, solía decir que todos sus ascensos habían significado una disminución de sus entradas y que muchas veces había tenido que costear con sus exiguos recursos gastos de investigación. Según sus palabras, *"al dedicarme a la ciencia debí elegir entre una probable situación pecuniaria holgada y una labor científica. Elegí lo mejor, lo que vale más que el dinero, con lo que salí ganando. Pero nunca presumí que mi dedicación a la Cátedra fuera un mérito excepcional pues, en verdad, los profesores de materias básicas que no la tienen constituyen la excepción anacrónica. Si algún mérito tuve fue el de iniciar el sistema en el país. Lo hice por respeto a mi Facultad, amor a la Ciencia y confianza en mi Patria".*

El Instituto de Fisiología

El Instituto de Fisiología fue creado por el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias Médicas de la Universidad de Buenos Aires, el 17 de noviembre de 1919. Houssay ya había sido designado profesor Titular de Fisiología. La resolución dice: "Fórmese con la actual Cátedra de Fisiología y las de Química y Física Biológicas el Instituto de Fisiología. Las dos últimas serán dictadas por encargados de curso". También se resolvió que los alumnos de Odontología cursaran esas materias junto con los de Medicina, y los alumnos del Doctorado en Farmacia y Bioquímica cursaran Física Biológica y Química Biológica en el mismo Instituto. Al fundamentar su

proyecto, el Decano Dr. Lanari explicó claramente los objetivos del Instituto, entre otros, realizar tareas de investigación no solamente en Fisiología sino en Química Biológica y Física Biológica, materias que hasta entonces eran dictadas en Cátedras independientes. La creación del Instituto implicó cambios importantes en la tradición académica de la Facultad de Ciencias Médicas, a saber: la integración de materias y de cátedras afines en una unidad docente y de investigación. Seguramente, había buenas razones para la creación del Instituto. Por una parte, la personalidad de Houssay y el prestigio que ya tenía como investigador, por la otra, la falencia de las cátedras de Física y Química Biológica, para la enseñanza y la investigación. La integración de las tres cátedras fue facilitada por la distribución de sus dependencias en el mismo edificio, pues los laboratorios tenían acceso a un mismo patio y compartían un mismo anfiteatro.

Desde 1919 hasta 1946, en el Instituto de Fisiología dictaron cátedra los profesores Houssay, Lewis, Pico Estrada y Rubio, de Fisiología; Sordelli, Laclau y Deulofeu, de Química Biológica, para Medicina; Wernicke, de Física Biológica, para Medicina; Muñoz, de Fisiología, para Odontología; Rietti y Marenzi, de Química Biológica, para Farmacia y Bioquímica; y Rossignoli, de Física Biológica, para Farmacia y Bioquímica. Como era norma entonces, las lecciones abarcaban la totalidad de los programas de enseñanza y a menudo incluían experimentos que contribuían a una pedagogía activa, objetiva y razonada. En el Instituto se formaron profesores de Fisiología y materias afines que ocuparían cátedras en universidades del país y del extranjero. Entre ellos, Pico Estrada, Lewis y Hug (en Rosario); Orías (en Córdoba), Cicardo y Rodríguez (en La Plata); Fasciolo y Suarez (en Tucumán y Mendoza); Cardini y Moglia (en Tucumán); Covian (en Riberão Preto, Brasil); Rimoldi (en Chicago); y Weber (en Sheffield, Inglaterra, y Urbana, Estados Unidos). También trabajaron fisiólogos extranjeros como Christiane Dosne, de Canadá; Delloro, Huidobro, Günter, Cabello y Honorato, de Chile; de Finis, del Paraguay; Soutomaior, del Brasil; Dexter y Zwemer, de

Estados Unidos, etc. Decenas de aspirantes al profesorado en la Facultad de Medicina se adiestraron en la investigación fisiológica, y muchos llegaron más tarde al titulariado, como Fustinoni, Taquini, Di Paola, Lanari, Pasqualini y Pinto, o a la Academia Nacional de Medicina, como Del Castillo y Stoppani.

A partir de 1928 y hasta 1943 las principales investigaciones del Instituto de Fisiología versaron sobre la función de la hipófisis, en particular sobre el metabolismo glucídico y diabetes. Houssay y sus colaboradores (Biassoti, Potick, Mazzoco, Foglia, Guerschman, Rodríguez y Stoppani, etc.) realizaron valiosas investigaciones sobre hipofisectomía y glucemia, metabolismo respiratorio, metabolismo nitrogenado, calcemia, fosfatemia, aminoacidemia, proteinemia y la secreción de la hormona melanotrópica hipofisaria. En relación con la hipófisis, Muñoz estudió los lípidos de la sangre. Estos trabajos y otros sobre el mismo tema constituyeron la obra fundamental de Houssay por la que se le otorgó el Premio Nobel en 1947.

Otra contribución notable al adelanto de la Medicina fue el descubrimiento de los factores humorales de la hipertensión arterial nefrótica. Esas investigaciones fueron iniciadas por Houssay, Taquini y Fasciolo, en 1937, con el hallazgo de sustancias presoras en la sangre venosa del riñón isquémico. Fasciolo, Taquini, Braun Menéndez, Leloir y Muñoz extendieron las observaciones iniciales y lograron aislar la sustancia responsable del efecto presor, que hoy se conoce con el nombre de angiotensina. El conocimiento de la angiotensina permitió años después la obtención de medicamentos eficaces para el tratamiento de la hipertensión arterial en el hombre y su producción por la industria farmacéutica.

En el Instituto de Fisiología se realizaron también los primeros estudios sobre nutrición humana en el país, iniciados por Sordelli, en 1923, y continuados después por Rietti, que estudió la composición del mistol, las semillas de quinoa y otros alimentos consumidos en las provincias del norte argentino. Las primeras aplicaciones de la insulina en el país se realizaron en el Instituto con insulina preparada en el Instituto Bacteriológi-

co, poco después del descubrimiento de la hormona por Banting y Best, en 1923.

La creación del Instituto de Fisiología tuvo influencia decisiva para el adelanto de la Química Biológica y la investigación bioquímica en la Universidad de Buenos Aires, porque los bioquímicos formados en el Instituto se convirtieron años después en profesores de la Facultad de Farmacia y Bioquímica y de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales y fundaron el Instituto de Investigaciones Bioquímicas "Fundación Campomar".

En el Instituto de Fisiología también se realizaron trabajos de Química Fisiológica inspirados o dirigidos personalmente por Houssay, trabajos relacionados con sus investigaciones endocrinológicas. De esa época datan las investigaciones de la Dra. Malamud, sobre la calcemia y ciclo menstrual (1924); varios de Morera, Mazzoco, Pico Estrada y Savino sobre acciones de la insulina, la hipófisis y las ponzoñas sobre la composición química de la sangre (1924-1927); y aparece el primer trabajo de Royer sobre pigmentos biliares (1926), tema que continuó estudiando con notable perseverancia y en el que alcanzó reputación internacional. En los primeros trabajos de Royer colaboraron Cornejo Saravia y Mazzoco (1929). En 1927 aparecieron trabajos sobre la dosificación del lactato y aminoácidos en la sangre de las ratas inyectadas con ponzoñas (Houssay, Mazzoco y Rietti), trabajo que sin duda requería una buena analítica biológica; un trabajo de Houssay y Mazzoco sobre glutatión y suprarrenales, de muy buena inspiración y factura; y varios de la misma calidad sobre la composición mineral del plasma de los perros hipofisoprivos (Houssay y Mazzoco). En 1929 aparecieron trabajos de Mazzoco sobre la distribución del yodo en el medio ambiente salteño, importante para explicar la existencia de bocio endémico en la provincia; sobre los aminoácidos en la sangre y su modificación en distintas condiciones fisiológicas; y un estudio de Rietti sobre la composición química de la harina de algarroba, sin duda pionero en la investigación bromatológica argentina. Este trabajo tenía, posiblemente, la finalidad de comprobar una acción antiescorbútica de la harina de algarro-

ba, pues en el mismo año apareció una publicación de Schlossberg sobre la acción antiescorbútica de los citrus del Delta del Paraná, en los que comprueba una eficaz acción, en contraste con la mencionada harina, que resultó completamente ineficaz. Houssay también promovió el desarrollo de la psicología experimental entre los años 1940 y 1941.

La creación del Instituto de Fisiología de la Facultad de Medicina de la Universidad fue un acontecimiento de trascendencia histórica para la Facultad y para el desarrollo de la ciencia médica argentina. El éxito de esa empresa se debió, en primer lugar, a la personalidad de Houssay; también, a la obra de todos los que, a través del tiempo, él supo atraer, convencerlos de la importancia de la investigación científica y lograr que mediante el esfuerzo de todos se realizarán contribuciones fundamentales al adelanto del conocimiento médico. Esa obra se realizó, en su mayor parte, con el trabajo honorario de los médicos, bioquímicos y químicos, algunos beneficiarios de los modestos sueldos que entonces otorgaba el erario público a los docentes de la Facultad. La concepción inicial de Houssay, como promotor de la creación del Instituto, fue promover la investigación de la Fisiología y disciplinas afines: la Química Biológica, la Física Biológica, la Farmacología y la Nutrición. Sometido su proyecto a la prueba del tiempo, fue evidente el éxito en el campo de la Fisiología y la Bioquímica, disciplinas en las que se realizaron las investigaciones más trascendentes, a saber, el conocimiento de las funciones de la hipófisis, especialmente el lóbulo anterior de la hipófisis y el mecanismo de la hipertensión arterial nefrótica. En cuanto a la bioquímica, el estudio de la analítica biológica tuvo, naturalmente, menor importancia como contribución al conocimiento básico pero fue trascendente para el progreso de la profesión bioquímica, como consecuencia de los aportes de Marenzi y sus discípulos.

La contribución del Instituto de Fisiología al adelanto de la medicina argentina se desarrolló entre 1919 -año en que fue creado- y 1943 -cuando Houssay fue separado de su cargo en circunstancias que se recordarán mas adelante. Houssay no alcanzó a cum-

plir algunos de sus propósitos iniciales, pues aspectos importantes de la investigación fisiológica, como la neurofisiología, la nutrición y, por extensión, la farmacología, no prosperaron no obstante la preocupación de Houssay por promover esas disciplinas. Houssay fue un fisiólogo clásico, al estilo de Claude Bernard, que como se ha dicho, fue su inspirador en los años juveniles. Su técnica consistía esencialmente en la extirpación de órganos y su reemplazo por implantes o inyección de extractos. Esa metodología era muy útil para los estudios de fisiología endócrina. Era un cirujano práctico y eficaz, capaz de efectuar operaciones difíciles, como la extirpación de la hipófisis. La metodología utilizada consistía, como se ha dicho, en extirpaciones de órganos, la verificación de las deficiencias producidas y la corrección de las mismas por los factores pertinentes. Todo ello se acompañaba de una meticulosa analítica biológica en la que participaban los químicos y bioquímicos del Instituto, que aplicaban los mejores métodos de su época. Los animales preferidos eran el perro y el sapo *Bufo arenarum* Hensel, que por notable coincidencia tenía las mismas iniciales que Houssay. Gran parte de las investigaciones se realizaron en esa especie, entonces abundante en los alrededores de Buenos Aires, recolectada por cazadores circunstanciales. Perros y sapos se utilizaban también para la enseñanza de la fisiología a los alumnos de medicina, odontología y bioquímica que cursaban la materia en el Instituto.

Houssay atendía cumplidamente tanto sus obligaciones docentes como la investigación y la administración del Instituto. Dictaba el curso a los alumnos de medicina a razón de tres clases teórico-prácticas semanales, durante todo el año. Examinaba en marzo, julio, noviembre y diciembre. Las listas de examen eran a menudo nutridas y a veces los aplazos numerosos, lo que ocasionó algunos incidentes desagradables y una inmerecida fama de severidad. Houssay dictaba sus clases con información actualizada y cuando era factible, presentaba experimentos concordantes con el tema de la clase, tarea difícil ante la posibilidad del fracaso de la demostración. Su preocupación por la enseñanza se exten-

día a la enseñanza práctica y era frecuente que antes de iniciar su trabajo diario recorriera los laboratorios de trabajos prácticos, conversando con ayudantes y alumnos. En varias oportunidades, constituyó comisiones de alumnos seleccionados por antecedentes, denominadas "comisiones especiales", cuya enseñanza práctica asumió personalmente.

Houssay también se preocupó por la enseñanza de posgrado. Dictó cursos oficiales para médicos especialistas, pero su labor fue particularmente útil para los tesisistas y los aspirantes al profesorado, que seguirían la denominada "carrera docente" de la Facultad de Medicina. Entre las obligaciones que estos últimos debían cumplir figuraba la realización de un trabajo experimental. Houssay proponía un tema relacionado con las actividades del instituto, en particular, endocrinología. El trabajo solía consistir en experimentos relativamente sencillos que podría realizar el candidato en base a la información bibliográfica suministrada por Houssay. Esta escuela de posgrado tuvo gran trascendencia y fue particularmente beneficiosa para numerosos clínicos al imbuirlos del rigor inherente al trabajo experimental.

La evolución de la bioquímica durante la década de los años treinta fue creando procedimientos cada vez más complejos y técnicos, especialmente, los métodos de aislamiento y purificación de proteínas aplicables al estudio de las hormonas hipofisarias. La falta de esa metodología demoró durante algunos años el reconocimiento de la acción diabotogénica de la hormona de crecimiento hipofisaria, pues algunos sostenían que la acción de la hipófisis era mediada por los corticoides adrenales. Después de los trabajos de Evans sobre la hormona de crecimiento, se pudo comprobar la corrección del mecanismo propuesto por Houssay.

Organización de la Universidad

Una de las grandes preocupaciones de Houssay fue la Universidad como institución. En una conferencia pronunciada en 1939, dijo: *"La Universidad tiene por función crear los conocimientos, propagarlos y formar los hombres dirigentes de un país. La función prime-*

ra es, pues, la de crear los conocimientos para que luego puedan enseñarse. Los problemas a resolver son y seguirán siendo infinitos, y corresponde su aclaración a la Universidad, como centro superior del conocimiento. Por esas razones la investigación es la característica esencial que distingue a una facultad o escuela o instituto universitario".

"La función social de la Universidad es múltiple. Debe crear y difundir ampliamente los conocimientos cada vez más perfectos que se alcancen por la investigación. Debe preparar profesionales que apliquen, experta y razonadamente, técnicas y métodos útiles a la sociedad, y que sean capaces de seguir atentamente el adelanto de sus profesiones durante toda su vida. Y, sobre todo y ante todo, debe formar los hombres más sobresalientes de la sociedad, por su cultura general y su preparación, su aptitud de comprender, su decisión y capacidad; hombres de acción inteligente, realizadores, pero no impulsivos o intuitivos".

"Sólo el profesor que es un investigador puede tener un juicio propio de lo que enseña, a la vez que capacidad de estimular y dirigir las inteligencias jóvenes ávidas de progreso, conservar la pasión por el estudio y el adelanto científico a través de los años. La enseñanza debe ser individual, activa, objetiva y razonada. Debe desarrollar la aptitud de observar, razonar y comprender por sí mismo. Debe ser guiada de tal modo que el alumno redescubra y comprenda y decida por su propio juicio".

"Está de moda hablar de investigación, pero a menudo no se entiende lo que significa. La prueba de que no se le concede su debida importancia es que son raras las posiciones 'full time' y que se tropieza con toda clase de obstáculos para que la Universidad o el Gobierno aseguren estas posiciones a los investigadores abnegados. No es un principio moral y decente querer tener investigadores por el heroísmo y sacrificio de algunas excepcionales voluntades férreas. Un país previsor no puede vivir de milagros o de santos".

"El futuro científico de un país depende enteramente de que existan posiciones 'full time' para los auxiliares de las cátedras. Es necesario que se formen por un esfuerzo disciplinado, intenso y bien dirigido. No se man-

tendrá un profesorado cada vez mejor si no se establece la dedicación exclusiva de sus principales colaboradores. Antes y después de enviarlos becados al extranjero debe dárseles situación 'full time'".

"A pesar de nuestro intenso esfuerzo, son aún pocas las posiciones 'full time' que existen en nuestras universidades. Hasta hoy no hemos conseguido el esperado apoyo de las autoridades universitarias o gubernativas, que aún no han comprendido debidamente la trascendencia del 'full time'. Y, sin embargo, es un método de eficacia probada en las naciones más avanzadas, y que no necesita sino aplicarse para rendir sus beneficios seguros".

"También los estudiantes debieran tener dedicación exclusiva. A ello tendrá que llegarse en la América del Sur como se ha llegado en otras partes. Desde ya es útil dar becas a los buenos alumnos para que no se distraigan con otras tareas o puestos".

En 1942, la obra de Houssay sobre la diabetes experimental había alcanzado muy alto nivel y había sido reconocida en todo el mundo. Houssay comenzó entonces a preocuparse cada vez más por el adelanto de la ciencia, la enseñanza y la organización de la universidad como necesidades nacionales. Su palabra, se escuchó repetidas veces en los ambientes profesionales y académicos de mayor prestigio. Desde la Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias reclamó enérgica e insistentemente un progreso orgánico y sostenido de todas las disciplinas científicas, mediante el apoyo a los institutos de investigación, la formación de becarios e investigadores y cambios en la Universidad, para asegurar el perfeccionamiento de la investigación y de la enseñanza en todos sus niveles. Pero las instituciones que tanto preocupaban a Houssay no solían constituir los modelos que, a su juicio, el país necesitaba. En su discurso en el Centro Argentino de Ingenieros, en 1943, al referirse a la Universidad, Houssay dijo: "Se va produciendo una paulatina relajación moral y falta de respeto creciente a la justicia, que conviene contener antes que avancen más. Constituye una causa de desmoralización en las Universidades la increíble tolerancia de las faltas graves: plagios, asaltos y hasta delitos comunes". Y a con-

tinuación agregó: *"Las causas más graves de perturbación de nuestras Universidades son el caciquismo, el electoralismo y la demagogia, porque tienden a hacer predominar los intereses personales subalternos sobre los intereses superiores y permanentes de la Universidad, la nación y la sociedad. El caciquismo es un mal clásico en tierras de habla española, en las que es frecuente el sensualismo del mando, que se trata de conquistar por cualquier medio para luego gobernar a capricho, regalando favores aún a expensas de la justicia"*. Años después escribió: *"Es evidente que las Universidades de nuestro país están sometidas a una continua demagogia, ya sea de la izquierda o de la derecha. Esa demagogia, que las corrompe, traba e impide sus progresos fundamentales, es manejada por gente inescrupulosa y poco capaz, por lo cual no puede esperarse que haya progreso"*.

El político y el estadista

En 1943, la Segunda Guerra Mundial tomaba un curso definitivo. Nuestro país era neutral, lo que había creado resentimiento externo y preocupación interna. En junio de ese año asumió un nuevo gobierno. Muchos lo recibieron con la esperanza que rectificaría políticas y moralizaría la administración pública. Sin embargo, meses después, importantes y variados sectores del quehacer nacional consideraron necesaria una gestión directa ante las más altas autoridades para solicitar el retorno a la Constitución y una nueva política exterior. Una comisión constituida por importantes personalidades -Houssay entre ellas- se apersonó al Presidente de la República como intérpretes de una extendida opinión pública. El Presidente manifestó una opinión favorable a cambios supuestamente necesarios, sugiriendo la necesidad de un movimiento de opinión que diera el consenso para las decisiones a adoptar [cartas de Houssay a Lewis (Museo Houssay)]. Pocos días después apareció una declaración suscripta por más de cien ciudadanos notables, entre ellos Houssay, reclamando "solidaridad americana y democracia efectiva". Contrariamente a lo esperado por los gestores de la declaración, los cambios no se pro-

dujeron y los firmantes del manifiesto que ocupaban cargos públicos fueron declarados cesantes (decreto del Poder Ejecutivo del 19 de octubre de 1943).

En la Facultad de Medicina de Buenos Aires, cuatro profesores titulares perdieron sus cátedras: los Dres. Houssay, Mariano Castex, Alejandro Ceballos y Nicolás Romano. En las Facultades de Medicina del Litoral y Córdoba, los Dres. Juan J. Lewis y Oscar Orias, entre otros, fueron separados. La cesantía de los profesores universitarios provocó fuertes reacciones, en primer lugar, en las Universidades afectadas. Pero la mayoría de los profesores universitarios supuso que un acto tan arbitrario debía ser la reacción de un gobierno de facto que se sentía menoscabado en su autoridad, y que, a poco que prevaleciera la sensatez, los cesantes serían repuestos y por lo tanto, era preferible una prudente expectativa para salvaguardar las instituciones. En aquel momento de confusión, Houssay probablemente pensó lo mismo y ante la actitud de su Profesor Adjunto, el Dr. Horacio Rubio, que se negó a hacerse cargo de la Cátedra, Houssay envió una carta al Profesor Titular de Fisiología en la Escuela de Odontología, el Dr. Muñoz, para que se hiciera cargo del Instituto, quien aceptó el interinato transitoriamente.

Sin embargo, las consecuencias del alejamiento de Houssay del Instituto, fueron definitivas. Nunca más el Instituto volvería a lo que había sido bajo su dirección. De esa manera, las Universidades perdieron centros de investigación de gran valor y prestigio, dentro y fuera del país.

Un examen retrospectivo de la cesantía de Houssay y sus colegas, a la luz de informaciones publicadas por historiadores preocupados por las políticas nacionales de aquella época, demuestra que posiblemente, los firmantes del célebre manifiesto de 1943, habían chocado, sin saberlo, con la intención de influentes personajes empeñados en establecer una colaboración recíproca con el gobierno alemán. En ese momento, esos funcionarios decidieron abortar cualquier gestión que involucrara una contradicción a su proyecto. Poco tiempo después, los hechos demostraron que no tenían razón y que lo que habían pedi-

do los profesores cesantes era, justamente, lo que había que hacer.

Tan pronto se supo que Houssay había sido separado de la Cátedra de Fisiología, recibió invitaciones para ocupar cargos de profesor en universidades extranjeras, entre otras, de Estados Unidos, Brasil, Uruguay y Chile. En todos los casos su respuesta fue: *"Deseo trabajar en el país, pues he dedicado mi vida a servirlo y a luchar por su adelanto científico. Solo en el caso de no tener donde trabajar, lo que espero no suceda, o que se me molestara personalmente, lo que me parece absurdo, me vería obligado a aceptar las propuestas ventajosas recibidas del extranjero"*. Empezó inmediatamente dos empresas trascendentes: la redacción de un tratado de Fisiología y la organización de un instituto de investigaciones que habría de llamarse Instituto de Biología y Medicina Experimental. La redacción del libro estaba decidida en el mes de noviembre y la fundación del instituto en diciembre, lo que muestra la energía y la eficiencia de Houssay para enfrentar la nueva situación. El libro, escrito con la colaboración de sus discípulos más destacados, fue un fiel reflejo de las investigaciones fisiológicas de la escuela de Houssay. Tuvo gran éxito, fue traducido a varios idiomas y mereció repetidas ediciones.

El Instituto de Biología y Medicina Experimental se instaló en una casona del barrio de Palermo, ese barrio que alguna vez Borges describió como *"barrio de traspatios, conventillos y corralones, donde la higuera oscurecía sobre el tapial y los balconcitos de modesto destino daban a días iguales"*. Era el barrio de Evaristo Carriego, el autor de las Misas Herejes. La casa donde se instaló el Instituto fue alquilada por la Fundación Sauberan y posteriormente adquirida por la familia Braun Menéndez. Los sueldos de Houssay y sus colegas fueron pagados por la Fundación Sauberan, que desde hacía años financiaba a la Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias. El frente del Instituto daba a la calle Costa Rica; al costado, un jardín en el que se instaló el alojamiento de animales, y al fondo, una modesta casita que fue adquirida por la familia Campomar para el Instituto de Leloir. A Leloir lo acompaña-

ban Cardini, Caputo, Trucco y Paladini.

El Instituto de Biología y Medicina Experimental inició sus actividades en marzo de 1944. Cuando Houssay fue reincorporado a la Facultad en febrero de 1945 (expediente U-560/945), se pensó en el cierre del Instituto, pero muy sabiamente se lo mantuvo bajo la dirección de Braun Menéndez. En 1946 Houssay volvió a dirigir el Instituto, hasta su muerte. En 1957 el Instituto se mudó a su actual sede en el barrio de Belgrano. El primer edificio, lo mismo que su vecino instituto Campomar, fueron demolidos. En aquellos años, el Instituto de Biología y Medicina Experimental albergó a los profesores cesantes con Houssay -Juan T. Lewis y Oscar Orías- y a los renunciados Eduardo Braun Menéndez, Virgilio Foglia y Carlos Martínez. Se constituyó rápidamente en un centro de reputación internacional al que concurrieron fisiólogos de Suecia (von Euler), Brasil (Chagas), Chile, etc. Allí recibió Houssay, en 1947, la noticia del otorgamiento del Premio Nobel en Medicina.

En los últimos meses de 1944 se rumoreó una posible amnistía a los sancionados por el manifiesto "Democracia Efectiva y Solidaridad Americana", si lo solicitaban. El pensamiento de Houssay fue entonces terminante: *"No necesitamos ni queremos amnistías o perdones ya que entendemos no haber incurrido en faltas ni haber agravado, puesto que el manifiesto reflejaba opiniones de los firmantes, amparados por derechos constitucionales. Nuestra intención era buscar la unidad de los argentinos"* [carta a Lewis (Museo Houssay)]. En febrero de 1945, los profesores fueron repuestos en sus cargos sin que mediara gestión alguna de su parte. Un episodio revelador de los principios éticos de Houssay fue su actitud respecto a los sueldos no percibidos durante su cesantía. Invitado a suscribir un pedido de reintegro, sin duda justo, contestó: *"Me opongo completamente a toda reclamación de sueldos al gobierno. En ningún caso firmaré eso. En mi país donde la difamación es una institución fundamental, se nos llenaría de todo con los comentarios alrededor de este asunto. Por otra parte, no aceptaré pagos por tareas que no he desempeñado y si se me acordase ese dinero lo destinaría a alguna obra benéfica de carácter científico. Me*

parece deplorable y equivocada la idea de hacer ese pedido" [carta a Lewis (Museo Houssay)].

Sin embargo, en 1946, el curso de la política nacional resultaría adverso a Houssay. En marzo de ese año, le escribió a Lewis y le dijo: "Tendremos días difíciles, pero los hombres de ciencia estamos acostumbrados a vivir en dificultades incesantes. Seguiremos cumpliendo dignamente con nuestro deber". El 6 de septiembre de ese año fue jubilado de oficio (decreto PE-7966), en base a un decreto que dejó sin efecto la disposición del Estatuto Universitario que autorizaba el ejercicio de la Cátedra hasta los 65 años de edad. Houssay tenía entonces 59 años.

La emigración de científicos

Con la creación de becas para estudios en el extranjero, primero por la Universidad de Buenos Aires y después por la Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias; durante los años treinta, muchos universitarios pudieron completar con provecho su formación en el exterior. El otorgamiento de esas becas implicó siempre el compromiso de regresar al país y desarrollar en él una labor acorde con un legítimo afán de perfeccionamiento social. Sin embargo, a partir de 1943, numerosos investigadores argentinos optaron por emigrar. Un caso particular fue el de un farmacólogo rosarino, que después de una beca de la Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias, decidió radicarse en Estados Unidos. Enterado, Houssay le escribió en los siguientes términos:

Estimado doctor:

"El hecho de que usted abandone su país para volver a los Estados Unidos significa una pérdida grande para nosotros y una ganancia simple para los Estados Unidos, pues ese país dispone de muchos hombres bien adiestrados. Usted ha sido formado con solicitud paternal por sus maestros, quienes experimentarán ahora con certeza un choque semejante al que se sufre cuando un hijo va a la guerra o está enfermo de gravedad".

"Usted habrá oído hablar de la lucha terrible que debió y debe llevarse a cabo para

desarrollar la ciencia en la Argentina. Antes todo era muchísimo más difícil que ahora, y sin embargo, luchando se consiguió lo que existe y lo que se hace para nuestro porvenir".

"Para nuestra Asociación (la Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias) su idea es un contraste, pues nosotros no enviamos a los becarios para su simple progreso personal, sino para que a su vuelta propulsen en nuestro país el adelanto científico en el campo de la investigación y la docencia y para que formen escuelas o núcleos de trabajo. En este terreno es bien visible que usted no ha podido aún cumplir con lo que esperaba la Asociación y la Facultad, la cual ha hecho para usted algo excepcional aunque justo, o sea concederle un sueldo durante su licencia en el extranjero".

"Es indudable que nuestras Facultades están obligadas a organizar la investigación científica y a mantenerla, y es cierto que aún no comprenden debidamente su deber en el mundo moderno. Pero ya hay en ellas profesores full time y en principio se ha resuelto establecerlo para los asistentes y se comienza a llevarlo a cabo".

"El único argumento que no puede discutírsele a usted es que tiene derecho a mejorar su situación económica. Comprendo sus dudas como jefe de familia, pues tuve el mismo caso. Cuando me casé ganaba 980 pesos y debía mis muebles; con ese sueldo sostuve a mi casa, mi esposa, mi madre, 3 hermanas y 1 sobrina: éramos 7. Mi esposa decidió que debíamos mantener además la suscripción a las principales revistas de Fisiología y me estimuló a que en ningún caso abandonara la carrera exclusiva de la investigación, y a que no dejara de luchar por el adelanto de mi país".

"La ciencia no tiene patria, pero el hombre de ciencia la tiene. Por mi parte no acepté posiciones de profesor en los Estados Unidos y no pienso dejar a mi país, porque aspiro a luchar para contribuir a que llegue alguna vez a ser una potencia científica de primera clase".

"Ojalá que usted vuelva y halle las posibilidades que merece, siempre que su espíritu conserve el fervor por la ciencia y por su país, el optimismo y el entusiasmo necesarios, pues sin ellos se va a la burocracia técnica co-

rriente en nuestras facultades".

"No hay derecho a explotar el sacrificio de los hombres de ciencia, ni a pedirles un heroísmo extrahumano, ni a que sacrifiquen a su hogar y a sus futuros hijos. Nadie puede criticar ni aun discutir su derecho de variar de rumbo. Pero al perderlo a usted, aunque sea transitoriamente, es un terrible dolor para sus padres espirituales y los que luchan por llevar a la ciencia en nuestro país a un nivel decoroso y necesario para esclarecer las mentes, dar bienestar a los habitantes y vigorizar a la potencia nacional".

"Le deseo el mayor éxito en su carrera. Ojalá que usted haya acertado y que pueda volver pronto, hallar las satisfacciones personales a que aspira, y a la vez servir a su patria".

"Mis respetos a su señora y reciba un amistoso saludo de B.A. Houssay".

Esa carta fue escrita en abril de 1943, cuando Houssay era Presidente de la Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias. Revela dos aspectos singulares de la personalidad de Houssay. Los primeros párrafos muestra disgusto y enérgica censura a una conducta que habría defraudado las esperanzas puestas en el becario por sus maestros y por la Asociación que otorgó la beca. Los últimos párrafos constituyen, sin embargo, una visión sincera de las dificultades existentes en el país para realizar una carrera científica exitosa. Al mismo tiempo, expresa comprensión y respeto por los intereses y las aspiraciones del becario. Houssay reconoce que no es lícito exigir sacrificios extremos a quienes, por sus aptitudes y capacidades eligen otros ambientes, con mayores posibilidades de trabajo y reconocimiento a sus méritos.

Cincuenta años después de lo ocurrido con el becario de la Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias, parecen oportunas algunas reflexiones. La primera es que en abril de 1943, Houssay juzgaba con ingenuo optimismo el futuro de la ciencia en la República Argentina, pues el mismo estaba en vísperas de acontecimientos en los que sería el primer damnificado. La segunda reflexión, válida para lo ocurrido en los años posteriores, es que la incertidumbre que se

manifestaba en la década del cuarenta, continuó y se ha exacerbado en los años posteriores, salvo breves y excepcionales períodos. A partir de la década del cuarenta, las perspectivas académicas y económicas comenzaron a sufrir los embates del devenir político, lo que ha constituido un factor de incertidumbre para muchos médicos y científicos que debían retornar a nuestras instituciones académicas. Ello indujo a algunos a no regresar y a establecerse en el extranjero, especialmente en Estados Unidos y en los países europeos. De esa manera se creó una corriente emigratoria que continuó a través de los años y que determinó la salida del país de millares de profesionales, con la consiguiente pérdida de valores intelectuales, económicos y afectivos.

Houssay y el CONICET

Houssay retornó a la Facultad de Medicina en octubre de 1955, como Profesor Titular y Director del Instituto de Fisiología, sin obligaciones docentes. A pesar de ello, en 1956 dictó 15 clases, debidamente anotadas en las planillas reglamentarias, prueba de su inextinguible sentido de responsabilidad universitaria. Teniendo discípulos sobresalientes dispuestos a continuar su obra, en 1957 se alejó definitivamente de la Facultad. En 1958 presidió el Congreso Internacional de Ciencias Fisiológicas, a cuya organización dedicó ingentes esfuerzos y que fue en realidad un homenaje de la fisiología mundial a su persona.

La vocación de estadista de Houssay tuvo su máxima expresión con la creación del CONICET. La creación de la Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias constituyó una valiosa primera experiencia para proponer una institución que con recursos adecuados pudiera realizar a nivel nacional lo que la Asociación había realizado en modesta escala.

En 1956, la Presidencia provisional de la Nación realizó una encuesta entre universidades e instituciones científicas del país para conocer la diversas inquietudes y necesidades del medio científico. En su respuesta, la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales hizo las siguientes consideracio-

nes:

"La Academia está hondamente preocupada por la escasez creciente de hombres de ciencia y de técnicos de gran competencia, así como por el pequeño número de jóvenes dedicados a la carrera científica, por no encontrar incentivos y condiciones favorables. La investigación científica en las ciencias puras como en las aplicadas no ha alcanzado el nivel ni la intensidad que requieren el momento del mundo y las necesidades mismas del país, que ha progresado más en otras actividades. Esto se ha agravado mucho en los pasados años por la declinación del interés oficial en tales asuntos, así como por el cambio profundo ocurrido en el país en todos los órdenes. La investigación fundamental que, en busca de la verdad, encuentra y perfecciona nuevos conocimientos, es la fuente del adelanto de las ciencias aplicadas y de la tecnología, tanto industrial como agrícola y ganadera. Se puede decir que el bienestar, la salud, la producción, la riqueza, el poder, la cultura y la defensa nacional dependen de nuestro grado de adelanto científico y eficiencia técnica".

"A los efectos de promover el progreso científico y técnico, la Academia aconseja la adopción de providencias las que deberán estar respaldadas por la legislación básica y por las demás medidas que garanticen su efectividad y permanencia, sin olvidar que ellas deberán también asegurar la exaltación del sentimiento de solidaridad".

"Crear un Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, dirigido por hombres de ciencia competentes, el cual deberá promover la investigación original y ayudar a los investigadores capaces y productivos mediante la ayuda material por subsidios, elementos de trabajo, becas y todo otro recurso que asegure el éxito de su función. Este Consejo no ha de tener funciones burocráticas sino en la medida estrictamente necesaria, y no debe concentrar ni dirigir la labor científico de todas las instituciones, públicas o privadas, sino contribuir al desarrollo de los estudios en curso, con el mínimo de intervención. Promoverá por todos los medios el progreso de la investigación científica y técnica induciendo la incorporación de nuevos investiga-

dores a los grupos existentes, facilitando la extensión de los estudios a nuevos campos y asegurando la formación y el perfeccionamiento intensivo del mayor número posible de jóvenes investigadores".

"Las Universidades, así como las reparticiones oficiales que se ocupen de problemas científicos, deben promover por todos los medios la elevación del nivel de las investigaciones científicas que en ellas se realicen. Asegurarán, por medio de una remuneración adecuada, que los investigadores que realizan tales estudios puedan dedicarse a ellos con exclusión de otras actividades. Las personas que desempeñen tales cargos de investigadores serán elegidos por su capacidad creadora y su competencia, y los conservarán por la continuidad y valor de su obra. Sería aconsejable crear una categoría de funcionario de una carrera de investigador científico".

La solicitud de la Academia no fue en vano. Tras estudios y ajustes para poner de acuerdo a las opiniones de otras instituciones, la esencia del proyecto de la Academia se conservó en el decreto Ley N° 1.291 del 5 de febrero de 1958, por el cual se creó el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). El primer directorio fue presidido por Houssay y de él formaban parte los académicos Deulofeu, Braun Menéndez, Leloir, Parodi y Sagastume Berra. Otras personalidades completaron el directorio hasta el número de quince, entre ellas, un representante del Poder Ejecutivo Nacional.

El directorio se renovaba anualmente por tercios. Los directores duraban tres años en el cargo, podían ser renovados una sola vez y desempeñaban sus funciones honorariamente. La designación de los nuevos directores era facultad del Consejo, que proponía para su designación por el Poder Ejecutivo Nacional, un candidato para cada cargo vacante, previa consulta a las entidades representativas: academias, universidades, sociedades científicas, etc.

Con esta estructura el Consejo realizó la meritoria obra científica que caracterizó sus primeros años de vida: otorgó subsidios y becas internas y externas; creó la carrera del Investigador Científico y Tecnológico, tres ins-

titutos (Radioastronomía, Radiación Cósmica y Geocronología); y promovió cursos de capacitación para profesores en ciencias, entre otras realizaciones. Esa obra se cumplió con eficiencia apoyando todas las iniciativas valederas, pero con austeridad y prudencia, al punto que, durante los primeros años de su existencia, no utilizó la totalidad de los fondos otorgados por el gobierno nacional.

Houssay presidió el Consejo según las pautas anotadas a pesar de las graves circunstancias políticas que afectaron profundamente a las instituciones argentinas. Dirigió el Consejo con la colaboración y el control del directorio, de las Comisiones Asesoras nacionales y regionales, de la Junta de Calificación de la Carrera del Investigador Científico y de comisiones especiales adecuadas a las circunstancias. Las Comisiones Asesoras fueron instrumento fundamental para la administración del Consejo. Integradas por investigadores en plena actividad, constituyeron mecanismos efectivos e imparciales de todos los asuntos sometidos a su consideración: becas, subsidios, ingresos a la carrera. Por el origen, el número y la renovación periódica de sus miembros, constituyeron el mejor nexo entre el directorio y la comunidad científica argentina, y por el carácter abierto de sus deliberaciones, el Consejo aseguró la transparencia de sus actos. Houssay debió en muchas oportunidades soslayar las inevitables presiones de los personajes influyentes de turno, con la firmeza y la discreción que lo caracterizaban y con el apoyo de todos los organismos asesores del Consejo.

Como era previsible, la independencia del Consejo no pudo mantenerse indefinidamente. En 1966, el gobierno nacional creó la Secretaría de Ciencia y Tecnología, un organismo destinado a ordenar y planificar la investigación científica en nuestro país. Desde su creación, el Consejo había sido dependencia directa de la Presidencia de la Nación. Su dependencia de la Secretaría creaba una relación que por algún tiempo fue ambigua, pero que de todas maneras significó una pérdida de autoridad para el Consejo. La ingerencia directa de las autoridades nacionales en el Consejo tuvo una expresión más categórica cuando en 1967, el Poder Ejecutivo re-

chazó la propuesta del Directorio de cinco nombres para reemplazar a los que estatutariamente cesaban. Entre los propuestos figuraba Leloir. El rechazo se fundó en la conveniencia de recibir ternas para cada cargo vacante lo que motivó una negociación que culminó con el envío de las ternas que incluían los nombres rechazados previamente. Se designó sólo a uno de ellos, quedando excluido, entre otros, Leloir. Por otra parte, la situación política del Consejo se complicó por episodios que afectaron a las universidades, cuyo personal figuraba, en muchos casos, en la carrera del investigador científico. Houssay tuvo entonces varias alternativas, una de ellas mantenerse como Presidente del Consejo con la esperanza de que su prestigio prevendría acciones perjudiciales para la ciencia en nuestro país. Esa política estuvo seguramente inspirada por su experiencia en la función pública.

En 1967, con motivo de cumplir 80 años, se realizó un homenaje en el que pronunció un discurso memorable, en cierta manera, una síntesis final de las ideas que habían guiado su vida. En esa oportunidad dijo: *"No apruebo que se realice un acto de homenaje por cumplir 80 años u otra edad. La obra humana debe ser ininterrumpida durante toda la vida, hasta que la detenga la muerte. Cada hombre debe trabajar continuamente para sí y sus semejantes, mientras que lo permitan su salud física y mental. Cambiará en parte sus tareas cuando lo aconseje la edad, pues no debe bloquear los puestos y promoverá la llegada continua de hombres más jóvenes y de nuevas ideas de progreso. No considero un ideal humano aconsejable al querer jubilarse para ser inactivo, lo que daña el cuerpo y el alma y a la sociedad. Siempre he creído que un fisiólogo auténtico debe experimentar, pensar, leer e intercambiar ideas todos los días, sin excluir ninguno de ellos. Trabajar en algo que interesa o apasiona es un placer, es una de las felicidades humanas más grandes. El trabajo es la diversión más barata y permite ser útil a sus semejantes"*.

Houssay falleció en 1971. La Proviencia quiso evitarle lo que vendría después. Dijo una vez Borges que los hombres viven en tanto vivan sus amigos. Houssay dejó amigos

y discípulos entrañables, que lo recuerdan con afecto y orgullo. Por ello, Bernardo A. Houssay todavía vive.

Literatura consultada

Correspondencia personal del Dr. B.A. Houssay. Museo Houssay, Buenos Aires.

B.A. Houssay. Antecedentes, títulos y trabajos. Presentado para optar a la cátedra de Fisiología de la Facultad de Medicina de la Universidad de Buenos Aires. Talleres gráficos A. Flaiban, 1919.

Instituto de Fisiología de la Facultad de Medicina. Lista de trabajos realizados durante el período 1919-1939. Imprenta y casa editora. Buenos Aires, 1941.

V.G. Foglia y V. Deulofeu. Bernardo A. Houssay. Su vida y su obra. Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Buenos Aires, 1981.

A. Barrios Medina y A.C. Paladini. Escritos y Discursos del Dr. Bernardo A. Houssay. Editorial Universitaria de Buenos Aires. Buenos Aires, 1989.

M.A. De Marco. Houssay, La Argentina de los Sabios. Fundación Libertad. Rosario, 1997.

A. Barrios Medina. El conocimiento de la acción fisiológica de la hipófisis por el Dr. Bernardo A. Houssay: 1907-1936. Instituto de Humanidades Médicas, 1982.

B.A. Houssay. La Fisiología y la Medicina de Descartes. Universidad de Buenos Aires, Instituto de Filosofía, 1937.

B.A. Houssay. Recuerdos de un profesor y consideraciones sobre la investigación. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía y Veterinaria, 1939.

B.A. Houssay. Concepto de la Universidad. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza, 1939.

B.A. Houssay. Obra realizada. Principios que la guiaron: enseñanza, investigación, medicina. Conferencia pronunciada en la Facultad de Medicina de la Universidad de Buenos Aires con motivo de su retiro de la cátedra de Fisiología. Archivo de la Facultad de Medicina, 1958.

Obstáculos y estímulos a la investigación científica. Academia Nacional de Letras. Buenos Aires, 1960.

B.A. Houssay. Ciencia y Técnica unidas en su desarrollo e investigación. Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Buenos Aires, 1968.

A.O.M. Stoppani. Bernardo A. Houssay y el desarrollo de la investigación científica en la Argentina. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Buenos Aires, 1981.

Manuscrito recibido y aceptado en diciembre de 2000.

REGIÓN MINERA TRASLASIERRA, PROVINCIA DE CÓRDOBA

Hugo G. L. Bassi

Geólogo de minas. Consultor. Recibió el premio "Eduardo L. Holmberg", trienio 1986-1988, de esta Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Resumen

La Región Minera Traslasierra ocupa un extenso territorio ubicado al noroeste de la provincia de Córdoba. Está compuesto por metamorfitas cámbricas intruídas por dos importantes generaciones granitoides, una del Cámbrico y la otra del Devónico, además de un evento volcánico terciario, similar al de la región sur de la provincia de San Luis. Los ciclos metalogénéticos que dieron lugar a la minería de la región fueron el hipotermal Pámpico, ligado a los intrusivos graníticos antiguos, representado esencialmente por wolframio (incluyendo bismuto) y el Andico, consecuencia del volcanismo terciario y representado por plomo, plata, oro, zinc, cobre, fluor, bario y manganeso, destacándose, de este último, plomo, plata y oro. La región presenta cuatro agrupaciones wolframíferas con 52 minas conocidas; cinco plumboargentíferas con 88 minas y tres alineamientos auríferos con 20 minas. El presente trabajo trata de las relaciones tectogénicas de las distintas agrupaciones metalíferas y descripciones someras de sus yacimientos principales. Además, y como aporte a la prospección minera regional y en el marco de transferencia tecnológica, señala tres nuevos alineamientos con posibilidad de yacimientos auríferos de tipo diseminado.

Palabras clave: Mina metalífera; Córdoba occidental.

Abstract

Traslasierra Mining Region, Córdoba province. The Traslasierra Mining Region situated to the NW of Córdoba province is composed of Cambrian metamorphics intruded by two important generation of granitoids: Cambrian and Devonian, and a Tertiary volcanic event similar to the area south of the San Luis province. The metallogenetic cycles developing the prevailing mining of the area are the hypothermal Pampic related to the older intrusive granite represented essentially by wolframium (including bismuth), and the Andic as a consequence of the Tertiary volcanism represented by the lead, gold, zinc, copper, fluorine, barium and manganese; lead, silver and gold are the most important. Four groups of wolframium districts with 52 known mines are represented in the area; five lead-silver with 88 mines and three gold alignments with 20 mines. The present study deals with the tectogenetic relationships of the various metaliferous groups and with brief descriptions of the principal mines. Furthermore three new alignments with possible disseminated gold ores are suggested as a contribution to the regional prospection of this area.

Key words: Metaliferous mining; Western Córdoba.

Introducción

La Región Traslasierra es el territorio de la provincia de Córdoba ubicado al oeste de Los Gigantes, entre las ciudades de Cruz del Eje al norte, hasta Villa Dolores al sur. Contiene una de las más interesantes e importantes áreas mineras del centro del país; tanto por su variedad metalífera ligada a particulares eventos geológicos, como por la cantidad de yacimientos y su distribución uniforme en unos 2000 km², además de su tradición minera puesto que cuenta con varios depósitos beneficiados históricamente antes que muchas otras minas del país.

Numerosos autores se han ocupado de ellos desde mediados del siglo pasado y a menudo las descripciones originales, hechas generalmente por inspectores mineros contemporáneos a las explotaciones y reproducidas por publicaciones posteriores, datan de esa época. La mayoría de los relatores de este siglo repiten las descripciones de aquéllos, arrastrando errores como son, en especial, la ubicación geográfica exacta de los depósitos.

Lamentablemente, al presente, el acceso a la mayoría de los yacimientos está dificultada por la abundante vegetación, no frecuente en épocas pasadas y también por el desconocimiento de su ubicación y aun de su existencia por los pobladores actuales.

Previendo un eventual futuro renacer del interés minero en los metales de la región y antes que desaparezca todo rastro de la mayor parte de sus yacimientos, sería de interés que las autoridades mineras dispongan un programa de reubicación de los mismos con métodos satelitales. Es de notar que incluso, sus ubicaciones en las planchetas legales, a menudo son solo aproximadas.

Uno de los inesperados resultados de la presente síntesis es haber comprobado la importancia del Macizo San Carlos, tanto en la distribución de los yacimientos de las metalogías cámbrica y terciaria como en la identificación de guías orientadas a la prospección de depósitos auríferos diseminados.

Se ratifica aquí la asignación de los yacimientos de wolframio-bismuto a la metalogía Pámpica y los de la paragénesis Pb, Ag, Au, Cu, Zn, F, Ba y Mn a la Andica,

eximiendo al magmatismo devónico de toda conexión con tales metales. También se reafirma el concepto de superposición de metalogías, propuesto por Bassi [1996] y observado en prácticamente el total de los depósitos de la región.

El presente trabajo fue finalizado en diciembre de 1998.

Marco geológico regional

Las grandes unidades geológicas que conforman la Región Traslasierra son esencialmente metamorfitas, intrusivos granitoides y efusivas andesítico-traquíticas.

Las metamorfitas [Lucero, 1995] oscilan entre filitas, representadas por reducidos asomos, cuarcitas micáceas, también poco extendidas, esquistos micáceos (más o menos inyectados), gneises esquistosos y masivos y migmatitas. Además, muy subordinados, calizas cristalinas y anfibolitas (Figura 1).

Olsacher [1960] delimitó en la Región Traslasierra un importante cuerpo que cubre cerca de un 50% de la hoja 20h, identificándolo litológicamente como gneis migmatítico; posteriormente Lucero [1981] extendió dicha unidad a la hoja 19h clasificando a la roca como gneis tonalítico inyectado. En ese cuerpo de casi 1000 km² de superficie, que Gordillo y Lencinas [1979] lo denominaron Macizo San Carlos, ya Bodenbender [1905] y Beder [1922], observaron el aspecto granitoide de su litología, al punto que Sterlzner y Pastore lo clasificaron como un gneis granítico, similar al que bordea por el este al Morro de San Luis. En efecto, el mismo no presenta prácticamente evidencias de esquistosidad, diferenciándose notoriamente de las cajas esquistosas que lo rodean.

Viendo el mapa de Olsacher [1960] llama la atención la carencia total, dentro de dicho cuerpo, de filones pegmatíticos y lentes de caliza, los que en cambio abundan en su periferia y que, además, cambian de rumbos según los contactos que acompañan; así en sus bordes norte y sur sus direcciones oscilan en E-O, con tendencia a ONO, mientras que en los bordes este y oeste son aproximadamente norte-sur, acompañando al rumbo general de la esquistosidad regional.

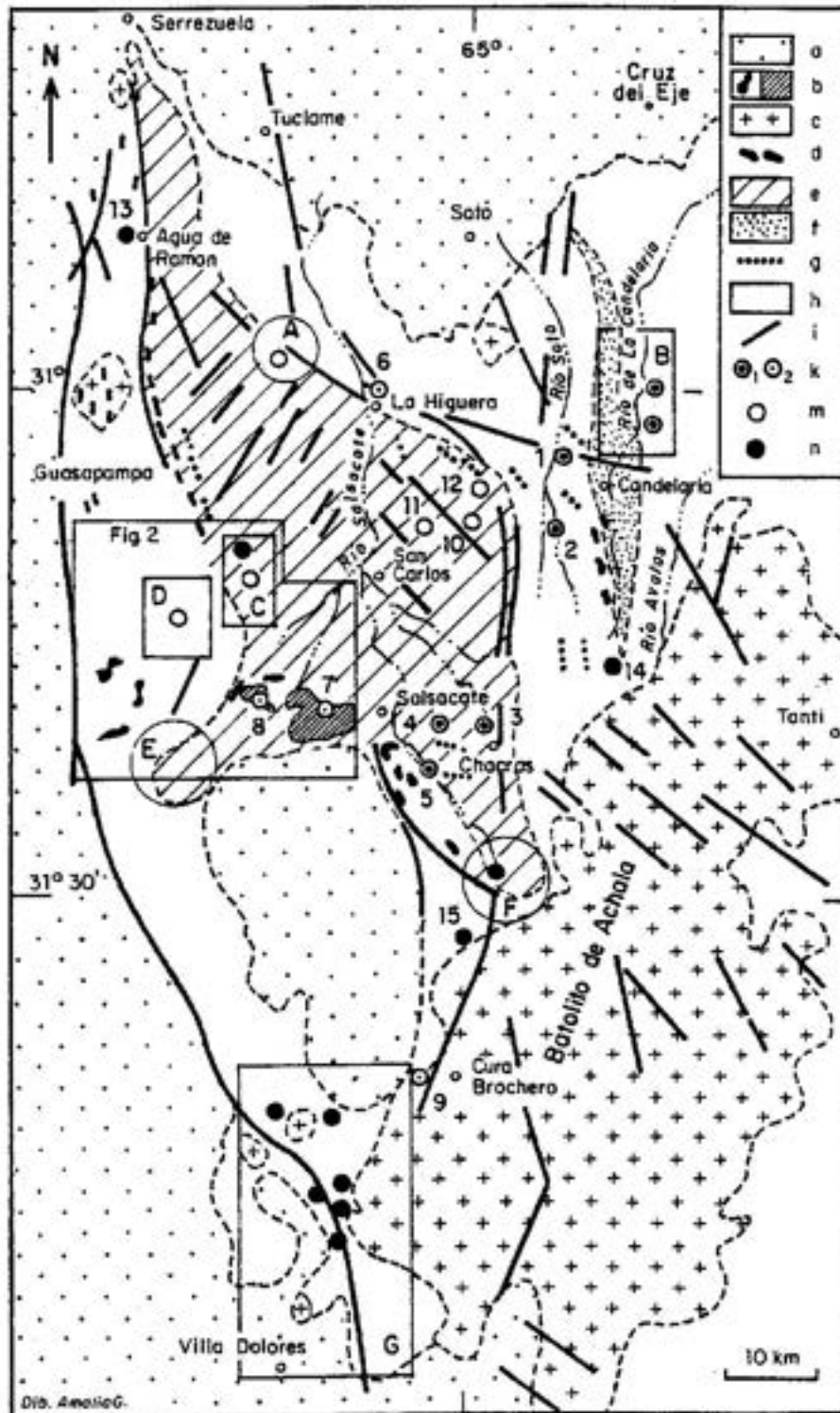


Fig. 1. Mapa* de la Región Minera Traslasierra. a cubierta aluvial; b volcanitas (en Figura 2); c granito; d pegmatitas; e migmatitas; f cuarcitas; g calizas; h metamorfitas; i fracturas. *Distritos mineros*: A El Guaico (Pb, Ag, Zn, etc.); B Candelaria (Au); C Ojo de Agua (Pb, Ag, Zn y W); D La Argentina (Pb, Ag, Zn); E Las Palmas (Fe y pegmatitas); F Ambul (W); G Ciénaga de Allende (W). *Minas*: (k_1) Oro 1 El Tigre-Sta. María, 2 San Ignacio, 3 Río Hondo, 4 Cuchiyaco, 5 Diana; (m) Plomo, Plata, Zn 10 Colón, 11 San Agustín, 12 Niño Dios; (n) Wolframio 13 Agua de Ramón, 14 El Quito, 15 María Alicia; (k_2) Oro disseminado (anomalías en ppb) 6 Cerrito de la Cruz, 7 Pozo de Piedra, 8 Alto de la Cruz, 9 Cuesta de Brochero. *Parcialmente apoyado en: Olsacher [1960 y 1972]; Lucero y Olsacher [1981] y Lucero [1995].

En la caja sur del cuerpo migmatítico, que pasa aproximadamente en el límite norte de la Pampa de Pocho, al este y en las localidades de Sagrada Familia y Las Chacras, la esquistosidad E-O está acompañada en su rumbo por potentes cuerpos de caliza y numerosas vetas de wólfram. Estas últimas, aún manteniendo esa dirección, presentan variaciones en sus buzamientos según su proximidad al cuerpo migmatítico (Figura 5, distrito Ambul).

En la mina Unión las vetas en esquistos son concordantes, buzando 30° Norte; pero hacia el norte, próximo al pasaje de esquistos a una banda migmatítica de engrane, inclinan 45° y son discordantes con la esquistosidad [Bassi y Terrero, 1957]. Más al norte y próximo al cuerpo migmatítico principal, el buzamiento es vertical (mina Santuzza) e incluso en la mina Arauco inclinan hacia el sur [Bassi y Terrero, 1954].

Al oeste del borde sur del cuerpo y en las proximidades de Las Palmas la esquistosidad es también E-O pero buzando al sur y está acompañada estructuralmente por lentes de pegmatita, cuerpos de anfibolita [mapa de Olsacher] y manifestaciones ferríferas [Bassi y Valvano, 1948].

El borde sur del cuerpo migmatítico constituye además el borde austral de las manifestaciones volcánicas de Pocho. En una prolongación teórica de dicho borde hacia el este, éste coincide con el adelgazamiento anormal del batolito de Achala [mapa 1:500.000, Lucero, 1995], lo cual lo señala como partícipe de un fracturamiento de cierta envergadura, probablemente de carácter cortical, relacionado al oeste con las efusiones volcánicas andesíticas. Olsacher [1960] interpretó a los bordes norte y sur del Macizo San Carlos como contactos tectónicos; incluso describió efectos de milonitización y aportes metasomáticos. Al norte del macizo, en Ojo de Agua, 5 km al sur de La Higuera, ese autor señala la presencia de diópsido, producida por acción de soluciones silíceas en calizas dolomíticas; también poco al norte de dicho pueblo se encuentran metamorfitas milonitizadas que presentan abundante impregnación ferruginosa, con evidencias auríferas, formando parte del fracturamiento activo reconocido por Sureda [1978]

en el distrito plumbífero El Guaico. Fracturamiento que hacia el este está representado por la veta aurífera de la mina El Tigre y la elongación del cuerpo granodiorítico de Cruz de Caña.

Al sur del macizo, en Sagrada Familia, las calizas adoptan el rumbo E-O, anormal para la región, mostrando además en la cantera Las Rozas, brechas con calcita secundaria [Olsacher, 1960]. El borde oeste del macizo coincide con la falla Guasapampa presentando, en líneas generales, isoorientación de los cuerpos de calizas según esa dirección, además del control de las estructuras mineralizadas, tanto las de W-Bi como las de Pb, Ag, Au, etc. Este borde, en las proximidades de Ojo de Agua, muestra impregnación ferruginosa, la que constituye uno de los objetivos de posibilidades mineras de oro diseminado. Hacia el sur de Ojo de Agua el borde está enmascarado por las tobas del complejo volcánico, desplazándose hacia el oeste y reapareciendo en el distrito Las Palmas (Figura 2). El borde oriental del Macizo es menos definido que los otros; su rumbo es submeridional, coincidente con la esquistosidad regional y está dado prácticamente por la elevación Cumbres de Gaspar.

La génesis del cuerpo migmatítico es aún dudosa. Gordillo [1979] detectó cordierita en la mayor parte de sus rocas. En 1984 lo describe como un cuerpo anatético integrado por migmatitas cordierítico-granatíferas, producto de un metamorfismo regional, bajo condiciones especiales de temperatura (700-750° C) y presiones equivalentes a 20 km de profundidad. En otras partes de Córdoba las manifestaciones de cordierita están localizadas en franjas restringidas, como las del Diquecito o la de Atos Pampa [Gordillo y Lencinas, 1979] e incluso ubicadas en algunos sectores adosados al borde oriental del Batolito de Achala. Tales franjas son de anchos limitados y en todo caso asimilables a un fracturamiento submeridional, asociado a ascenso de fluidos productores de minerales de metasomatismo de alta temperatura. De acuerdo a Quartino et al. [1981], el factor calor y la proximidad de manifestaciones plutónicas han sido los desencadenantes genéticos del total de las cordieritas registra-

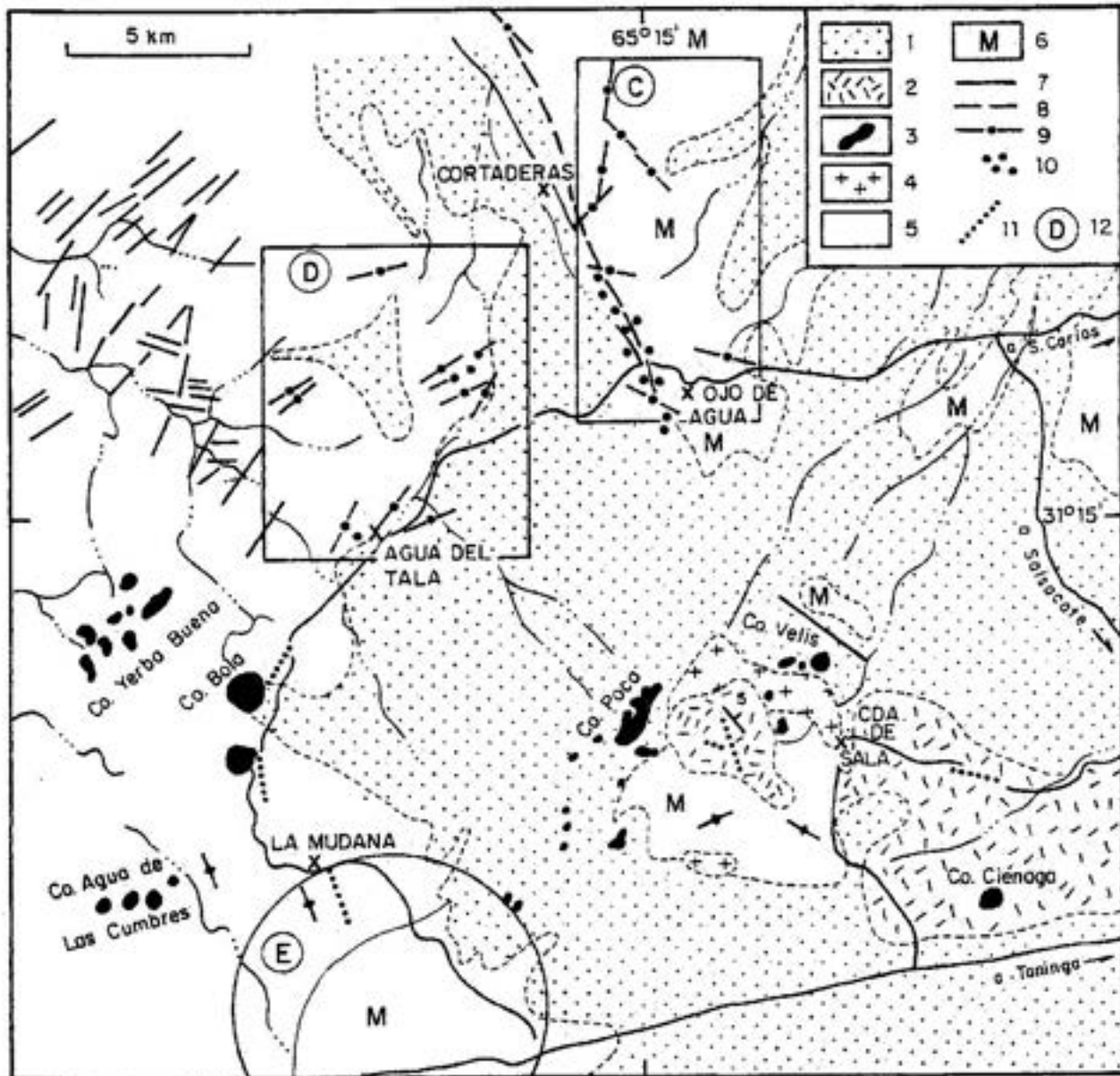


Fig. 2. Croquis* geológico-minero del área Sierra Norte de Pocho. 1 relleno eluvio-aluvial (incluye tobas y travertino); 2 andesita (coladas); 3 andesita (chimeneas); 4 granito; 5 micacitas; 6 migmatita; 7 fallas (detectadas en fotogramas); 8 falla Guasapampa; 9 mina con rumbo de veta; 10 alteración hidrotermal diseminada; 11 alteración hidrotermal lineal; 12 distritos mineros (C Ojo de Agua; D La Argentina; E Las Palmas). *Apoyado en fotografía aérea.

das en la República Argentina.

El macizo San Carlos presenta una roca con fuerte aspecto granitoide. En su parte central no hay pegmatitas ni cuerpos de calizas. Sus migmatitas son predominantemente de composición tonalítica [Gordillo y Lencinas, 1979] con leucosoma cuarzofeldespático. Y precisamente en los alrededores de

Cruz del Eje aflora una sucesión plutónica granito-granodiorita que puede extenderse a tonalita y cuyo promedio de edad es de 550 Ma. [Linares y González, 1990]. La edad de las migmatitas del macizo San Carlos, determinadas sobre muestras de El Guaico y Pocho dieron 540 Ma., similar a la del plutón de Cruz del Eje. Nuevas investigaciones [Rape-

la et al., 1998] homologan las edades de las metamorfitas y del granito antiguo. Por lo que aquí se postula que genéticamente el Macizo San Carlos corresponde a la caperuza de un intrusivo subyacente (granito antiguo) que produjo la migmatización de las metamorfitas de caja, con aporte cuarzo-feldespático y digestión de los cuerpos de caliza preexistentes; siendo la cordierita, tan profusamente distribuida, un producto de metamorfismo de contacto.

De cualquier manera, sea un bloque metamórfico profundo [Gordillo, 1984] elevado 20 km a través de la corteza o un intrusivo con caperuza migmatítica, está limitado por fracturas discordantes en la mayor parte de sus bordes norte, oeste y sur, influyendo a través de ellas en las metalogías cámbrica y terciaria. Es de notar que en la parte central del macizo no se encuentran yacimientos minerales como tampoco cuerpos de calizas y pegmatitas, conjunto que sólo aparece en su periferia.

Respecto de los granitos de la región, Olsacher [1960] los consideró, en su totalidad, como de edad devónica. Posteriormente, Lucero y Olsacher [1981] les asignan una edad oscilante entre Cámbrico y Devónico. El catálogo de edades radiométricas de Linares y González [1990] señala un granito de Cruz del Eje con edad 526 Ma. \pm 30; para un granito de la Pampa de Achala determina, en cambio, 399 Ma. \pm 25. Rapela et al. [1998] ratifican la existencia de dos eventos magmáticos granitoides siendo el primero, de magnitud menor, consecuencia de la orogénia pampiana, con edad del orden de 530 Ma. y el segundo postorogénico con 360 Ma., expresado por grandes batolitos. El primero, Cámbrico Temprano, representado por el granito-granodiorita de Cruz del Eje, los de La Playa y El Pílon [Rapela, 1998] y probablemente el de Agua de Ramón, el de los volcanes de Pocho y los de Altautina, aparentemente aún no datados; el segundo, Devónico, señalado por el batolito de Achala.

No se encuentran vetas de wolframio en el granito devónico; es probable que los casos mencionados en la bibliografía se deba por haber confundido, en el campo, migmatita de caja por granito.

Mesoscópicamente se observa que los

granitos, incluyendo la migmatita cordierítica del área de la mina S.J. Bautista, excepto el granito de Achala, se caracterizan por contener abundante biotita isorientada. También muestra al microscopio diferencias respecto de la intensidad de deformación del cuarzo primitivo (no secundario): fuerte en el de la migmatita de S.J. Bautista y granitos de Agua de Ramón y Altautina y leve en el de Achala.

Resumiendo: si los granitos contienen o no vetas de wolframio, abundancia e isorientación de biotita y cuarzo con evidencias o no de deformación, se aprecia una clara diferencia morfológica entre el magmatismo de las partes oriental y occidental de la región.

Las efusivas andesíticas se ubican en el sector suroeste del macizo San Carlos, presentándose como conos efusivos y una extendida cubierta piroclástica, conjunto que ocupa una extensión de casi 200 km² (Figura 2). Hay un área central de unos 20 km² de conos efusivos, formada esencialmente por los cerros Poca y Velis; los primeros elongados en la dirección NNE y el segundo ONO. Entre ellos aflora un núcleo de granito y uno menor de metamorfitas. Además una franja, ubicada 10 km al oeste, con un área aproximada de 30 km² elongada en rumbo NNE, con numerosos conos pequeños, el mayor con superficie de 1 km² (C° Agua de la Cumbre). Esta franja presenta al norte una dilatación cuyo alineamiento con el área de Poca es de dirección ONO; en el extremo oriental de ese alineamiento y a unos 10 km del C° Poca emerge, aislado por entre la cubierta tobácea, el C° Ciénaga. Dicha cubierta rodea por completo al área de Poca pero no ingresa en la franja occidental, por lo que allí los conos hacen erupción directamente en medio metamórfico.

El que más extensa y minuciosamente describe la geología de estas efusiones fue Olsacher [1960], quien observa que ellas no guardan el "estilo" de las cadenas meridionales propias de la serranía cordobesa, pero no percatándose de los alineamientos NNE y ONO que las caracteriza. Litológicamente fueron consideradas como andesitas [Olsacher, 1960], traquiandesitas [Hieke y Piccoli, 1961] y lacitas-laciandesitas cuarzosas [Gordillo y Linares, 1981]. Las edades determinadas por

los últimos autores oscilan entre 7,5 y 5,3 Ma., ratificadas por Kay y Gordillo [1994].

Es de interés destacar, por su implicancia minera, que al este del C° Poca aflora un área de unos 6 km² de mantos de lava [andelacita, Morelli, 1993] con rumbo NO y buzamiento 5° noreste, en la que se observa diversas franjas de alteración hidrotermal donde la roca, al microscopio, muestra una pasta con parches microgranosos, textura en mosaico de cuarzo secundario, arcilla, sericita y calcita; las coladas están intersectadas por diques de traquiandesita, a veces con fuerte alteración hidrotermal, similar a la descrita. El área presenta una importante evidencia aurífera cuyos detalles se desarrollan en el capítulo de Minería "Lineamiento Río Hondo-Volcanes de Pocho".

Tectonismo

Las unidades geológicas que conforman la Región Minera Traslasierra son: metamorfitas, macizo migmatítico de San Carlos asociado a intrusivos granítico-tonalíticos cámbricos, el batolito granítico devónico de Achala y las volcanitas terciarias de Pocho.

Los sistemas de fracturamiento que afectan a este conjunto son los siguientes: N-S, NNO, ONO y NNE-NO (Figuras 1 y 3).

El sistema N-S está expresado por el borde oriental del Macizo San Carlos; la mayor parte del drenaje ubicado al noreste de la región, incluyendo el lineamiento aurífero Candelaria-Soto y el borde occidental de la serranía (en su mitad norte).

El sistema NNO, menos representado que el anterior, se lo identifica en el borde occidental de la serranía (en su mitad sur); el borde occidental del Macizo San Carlos, incluyendo la falla Guasapampa y su prolongación sursureste, a través de la Pampa de Pocho, hacia el distrito Ambul (control secundario de la metalogenia wolfrámica).

El sistema ONO se lo detecta en el borde norte del Macizo San Carlos y en el lineamiento aurífero Río Hondo-Volcanes de Pocho, incluyendo la distribución principal de estos efusivos terciarios (similar al del Morro-La Carolina de San Luis).

Por último el sistema representado

por los rumbos NNE y NO, con las expresiones más numerosas en la región controla, por una parte el lineamiento principal de la metalogenia wolfrámica NNE (Cámbrico) pero también y con el mismo rumbo, el emplazamiento del batolito de Achala (Devónico); además la metalogenia Andica (Terciario) con la paragénesis Pb, Ag, Zn, etc. de los distritos La Argentina y El Guaico. En su rumbo NO afecta a menudo al Batolito de Achala (post-Devónico), orienta la cuenca de cabecera del río Salsacate y el rumbo principal de las vetas de manganeso de la mina María Rosa (Plioceno), con lo cual este sistema presenta reactivación periódica desde el Cámbrico hasta prácticamente la actualidad.

En general, en todos los sistemas se detectan rejuvenecimientos tectónicos, lo cual ha permitido desde el punto de vista de yacimientos minerales la superposición, casi sin excepción en la región, de las metalogénias pámpica y andica.

Minería

Los yacimientos de esta región están dispuestos en una franja de rumbo NNE, con un ancho de 60 km, que se extiende desde la latitud de Soto, al norte, hasta aproximadamente Villa Dolores, al sur, con unos 140 km de longitud. Esta franja es parte de la considerada en la zonación wolfrámico-aurífera de las provincias de Córdoba y San Luis [Bassi, 1996]. Como en aquella, se cumple la distribución de yacimientos terciarios (Pb, Ag, Au, Zn, etc.) en su parte central y de edad cámbrica (W) en ambos bordes. De estos últimos se destaca, por la cantidad de yacimientos, el borde oriental, estando representando el occidental por un solo depósito.

A su vez, los yacimientos terciarios se pueden reunir según los diferentes metales y asociaciones (Figura 1). Un pequeño grupo noreste, en esquistos, con exclusivamente oro y un gran grupo distribuido en la periferia del Macizo San Carlos, predominantemente plumbargentífero, en general con vestigios de oro y en un caso prevaleciendo este metal.

El grupo noreste está formado por dos alineamientos paralelos, de rumbo N-S, desarrollados a ambos lados de los niveles de

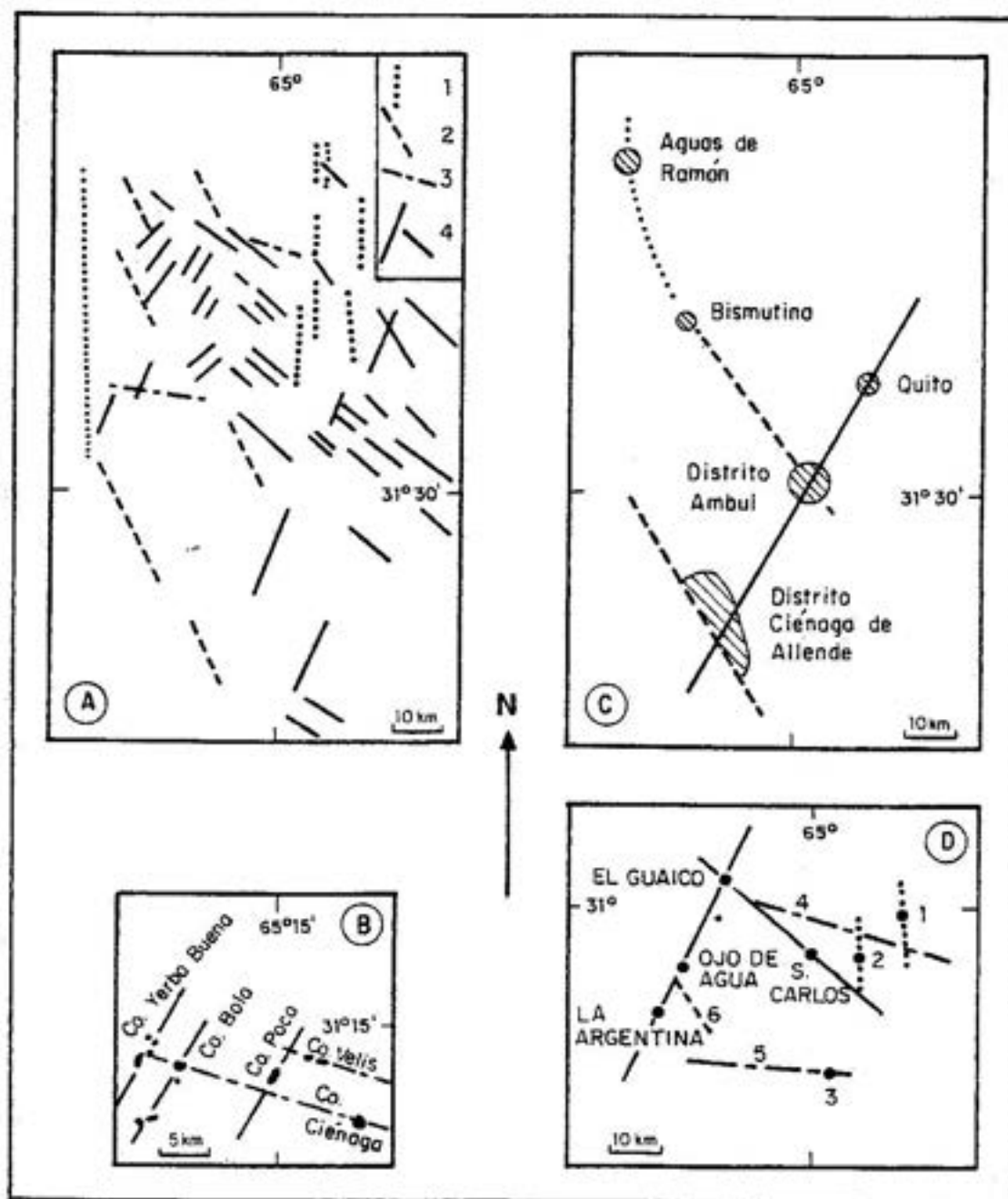


Fig. 3. Región Traslasierra, fracturamientos y controles tectogénéticos. A sistemas de fracturas (de Figura 1): 1 N-S, 2 NNO, 3 ONO, 4 NNE y NO. B control tectónico de los volcanes de Pocho. C lineamientos metalogénéticos del ciclo pámptico (*wolframio*). D lineamientos metalogénéticos del ciclo ándico: Oro - conocidos- 1 Candelaria, 2 Soto, 3 Río Hondo; -supuestos- 4 Dos Pozos-Candelaria, 5 Río Hondo-Volcanes de Pocho, 6 Ojo de Agua; *Plomo, plata, zinc*- La Argentina-El Guaico, El Guaico-San Carlos.

cuarcitas micáceas más importantes de la región y son Candelaria, al este, y Soto, al oeste.

En el grupo relacionado con el macizo San Carlos se distinguen dos alineamientos

plumboargentíferos con vestigios de oro. Uno al oeste del macizo, de rumbo NNE, constituido por los distritos La Argentina, Ojo de Agua y El Guaico, y el otro, al noreste, de rumbo ONO, formado por los distritos El Guaico

y San Carlos. Además un tercer lineamiento aurífero pero con evidencias pluboargentíferas, de rumbo prácticamente E-O, jalonado en sus extremos por la mina Río Hondo, al este, y el áreas Volcanes de Pocho, al oeste.

Así como fue visto en la zonación wolfrámica-aurífera [Bassi, 1996], la radicación en los grupos de los metales de una determinada metalogénia no es excluyente. Prácticamente en todos los yacimientos de wolframio hay superposición de metalogénia terciaria, con evidencias tales como alteración hidrotermal de baja temperatura y algunos sulfuros. También en los depósitos de Pb, Ag, Zn, etc. y oro hay, como mineralización accesoria, evidencias de la metalogénia pámpera. Tales metales accesorios no son, por lo general, relevantes desde el punto de vista minero.

En el presente trabajo se ha podido aportar una nueva observación que ratifica la superposición de metalogénias en la mina de wolframio San Ramón donde, además de la sericita secundaria producida a expensas de plagioclasa, mencionada por Bassi [1996] y que acompaña al ciclo ándico, se ha identificado cuarzo secundario (no tectonizado) en el granito gneisoide del yacimiento, granito cuyo cuarzo hipogénico muestra clara extinción ondulosa.

A continuación se agruparán los yacimientos por metales y dentro de ellos por los diferentes alineamientos (tectonismo) que los relacionan.

Oro

Lineamiento Candalaria-Soto

El tramo Candalaria incluye los yacimientos de oro más explotados de la región. Las minas se ubican en ambos márgenes del río homónimo a lo largo de 11 km y en un ancho máximo de 2 km. El río, en ese trayecto, mantiene un rumbo sostenido N-S con una perturbación local en la mitad del tramo; en su terminación sur cambia bruscamente de dirección hacia el SSO al atravesar el asomo de cuarcita micácea de Olsacher [1960] para continuar con rumbo sur, dentro del mismo, hasta su borde oeste. No se han descubierto en dicho afloramiento, yacimientos auríferos explotables y ni siquiera evidencias de oro, tal

como se lo observa en la Figura 10 del informe de Bonalumi y Gigena [1982], con lo cual es claro el desplazamiento de unos 10 km al oeste del tramo Soto respecto del de Candalaria.

Tramo Distrito Candalaria. En la Figura 4 se ha esquematizado el conjunto de las vetas principales de este tramo: Matilde, Santander, Laguna, Candalaria, Niño Dios, La Higuera, Varitas, Bragada, Monserrat, Puiggari, Porteña, Inglesas, Oro Grueso, Barranca y Cascada.

Pareciera que el mejor conocimiento de estas minas es el proporcionado por el informe de Sabín [1937], quien las estudió a través de limpieza de labores antiguas, mapeos y muestreos. Lo que sigue es un extracto de dicho informe. La síntesis del muestreo es el siguiente (mina, número de muestras, ancho promedio, ley en grAu/t): Monserrat, 48, 16,5

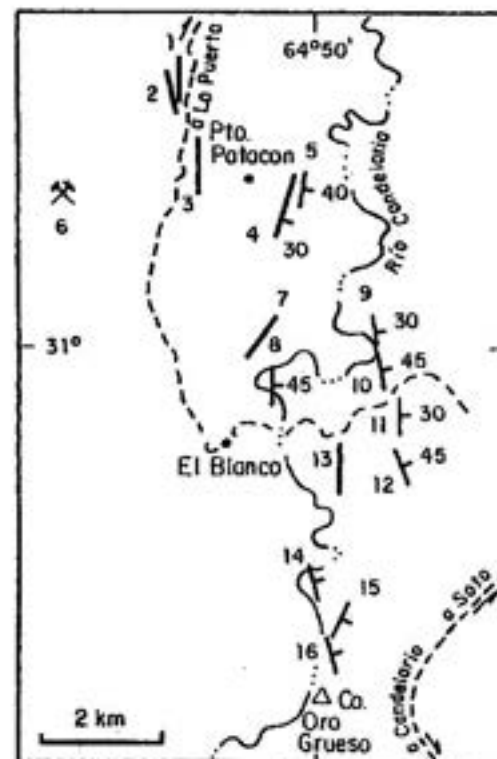


Fig. 4. Distrito aurífero Candalaria. Minas: 1 Matilde, 2 Santander, 3 Laguna, 4 Candalaria, 5 Niño Dios, 6 La Higuera, 7 Varitas, 8 Bragada, 9 Monserrat, 10 Puiggari, 11 Porteña, 12 Inglesas, 13 Porvenir, 14 Oro Grueso, 15 Barranca, 16 Cascada. Croquis extraído de Sabín [1937].

(un 20% c/O, 42 m, 18 grAu/T); Puiggari, 32, 0,52, 16,5; Portaña, 3, 0,40, 7,4; Zapallar, 3, 0,46, 84; Porvenir, 9, 0,37, 13; Bragada, 8, 0,51, 17; Candelaria (sur y norte), 15, 0,29, 67; Quebrada de Cristo, 10, 0,39, 28; Niño Dios, 4, 0,24, 64; Cortadera, 7, 0,33, 43; Matilde, 11, 0,44, 77; Oro Grueso, 9, 0,30, 9; Barranca, 9, 0,31, 2; Higuera, 4, 1,06, 1.

De su informe se concluye que las vetas tienen rumbo general N-S con buzamientos al este de 25 a 60°; sus anchos promedios son alrededor de 1 m, pero están mineralizados solo entre 10 y 50 centímetros; es clara una disminución de ley a profundidad, en especial cuando pasa de la cubierta metamórfica al intrusivo granítico. En general los clavos mineralizados son de poca extensión en el rumbo de la veta, pero con desarrollo a profundidad. El cuerpo de los filones está compuesto por cuarzo y pirita, siendo la ley aurífera directamente proporcional al porcentaje del sulfuro. Raramente hay oro en el cuarzo, presentándose al estado libre sólo en la zona de oxidación. Se interpreta así que los clavos, aunque profundizan, son de corta corrida, por lo que toda exploración formal, para evaluación de reservas, debería hacerse por medio de piques en los clavos, lo cual encarece todo reconocimiento sistemático. Por lo tanto se estima que para este tipo de yacimiento su explotación debería encararse por medio de empresas pequeñas a medianas, con buena experiencia minero-metalúrgica. La zona primaria exigirá un tratamiento apropiado para la extracción del oro incluido en la pirita.

Tramo Distrito Soto. Comprende las minas Tigre, al norte, y San Ignacio, al sur.

- *Mina Tigre.* Está ubicada 1,5 km al norte de la intersección del camino Candelaria-La Higuera con el río Soto (paraje Paso del Carmen), sobre la margen derecha del río, de 30 a 50 metros sobre su curso y a unos 200 m de éste (posición G.P.S: S 31°03'792/ O 64°54'566). El laboreo subterráneo en la época de la visita (enero 1998) era de acceso no recomendable sin equipo adecuado y la intensa vegetación arbustiva dificultó incluso su inspección superficial. El ambiente geológico del yacimiento está dado por un cuerpo de

granodiorita elongado en rumbo oscilante E-O que, en el curso del río Soto, tiene ancho de unos 550 m; su contacto norte es con esquisto, el que en los primeros 50 m presenta numerosos filones de diorita de grano fino, con espesores de 2 a 3 m y rumbos variados; a continuación el esquisto, perturbado tectónicamente, está muy inyectado con cuarzo y contiene abundante biotita. Las manifestaciones mineralizadas, a juzgar por las guías de oxidación que se observan en el cauce del río, se encuentran en el pasaje de esquisto con filones de diorita de grano fino a esquisto inyectado. De acuerdo a Bodenbender [1905] la veta fue muy laboreada en unos 500 m de corrida y 65 m de profundidad, corrida que demuestra la existencia de un clavo de gran longitud, que discrepa con los de corta corrida de las minas del tramo Candelaria. Igualmente se diferencian en los rumbos de los filones: N-S para Candelaria y E-O para Tigre.

Es probable que la anomalía de Tigre sea debido al intenso fracturamiento transversal que controló la intrusión del cuerpo de granodiorita de Paso del Carmen, fracturamiento que a su vez es prolongación del borde norte del Macizo San Carlos y de la "faja de cizalla Dos Pozos-La Higuera" de Sureda [1978].

En el mismo fracturamiento se sitúan las manifestaciones auríferas denominadas mina Yuspe, ubicada entre Paso del Carmen y Candelaria y emplazada en granito. Es aquí donde Bodenbender [1905] ratifica la relación vetas auríferas-granito apuntando "que el granito haya actuado sobre macizos de diorita extrayendo de ellos las piritas auríferas y formando las vetas" sin tener en consideración las numerosas manifestaciones de hidrotermalismo de baja temperatura presentes, las que no serían coherentes con una metalogénia derivada de un intrusivo.

- *Mina San Ignacio.* Está ubicada en el pie occidental de la Cumbre de Gaspar (aproxim. lat. S. 31°09' - long. O. 64°55'), debiéndose acceder desde Cruz de Caña hacia el sur por un camino vecinal que pasa por el establecimiento El Vallecito, Puesto Caña Quemada y finalmente Aguada de San José. Hay pocos antecedentes técnicos sobre esta

mina y llama la atención de que no esté citada por Bodenbender [1905]. Son varios filones y solo uno de importancia, con rumbo NE y buzamiento 60°E; las labores son inaccesibles. Cerca de la mina hay restos de una planta de concentración instalada en 1941 [Olsacher, 1960].

Lineamiento Río Hondo-Volcanes de Pocho

Este lineamiento de dirección prácticamente E-O (N 80° O) se lo identifica de este a oeste por las minas de Río Hondo, Cuchiyaco, la anomalía aurífera Pozo de Piedra y el área de Reserva Minera denominada Volcanes de Pocho, extendiéndose así a lo largo de unos 30 km. Aunque no dentro de él, el lineamiento está en cierta manera ratificado por la proximidad de la mina de oro Diana, ubicada unos 4 km al sur de Cuchiyaco.

- *Río Hondo* es en realidad un sector minero, como lo denomina Martino et al. [1997] en cuyo mapa de Figura 2 grafica cuatro minas (Ariza, Ponce, Republicana y Azucena) que se distribuyen en unos 4 km², ubicadas entre 3 y 4 km al norte de Tala Cañada, en la margen derecha del Río de Vilches entre los ríos Las Chacras y Chávez.

Según Camargo [1944] habría en el área unas 50 vetas de rumbo E-O, buzando 45° S, con espesores de 10-50 cm y con una mena de pirita, calcopirita y galena en ganga de cuarzo; el laboreo, iniciado a fines del siglo XIX, consta de 3 piques de unos 20 m y una galería de hasta 60 m de longitud.

En 1998 ya las labores eran desconocidas por los pobladores de la región, estando además el sector muy cubierto por vegetación. Existe restos de una planta de concentración, instalada en la margen derecha del río Vilches (ubicación GPS: S. 31°19'145 / O. 64°57'924) al parecer con tendencia a planta regional.

- La mina *Cuchiyaco* está ubicada en el paraje homónimo, 5 km al ESE de Salsacate (posición GPS, S. 31°19'771, O. 65°01'913). La veta de rumbo N 50°E, subvertical, anchos 0,50-0,90m, está laboreada en superficie por unos 200 m y un chiflón y pique hasta 30 m de profundidad; una muestra del desmonte dio 220 ppb/Au.

- La mina *Diana* se encuentra 3,8 km al sureste de Talinga (posición GPS S31°22'327 / O65°03'170), próximo a la margen derecha del Río Jaime. La veta es de rumbo N70°E; de acuerdo a Miró et al. [1986] es subvertical, con 120 m de laboreo en 60 m de longitud y 20 m de profundidad, y su mena contiene pirita, galena y blenda, adjudicándole una ley media de 10 grAu/t sin indicación de espesor. Una muestra orientativa del desmonte, extraída por el autor, dio 5,5 grAu/t.

- La anomalía del paraje *Pozo de Piedra* (posición GPS, S. 31°18'438 / O. 65°10'581) es una franja de impregnación ferruginosa diseminada de rumbo N75°O con 50 m de potencia que atraviesa el camino Salsacate-Cañada de Salas; una muestra a punta de martillo dio 40 ppb/Au.

- El área *Volcanes de Pocho* es de conocimiento actual, ya que no está citada por los autores que se ocuparon desde el siglo XIX hasta 1988 en la minería de la región, época en la que la Dirección de Fabricaciones Militares realizó una prospección del sector [López, 1988, y Centeno, 1989]. En 1994 ambos presentaron una síntesis de sus trabajos, refiriéndose específicamente a procesos hidrotermales en los intrusivos andesíticos y brechas asociadas en un área de unas 50 ha, detectando alteración sericítico-argilico-silíceo, así como también carbonatos, manganeso y óxidos de hierro (pirita?).

En la inspección del área, hecha para el presente trabajo, se identificó un núcleo de volcanita mantiforme (coladas) de unos 5,5 km² de superficie, limitado al norte y este por granito, al sur por metamorfitas y al oeste por la corrida de conos volcánicos del C° Poca. El área está surcada en su tercio sur por un arroyo de rumbo E-O que pasa por el paraje Alto de la Cruz. A dos y medio kilómetros de este punto, aguas arriba, hay un destape minero superficial que muestra unos 10 m de impregnación ferruginosa; en su borde oeste se presenta una veta de rumbo N45°O, vertical, de 1,50 m de potencia; una muestra de ella dio vestigios de Cu, Pb, Zn y Ag y 18 grAu/t. Aguas abajo, en dirección NE y a 200 m de la labor

citada hay una franja de alteración hidrotermal diseminada, 60 m de ancho y rumbo N80°O; a 300 m más se encuentra otra franja similar del mismo ancho pero con rumbo N20°O y a otros 250 m otra franja del mismo tipo, de rumbo paralelo a la primera y con 100 m de ancho. Es probable que existan otras áreas con alteraciones hidrotermales en este núcleo. Desde Alto de la Cruz hacia el oeste, por unos 3 km, hay profusión de diques andesíticos en medio de esquistos micáceos y parches aislados de alteración hidrotermal.

Lineamientos con posibilidades de mineralización aurífera diseminada

En la región Traslasierra existen tres lineamientos con tales posibilidades: Río Hondo-Volcanes de Pocho, Dos Pozos-Candelaria y Ojo de Agua (Figura 3, D), además de una anomalía aislada en la Cuesta de Cura Brochero (Figura 1).

- El lineamiento *Río Hondo-Volcanes de Pocho*, en sus 30 km de longitud, presenta en sus extremos los sectores que conforman su nombre y entre ambos, está jalonado por manifestaciones como Cuchiyaco y Diana en un medio semiaflorante, hecho que presupone la posibilidad de existencia de otras expresiones aún desconocidas. Por ejemplo, en la posición GPS S 31°20'153 / O 64°59'663 se presenta una diseminación de óxidos de hierro, poco visible entre vegetación y eluvio, que podría significar pirita (aurífera ?) en el subsuelo.

- El lineamiento *Dos Pozos-Candelaria* está sugerido en su extremo occidental por la "Faja de Cizalla Dos Pozos" identificada por Sureda [1978] con unos 500 m de ancho en el distrito plumboargentífero El Guaico donde, de acuerdo a ese autor, varias de sus minas presentan vestigios de oro (Veta Rica, San Agustín, Overo Muerto y también el desmonte del establecimiento Dos Pozos). El lineamiento es de rumbo SE a ESE, a lo largo del cual y a tres kilómetros del Guaico se encuentra el yacimiento de caliza Cantera Alvarez donde se observa una franja de unos 100 m de potencia, rumbo S55°E, con diseminación de óxidos de hierro; una muestra a punta de

martillo fue negativa para oro en ppb. Otros 3 km más adelante y en el mismo rumbo, en el corte de la ruta La Higuera-Villa de Soto (C° de la Cruz), se observa nuevamente la franja ferruginosa con 300 m de ancho; diversas muestras dieron valores entre 10 y 20 ppb/Au y una guía de 0,10m dio 200 ppb/Au. Veinte kilómetros más hacia el ESE, en Cruz de Caña, se encuentra la mina aurífera Tigre, de rumbo E-O, ya descrita, que puede interpretarse como parte de este alineamiento y donde, aparte de la veta en si, el cuerpo granodiorítico que la acompaña presenta abundantes evidencias de hidrotermalismo; otro jalón lo constituye la manifestación aurífera de Yuspe, ubicada entre Cruz de Caña y Candelaria.

Este alineamiento responde al rumbo del borde norte del Macizo San Carlos y además coincide con el fracturamiento que se supone desplazó los tramos Candelaria y Soto del distrito aurífero homónimo.

- Lineamiento *Ojo de Agua*. En el distrito plumboargentífero Ojo de Agua es destacable una franja de diseminación ferruginosa que acompaña a la falla Guasapampa desde la mina La Colorada, al NNO, hasta por lo menos la mina La Toma, al SSE (donde está cubierta por aluvio) con una longitud aflorante de 4 km y un ancho de 500 a 700 m (Figura 5, D). Dicha diseminación indica, muy probablemente, diseminación pirítica, la que puede estar acompañada por oro, metal detectado en la mina La Argentina, ubicada sólo un par de kilómetros al oeste (ver Distrito La Argentina).

- Anomalía *Cuesta Cura Brochero*. En la ruta Salsacate-Cura Brochero y a 42 km antes del último pueblo (posición GPS S31°41'817 / 65°03'093), el camino muestra en su borde sur 200 m de impregnación ferruginosa en granito, con rumbo aproximado N30°O, buzando aparentemente al NE 45°. Una muestra orientativa a punta de martillo dio 20 ppb/Au.

Plomo, plata, zinc

Los principales yacimientos se distri-

buyen en dos lineamientos. Uno NNE que relaciona los distritos La Argentina, Ojo de Agua y El Guaico y otro NO que conecta el distrito poco definido de San Carlos con El Guaico, además de tres grupos: Tanninga, Salsacate Occidental y Agua Blanca, desconectados entre sí.

Los minerales frecuentes de sus menas son galena, blenda, pirita, calcopirita, tetraedrita, pirargirita, proustita y arsenopirita; numerosos minerales secundarios de Pb, Cu, Fe, Ag y Zn y productos de alteración hidrotermal de temperaturas moderada a baja tales como sericita, caolinita, cuarzo, ópalo y calcedonia [Sureda, 1978]. Además de oro, como metal accesorio, en La Argentina y El Guaico.

Distrito La Argentina

Las minas citadas para esta área por Pace Gigli [1944] son: Argentina, Argentina Chica, 25 de Mayo, San Jerónimo, San Agustín, Colonia, Tres Hermanos, San Juan, Monte Carmelo, San Roque, Margarita, Natividad, Chispa y Rosario; los que, excepto Argentina Chica y San Jerónimo, fueron graficados con el rumbo y buzamiento de sus vetas en la Figura 5 según los datos y la ubicación indicados por dicho autor. Los rumbos de las vetas oscilan alrededor de NE y en general sus buzamientos superan los 50°.

En noviembre de 1992, momento de la inspección del suscrito, no había ya pobladores que reconociesen las minas y, en ningún caso, eran accesibles los laboreos.

La mina más importante del distrito, ubicada en su borde oriental, fue La Argentina. Su veta, de rumbo N30°E, vertical, se emplaza en el contacto, infiltrado por pegmatitas, de cuarcita micácea al oeste y micacita al este. Una muestra extraída en un pilar remanente de explotación dio, en 0,50 m de mena oxidada, 8,7% Pb, 350 grAg/t, 0,4% Zn, 5,4 grAu/t y 0,2 %W₀₃. La corrida mineralizada (clavo) de esta mina supera los 100 m, mientras que la mina Cruz del Señor, ubicada 200 m al sudoeste de la anterior y con veta de rumbo similar, pero con inclinación media al este, su mineralización se intensificó en un clavo corto, explotado desde la superficie, por lo que en la galería de explora-

ción veta en mano fue estéril en los 50 m de avance hasta el clavo.

Las minas de esta área están emplazadas en esquistos y su hábito es de clavos cortos, generalmente de unos 20 m de longitud y verticales. Y como la ley en plata, metal de interés para la época, dependía de la zona de oxidación, el laboreo de estos depósitos no superaron por lo general los 15 a 20 m de profundidad, como lo demuestra los croquis de los trabajos graficados por Pace Gigli en su informe [1944].

Esa circunstancia, sumado a lo artesanal de los trabajos y al descenso de precio de la plata, fueron sin duda la causa del despueble de estos distritos mineros.

Distrito Ojo de Agua

El distrito se encuentra en el borde oeste del Macizo San Carlos. Se extiende desde el paraje Ojo de Agua hacia el NNO por 5 km con 1 km de ancho, acompañando por el este a la falla de Guasapampa (Figura 5). En ese tramo se encuentran las minas de Pb, Ag, Zn: La Toma, Paso Grande, Alicia, Compañía y Colorada; hacia el norte de esta última y en 5 km más, están al principio yacimientos de wolframio pero con superposición de minerales de Pb, Ag, Zn: minas Durazno, Unión y Bismutina; y luego solo de wolframio: Victoria, Sorpresa y Rosa. Observándose así una transición de metalogénias de sur a norte: Pb, Ag, Zn, luego Pb, Ag, Zn con wolframio y finalmente wolframio (y bismuto).

En la mina La Bismutina es clara la superposición de metalogénias. En el estudio microscópico de una muestra de caja de veta se observa sericitización avanzada de la plagioclasa, además de cloritización de la biotita [Morelli, 1993] típica de la metalogénia de baja temperatura, pero además wolframita, scheelita y bismutita, de alta temperatura. En la mina La Argentina se encuentra, además de wolframita, turmalina [Bodenbender, 1905] como expresión de hipotermalismo.

Otra característica de esta área es que sus vetas son de rumbos norte a noroeste y oeste-noroeste, a diferencia del área La Argentina, y además sus buzamientos en general menores de 50° e incluso subhorizontales, como en el caso de los mantos de La Bismuti-

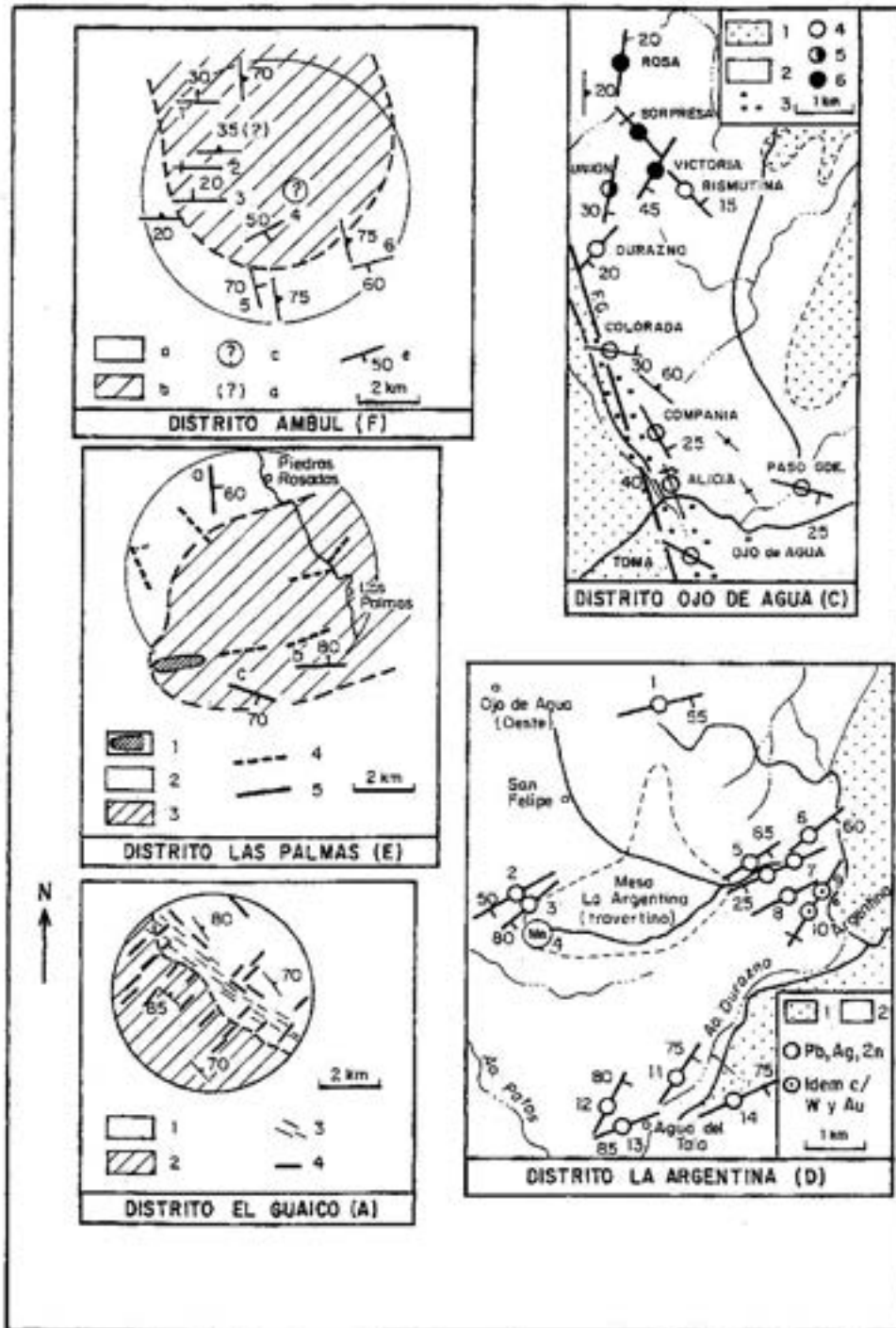


Fig. 5. Distritos mineros. (A) *El Guaico*: 1 metamorfitas, 2 migmatita, 3 fallas, 4 vetas (Pb, Ag, Zn), adaptado de Sureda [1978]. (C) *Ojo de Agua*: 1 aluvio, 2 migmatita, 3 alteración hidrotermal diseminada; Minas, 4 de Pb, Ag, Zn, 5 de W y Pb, Ag, Zn. 6 de W; F.G. falla Guasapampa. (D) *La Argentina*: 1 aluvio, 2 metamorfitas; Minas, 1 Natividad, 2 Rosario, 3 Chispa, 4 María Rosa, 5 Tres Hermanos, 6 Colonia, 7 San Agustín, 8 25 de Mayo, 9 La Argentina, 10 Santa Cruz, 11 San Juan, 12 Margarita, 13 Carmela, 14 San Roque. (E) *Las Palmas*: 1 anfibolita, 2 metamorfitas, 3 migmatita, 4 pegmatitas, 5 manifestaciones ferríferas: a San Antonio, b Cerritos Blancos, c José Santos Suárez [adaptado de Bassi y Valvano, 1948]. (F) *Ambul*: a metamorfitas, b migmatita, c esquistosidad no visible, d esquistosidad dudosa, e veta de wolframio; Minas: 1 Blanca, 2 Santuzza, 3 Unión y S.J. Bautista, 4 Arauco y Lautaro, 5 M. Alicia (fuera del distrito), 6 Victoria, Cairo y Hornito [adaptado de Bassi y Terrero, 1954].

na. Parece evidente el control tectónico de la falla Guasapampa sobre la metalogenia del área. Las vetas están a menudo asociadas a las pegmatitas de borde y a relictos de caliza. Muy claro esto último en la mina La Colorada, donde la mineralización se aloja directamente en un cuerpo calcáreo.

Lo destacable del distrito Ojo de Agua es una franja de disseminación ferruginosa que acompaña a la falla Guasapampa y que fue ya descrita en el capítulo de oro a prospectar.

Distrito El Guaico

El Guaico se encuentra en el borde norte del Macizo San Carlos. Las vetas se distribuyen acompañando preferentemente el contacto entre esquistos y migmatitas y con mayor frecuencia en esta última roca (Figura 5, A). Incluso el núcleo de migmatitas enclavado y aislado en medio de esquistos contiene un nuevo grupo de vetas, separado del principal. La esquistosidad de estas rocas, poco visible en la migmatita, es paralela al contacto, discrepando con la esquistosidad regional NNE de las metamorfitas de Córdoba. No obstante el rumbo frecuente de las vetas es NE estando controladas, al parecer, por la tectónica que alinea los distritos La Argentina-Ojo de Agua-El Guaico (Figura 3, D).

Este distrito fue estudiado minuciosamente por Sureda [1978]; tectónicamente este autor llama la atención sobre una faja de cizalla que denomina Dos Pozos-La Higuera de rumbo ONO, que separa la migmatita de los esquistos y a la que se acomodan pegmatitas graníticas con claras evidencias de milonitización, turmalinización (hipotermal; pámptica ?) y ocres ferruginosos (hidrotermalismo con aporte piritico ?), probablemente esto último ligado a la metalogenia ándica.

Sureda grafica en su mapa unos 60 yacimientos, 12 de los cuales fueron ya conocidos por Alberdi en 1880, quien indica a Santa Bárbara como su establecimiento de fundición. Del mismo, ubicado en la margen derecha del río Pichanas, se conservan aún las chimeneas.

Distrito San Carlos

El distrito (Figura 1) está formado por cuatro minas, San Agustín y Nueva de Mayo,

separadas unos 500 m entre sí y probablemente sobre una misma veta, y la Niño Dios y la Colón, esta última desconocida por los pobladores actuales. A la Agustín-Nueva de Mayo se accede desde el pueblo de San Carlos por caminos vecinales hasta la casa de Juan Barrionuevo; desde allí por senda de herradura 1,5 km al norte (ubicación aproximada N31°08' / O 65°03'). El acceso a Niño Dios se hace por el camino de la Higuera en dirección a Cruz de Caña y 3 km antes por un camino vecinal hacia el sur hasta la casa de Augusto Barrera (posición GPS S31°05'458 / O 64°58'947) ubicada 500 m al noreste del laboreo.

La veta de San Agustín-Nueva de Mayo, en caja de migmatita, tiene rumbo NE y es subvertical; laboreo hasta 20-25 m de profundidad [Pace Gigli, 1944].

En la mina Colón, que estaría unos 5 km al este de las anteriores [Olsacher, 1960], la veta es de rumbo ONO, buzamiento 75°SO, 0,50 m de espesor. Una muestra con mucha galena (52% Pb) dio 5KgAg/t [Pace Gigli, 1944].

La veta de Niño Dios es de rumbo E-O, subvertical, con concentraciones lenticulares de galena muy argentífera; la explotación sería importante; labores profundas, anegadas, con una galería de drenaje de más de 250 m de longitud [Angelelli, 1950 y 1984]. Según Cervi [en Angelelli, 1984], algunas muestras dieron valores de más de 60% Pb y entre 4 y 6 KgAg/t. Alberdi en 1880 informa que la mina reanudó trabajos después de estar inactiva desde 1868; tiene un pique de 105 m y nueve chiflones; la veta en superficie tenía un espesor de 0,10 a 0,15 m y en profundidad 0,45 m. De acuerdo con Bodenbender [1905] este depósito, junto a La Argentina y Rara Fortuna (El Guaico), fueron en el siglo pasado las faenas más formales y mecanizadas de la región.

Grupo Tanninga

Bodenbender [1905] cita minas de plomo, plata, etc. en Ambul y Tanninga. De acuerdo al Anexo Técnico [Concurso Público, Córdoba, 1996] hay un distrito Tanninga en el área minera Río Hondo, formado por las minas Diana, Cuchiyaco y Posta de Mayo, las que habrían sido trabajadas por plata en el siglo

pasado, pero con pocos antecedentes históricos. Las Diana y Cuchiyaco son minas de oro y se las ha tratado precedentemente en este trabajo. Posta de Mayo es desconocida por los pobladores actuales.

Este grupo incluye el Establecimiento de Tanninga, ubicado 0,5 km al sureste del pueblo homónimo, a la vera del río Jaime. El mismo se ocupaba, al parecer, de concentración de menas de oro libre (gravitatoria, amalgamación ?) y fundición de minerales plumboargentíferos. En 1880, Alberdi informa que su actividad, en la época, se limitaba a molienda de minerales; y de acuerdo a Olsacher [1960] trató mineral aurífero de Río Hondo.

Grupo Oeste de Salsacate

De este grupo no se le conoce referencias históricas y sólo se lo identifica por constar en la cartografía. Es desconocido por los pobladores actuales.

El Mapa Minero de la Prov. de Córdoba (1/750.000, 1974) ubica una mina de plomo 10 km al oeste de Salsacate, denominada María Cristina y Trapiche de Tanninga. En el Mapa Geológico de Córdoba [Lucero, 1955] está marcada la mina Trapiche, que podría ser la misma del Mapa Minero, pero 5 km al oeste de Salsacate. Una u otra mina estarían sobre el camino Salsacate-Cañada de Salas, la primera en el Pozo de Piedra y la otra cerca de la Cañada de Salas; desconocidas por los lugareños.

Distrito Agua Blanca

Está ubicado en el pie occidental de la prolongación norte de la Sierra de Pocho, a la latitud del C° Yerba Buena y próximo al paraje Agua Blanca .

La última cita histórica de quien lo visitó es la de Alberdi [1880], quien lo estima como formado por muy importantes depósitos de plomo, plata, etc. Si bien los yacimientos estarían próximos al llano occidental, Alberdi indica el acceso partiendo de La Argentina, pasando por el paraje Agua del Tala, bordeando el C° Yerba Buena por el sur y descendiendo por senda muy empinada (400 o 500 m de desnivel). Las minas son: Bien Venida, Pique Verde y Esperanza. Las vetas tendrían

alrededor de 0,70 m de potencia.

Manganeso

En el borde suroeste de la "mesa" travertínica del área La Argentina (Figura 5,D) se encuentra una manifestación de manganeso perteneciente a la mina María Rosa.

Fue explorada con un laboreo circular en cantera de unos 20 m de diámetro y 3m de profundidad; en dirección noroeste y sudeste se encararon laboreos subterráneos con ancho y profundidad menores de 10 m. En superficie y en un pilar de la explotación sudeste se observa el siguiente perfil de piso a techo: 2 m de micacita muy inyectada con pegmatita donde se distribuyen horizontes delgados (0,10-0,20 m) de impregnación manganesífera [psilomelano, según Olsacher, 1960]. La superficie erosionada de la micacita está cubierta por un banco de travertino de 1,50 m de espesor dentro del cual, y especialmente en la base, se encuentran lentes de mineral de manganeso. El laboreo subterráneo de ambas márgenes de la cantera están alineados en un rumbo ONO, rumbo que mantienen las gúfas de hematita y cuarzo observadas en el laboreo. La génesis del yacimiento está dada por el ascenso de soluciones hidrotermales a través las vías pegmatíticas, depositando el manganeso en diaclasas subhorizontales de la metamorfita pegmatizada y en la superficie basal de contacto de los mantos travertínicos. Por lo que la edad del yacimiento es postravertínica, calcáreo considerado plioceno [Kraglievich, 1954].

Wolframio

Las minas de wolframio se distribuyen principalmente en el alineamiento NNE que acompaña el borde occidental de Batolito de Achala. Además se expanden en dos corridas secundarias de rumbo NNO (Figura 3, C); una al sur, en el distrito Ciénaga de Allende indicada por la tendencia del conjunto de sus yacimientos, en especial por las minas San José, Misterio, San Ignacio y Triunfo. La otra al centro de la región minera, jalonada por el distrito Ambul, La Bismutina y Aguas de Ramón.

El alineamiento NNE está indicado al sur por el distrito Ciénaga de Allende, al centro por el distrito Ambul y otras minas aisladas (María Alicia, César Augusto, etc.) y al norte por la mina Quito.

Todos los yacimientos se emplazan en el ambiente metamórfico y aunque a menudo se encuentran próximos a los intrusivos graníticos devónicos, no se los ha registrado dentro de ellos.

A veces el mineral de tungsteno está asociado a los cuerpos pegmatíticos, especialmente en su facie cuarzosa, pero al no encontrárselo dentro de las masas graníticas, como es el caso del tipo Achala, es de suponer que esas manifestaciones pegmatíticas están ligadas a intrusivos más antiguos. Stoll [1963] relaciona la génesis del wolframio con los intrusivos tonalíticos o graníticos del ciclo tectomagmático del Precámbrico el que, de acuerdo a Rapela et al. [1998], debiera rejuvenecerse al Cámbrico.

- *Mina Aguas de Ramón.* Se encuentra en el extremo noroeste de la región minera, adosado por el oeste a la falla de Guasapampa. Ocupa unos 5 km² en donde la tercera parte, al norte, se desarrolla en esquistos micáceos y el resto, al sur, en tonalita anatótica [Lucero y Olsacher, 1981] con marcada isorientación de la biotita en rumbo N-S. El rumbo dominante de las vetas es E-O, con buzamientos entre 30 y 50° S al centro y norte y con valores hasta subverticales al sur.

La mena hipotermal es de wolframita y algo de scheelita acompañada por bismutina y turmalina; la mena epitermal es piritita, blenda, calcopirita, y varias expresiones de alteración hidrotermal tales como sericitización y caolinización de plagioclasas, cloritización de biotitas y cuarzo secundario, evidenciándose así superposición de metalogénias (Pámpica-Andica).

Desde el punto de vista minero [Lapidus y Rossi, 1959] se presentan dos sectores: norte y sur. El primero, más importante, está formado por las vetas Carmen con 600 m de corrida y ancho promedio de 0,20 m; laboreadas en unos 300 m, reconocidas y explotadas hasta 15-20 m de profundidad, con ley estimada de 2% de WO₃. En el grupo sur

se destacan las minas Armonía y Sta. Rita. La primera con 300 m de corrida, potencias de 0,10-0,35 m, laboreada en 250 m de longitud y 20 m de profundidad, con ley estimada por Lapidus en 1,6 % WO₃ para 0,20 m de ancho. La Santa Rita está formada por tres vetas principales (Oeste, Central y Este) con un total de 1500 m de corrida, trabajada en 850 m; ley de 1,2% WO₃ para 0,25 m de potencia.

La potencialidad del conjunto del distrito fue estimada en 150.000 ts de mena con ley de 0,5-1% WO₃ [Bassi, 1996].

Grupo La Bismutina

Este grupo pertenece al Distrito Ojo de Agua, cuya parte sur corresponde a la metalogénia terciaria Pb, Ag, Zn y, como se ha visto, muestra una transición a la metalogénia wolfrámica (Pámpica). Tal zonación indica que la falla Guasapampa, considerada como vía de acceso de soluciones metalogénicas, actúa desde el Paleozoico hasta los tiempos actuales, pudiendo no ser ajena al hidrotermalismo responsable de las manifestaciones pliocenas (travertino de la mesa La Argentina y manganeso de la manifestación María Rosa).

El grupo La Bismutina está formado por un conjunto de minas emplazadas en un área de aproximadamente 8 km², elongada en dirección NNO y adosada al labio oriental (elevado) de la falla Guasapampa (Figura 5, C). Las vetas de wolframio con metalogénia superpuesta de Pb, Ag, Zn son las de las minas Durazno, Unión y Bismutina ubicadas en el tramo sur del área. Las del tramo norte, con wolframita dominante, corresponden a las minas Victoria, Sorpresa y Rosa. Excepto la Victoria, los rumbos de los filones se acomodan a la elongación NNO con buzamientos entre 20° y 30° este [Olsacher, 1960]. En la Bismutina la inclinación es aún menor, siendo a menudo subhorizontales; de acuerdo a lugareños la mina está compuesta por 3 o 4 mantos separados entre sí entre 5 y 10 m, con numeroso laboreo, prácticamente inaccesible. El estudio microscópico de una muestra de roca de caja de La Bismutina, obtenida del desmonte, Morelli [1993] la describe como una roca de textura granoblástica, compuesta por plagioclasa, cuarzo y biotita; esta última no

isorientada, lo que sugiere una roca granitoidea (tipo tonalítico). La biotita está cloritizada y muy deformada, con desarrollo de pliegues angulosos. El conjunto denota una acentuada alteración hidrotermal y una fuerte deformación superficial (falla). La descripción de esta roca corresponde a las características litológicas del macizo San Carlos y su deformación está justificada por la proximidad a la falla Guasapampa.

- *Mina El Quito* [Bassi y Terrero, 1954]. Está ubicada en el Dto. Cruz del Eje, en la cuenca de cabecera del Río Candelaria. Se accede desde la ruta 20 por el camino a Candelaria 5 km y luego por senda minera

2,5 km al este. El ambiente geológico es de micacitas inyectadas, anfibolitas, calizas y esquistos talcíticos (Figura 6). La veta principal (0,10 m), de rumbo N-S, subvertical o con buzamiento fuerte al este, se aloja en un cuerpo de esquisto talcítico concordante con las metamorfitas. Su corrida es de 140 m estando interceptada al sur por un filón de cuarzo y al norte desaparece en el gneis; se le adosa algunas guías transversales, especialmente en la caja oriental y hacia el suroeste del filón afloran guías de rumbos variados. El laboreo, comenzado con trinchera a cielo abierto, fue profundizado hasta unos 12 m. Tiene un pique que sobrepasa en 10 m el piso de la trinchera y en 1954 se comenzaba un nivel en su fondo. La ley de la veta es del orden de 1% WO_3 y su producción de 1,5 años (1953-54) fue de 5,6 ts de scheelita (70% WO_3).

Distrito Ambul [Bassi y Terrero, 1954].

Las minas de este distrito se distribuyen en un tramo de 6 km de longitud de rumbo NO, acompañando al río Jaime en su curso superior. De noroeste a sudeste, entre 1500 y 1700 msnm, respectivamente, se encuentran las siguientes minas: Blanca, Santuzza, Unión (San Juan Bautista e Indianas), Arauco (y Lautaro) y finalmente Victoria (Cairo y Hornito). Estos yacimientos se caracterizan por sus estructuras mineralizadas de rumbos E-O, a diferencia del resto de los depósitos de wolframio de esta parte de la Región Minera Traslasierra. En los de la parte norte del distrito la esquistosidad de la migmatita es poco reconocible o de rumbo subecuatorial. En el sureste la mina Victoria (Cairo y Hornito), aun cuando las vetas son E-O, la esquistosidad es de dirección submeridiana. En base a estas características se ha ubicado el contacto sur del Macizo San Carlos como el indicado en la Figura 5 (F), considerando que dicho cuerpo ha orientado dentro de él tanto la esquistosidad como el fracturamiento minerogenético y en su proximidad, pero fuera de él, sólo el fracturamiento.

- *Mina Blanca*. (Figura 7). Está ubicada 8 km al sur de Tala Cañada y se accede desde esa población por el camino que la une con el pueblo de Ambul; a los 8 km, cuando el

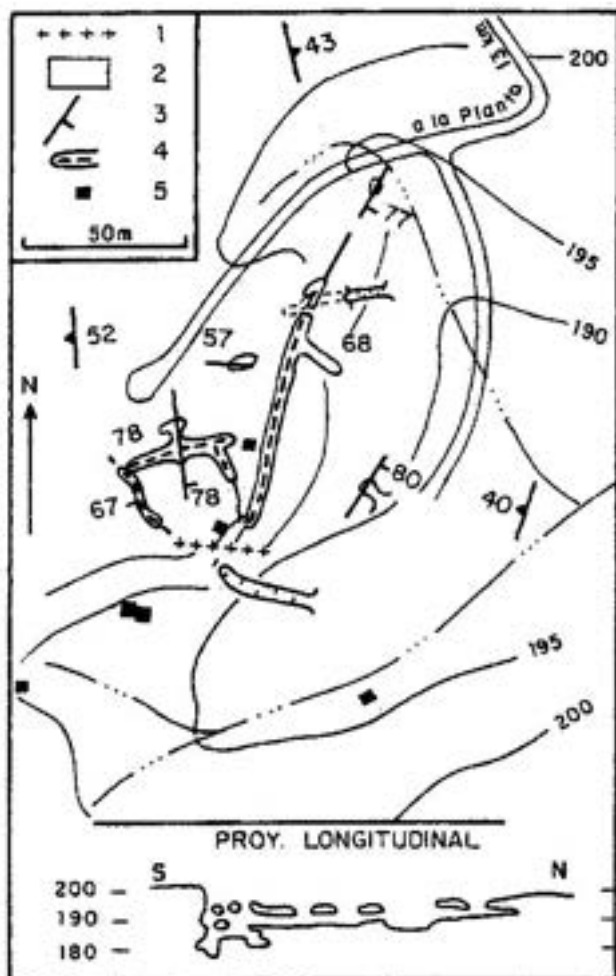


Fig. 6. Mina El Quito*. 1 filón de cuarzo, 2 micacita, 3 veta, 4 veta con labor a cielo abierto, 5 campamentos. *Adaptado de Bassi y Terrero [1954].

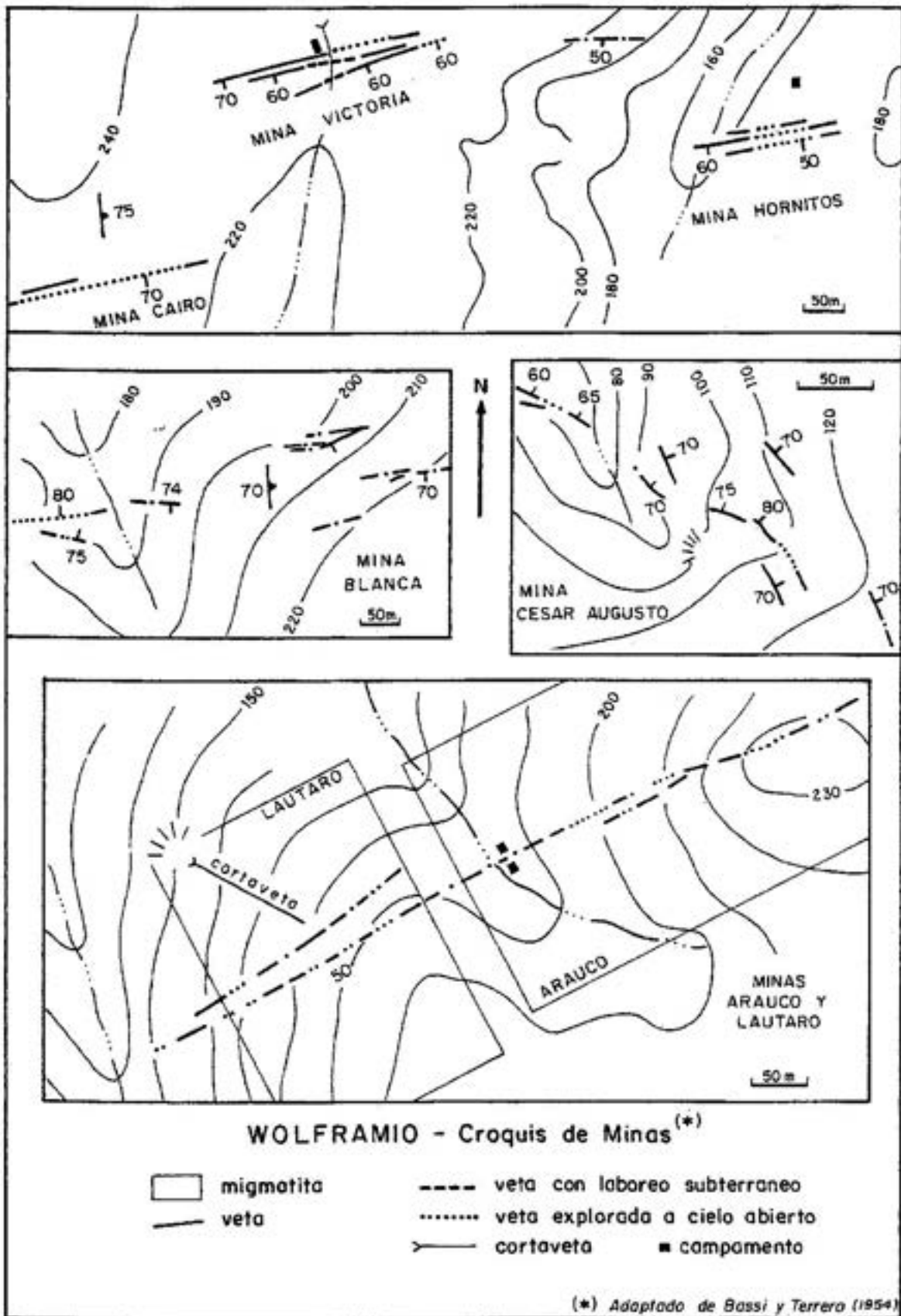


Fig. 7.

camino gira al oeste, se toma la huella sures-te (que va a la mina Unión). Un kilómetro antes hay un desvío hacia el oeste de casi 1 km.

Las manifestaciones se encuentran en ambas laderas de la quebrada El Saucesito. Son guías con espesores menores de 0,40 m, de rumbos E-O a ENE, suverticales, en caja de migmatita con esquistosidad N-S, buzando fuerte (70°) al este. El laboreo era (1954) de destapes y algunos chiflones cortos (menores de 10 m). La mineralización es de cuarzo, turmalina y scheelita.

- *Mina Santuzza*. [Bassi y Terrero, 1955]. Ubicada algo más de 2 km al SSE de Blanca, colindante con la mina Unión; su camino de acceso es el mismo de la Unión pero situado antes de esta mina, viniendo desde Tala Cañada. El marco geológico local está dado por migmatitas con esquistosidad insinuada NO, excepto la ladera oeste de la quebrada Santuzza donde acompaña, con su rumbo, un cuerpo de anfibolita de hasta 10 m de ancho, de dirección N-S; tal disposición estructural indica a la anfibolita como intrusiva (ortoanfibolita). Además de esta última roca, son frecuentes los diques de lamprófito y pegmatita a veces derivada, esta última, a silexita y filones de cuarzo. La secuencia de edad indicada por los autores es, de mayor a menor, migmatita, anfibolita, lamprófito, pegmatita-silexita y manifestaciones mineralizadas. El yacimiento está formado por dos vetas paralelas (Sur y Norte) separadas entre sí de 5 a 10 m (Figura 8). De rumbos E-O subverticales aflorantes en más de 600 m de longitud. Con potencias de alrededor de 0,05 m y hasta 0,10 m, las vetas se presentan independientes pero muy a menudo se encuentran asimiladas a los filones pegmatítico-silexíticos; a veces están intersectadas por diques de lamprófito en cuyo caso la mineralización wolframífera se acrecienta en sus contactos y el laboreo (chiflones) se intensifica en ellos. Los minerales de la mena, en orden de frecuencia, son cuarzo, turmalina, calcopirita, wolframita, scheelita, apatita y molibdenita (escasos). El laboreo de destape (trincheras y chiflones cortos) se encuentran en el total de la corrida. La veta Sur presenta el mayor la-

boreo subterráneo en un clavo de unos 40 m de longitud por 20 m de descuelgue, próximo al río Jaime. A pesar de la importante corrida de las vetas (600 m) y de la proximidad de las guías que la forman, la poca potencia de éstas hace que solo al unirse ofrezcan perspectivas mineras para un explotación formal; condición solo descubierta, por ahora, en el clavo de la veta sur, ya mencionado. Los puntos donde las vetas intersectan lamprófitos constituyen posibilidades locales de explotación artesanal.

Esta mina fue seleccionada durante los informes previos del Plan de Trabajos Públicos 1954 -Dirección Nacional de Minería, Dto. de Geología Económica- para ejecutar un estudio geológico de detalle con fines de reconocimiento minero; las conclusiones de ese estudio [Bassi y Terrero, 1955] fueron negativos en cuanto a perspectivas para justificar inversión en un programa de exploración.

- *Minas Unión y San Juan Bautista*. Este yacimiento fue también seleccionado durante el desarrollo del Plan antes citado con el propósito de delinear un programa de exploración. La presente descripción es resumen del estudio geológico de detalle [Bassi y Terrero, 1957].

La mina está ubicada 14 km al sur del poblado de Tala Cañada, Pedanía Ambul, Dto. San Alberto. Su acceso es el mismo de la mina Santuzza, siendo colindantes sus propiedades mineras. El río Jaime, con caudal en la época superior a 0,25 m³/seg., atraviesa diagonalmente al depósito. El marco geológico está dado por una base de migmatita de tipo esquistoso en la mayor parte del área y de tipo masivo en una franja al norte, donde prácticamente no hay vetas. El pasaje entre ambas migmatitas es gradual, siendo a menudo alternantes próximo al contacto. La esquistosidad tiene un rumbo general ONO y buzamiento al norte alrededor de 20°, con pocas perturbaciones locales; las vetas del depósito, a excepción de una, son subconcordantes con el esquisto. Hay numerosos diques de lamprófito, con rumbo frecuente N-S e inclinación este desde 60° a subverticales; ellos son de interés minero pues en sus intersecciones con las vetas se intensifica la mineralización

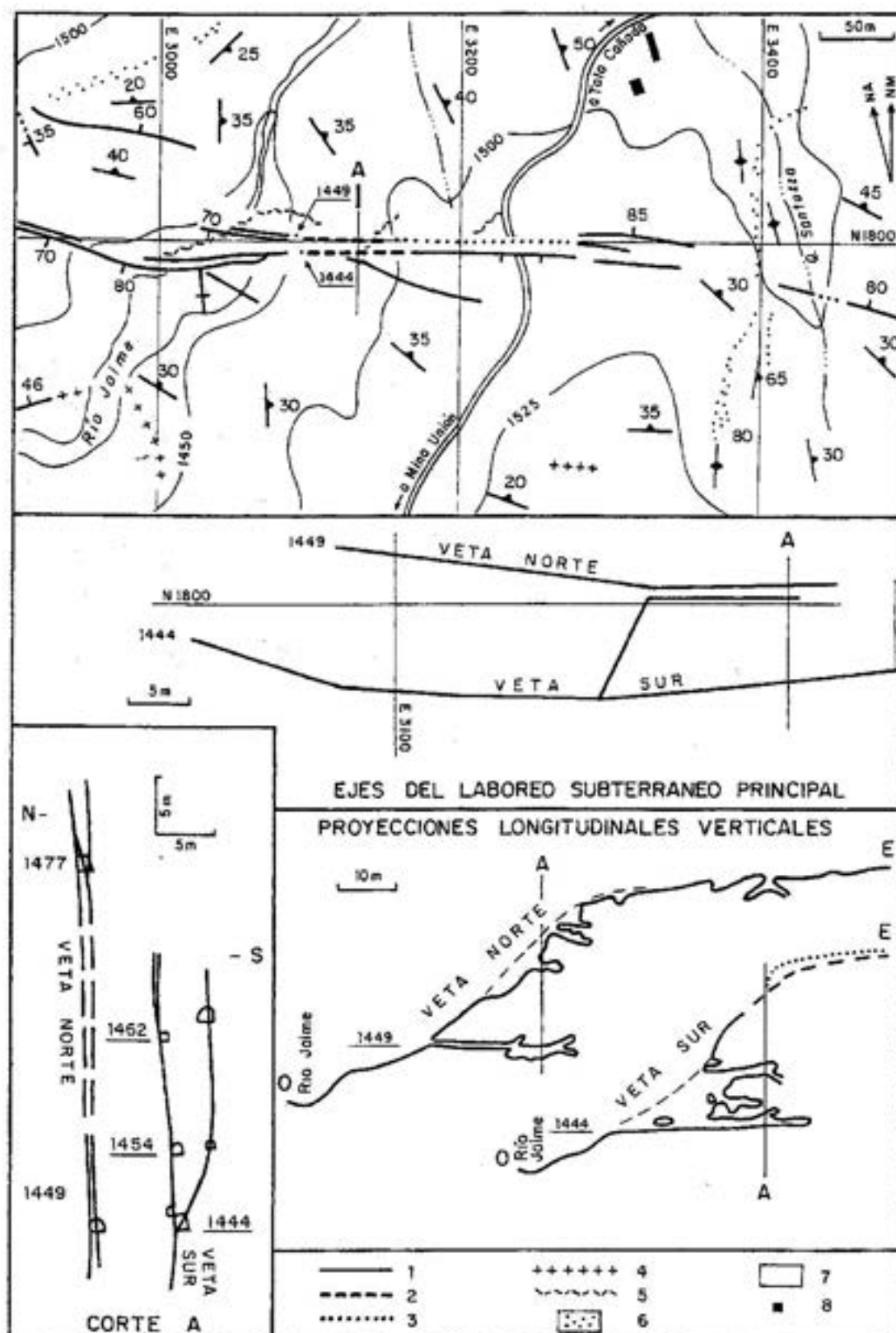


Fig. 8. Mina Santuzza*. 1 veta, 2 veta con laboreo subterráneo, 3 veta explorada a cielo abierto, 4 pegmatita y silixita, 5 lamprófito, 6 anfibolita, 7 migmatita, 8 campamento. *Gráficos adaptados de Bassi y Terreiro [1955].

espesores entre 0,50 y 2 m. Al noreste y sur del área emerge por entre la migmatita cuerpos poco definidos de granito porfiroide. Durante el mapeo se registraron 5 vetas, emplazadas en caliza. Tres forman un grupo central, con potencias de 0,60 y 1,10 m y dos vetas de 0,20 m de espesor, alejadas del grupo; una al oeste, distante 80 m y otra al sureste 40 m. El grupo central es un pliegue anticlinal, simétrico, con charnela de rumbo NNO, buzante 25°S; la amplitud del pliegue es de 25 m con alas inclinadas 70°. La continuidad de la mena está supeditada a la existencia de caliza. La mineralización, alojada preferentemente en la caliza tactizada, es de cuarzo, granate, calcita, scheelita, pirita, calcopirita, blenda y molibdenita. Se extrajeron para análisis 16 muestras del grupo central las que dieron un promedio de 0,66 WO₃ en 0,77 m de ancho. El laboreo consiste en 240 m de avances y 70 m de piques y chimeneas. La parte explotada del pliegue representa un área de veta de unos 4000 m². Considerando una lente supuesta de hábito lenticular quedaría aún un área similar de reserva de veta. Se programó exploración por medio de 120 m de laboreo para reconocer 1600 m² de veta.

- *Mina César Augusto*. [Bassi y Terro, 1954]. Ubicada en el Dto. de San Alberto, Pedanía Panaholma. Su acceso se hace desde el camino de Taminga a Cura Brochero, 3 km antes de su intersección con el río Panaholma (almacén El Faro) por huella hacia el este, 9 km hasta la planta, situada sobre la margen derecha de dicho río; luego 9 km más hasta la mina. El ambiente geológico es micacita, gneis y pegmatita, de rumbo general NNO y buzamiento fuerte al este (Figura 7). En una corrida de rumbo ONO y 300 m de longitud hay diversos afloramientos de vetas buzantes al NNE 70°, aparentemente desconectadas entre sí. Al oeste, la veta del Coco reconocida por 17 m, con varias guías que se unen formando una lente corta. Al este, la veta La Quebrada, destapada con trinchera de 50 m y 4 m de profundidad; la veta con ancho inicial de 0,80 m se acuña y desaparece. La mineralización es scheelita y abundante granate. Las perspectivas no son alentadoras; de cualquier manera el laboreo de destape es escaso.

Distrito Ciénaga de Allende (Tabla 1)

Comprende una importante franja de yacimientos elongada en dirección NNO acompañando el borde occidental de la fractura Las Tapias-Altautina, la que prácticamente constituye el escalón de la serranía. La franja está bifurcada en dos ramas divergentes unidas al sur y separadas al norte hasta 6 km (Figura 9). La rama occidental, con 21 km de longitud, está formada, de norte a sur, por los siguientes depósitos: Triunfo, San Ignacio, Misterio, San José, Gringa, Carlota, Pilila, Extremeña, María Teresa, Catalina, Totito, Hilda, Anita y el punto de unión, Rita. La rama oriental, con 14 km de largo, comprende, de norte a sur, las siguientes minas: Pochita, Santa Bárbara, San Juan Bosco, Dita, Rubia, Valeria, Virgen del Carmen, Carmencita, Guango, Toyita, Bebé, Cuca, Salto, Cerro, Ensenadas y San Carlos. Las minas Siete Hermanos y Santa Ana, de dudosa ubicación, se encuentran en el extremo sur de la franja y probablemente desplazadas hacia el este.

Este distrito contiene, como lo apunta Olsacher [1972], los principales depósitos de scheelita de la región. Presenta un solo yacimiento de wolframita, mina San Ignacio, aunque probablemente el más importante en producción y potencialidad en WO₃ de la provincia.

Este borde de la sierra tiene abundantes manifestaciones pegmatíticas y numerosas lentes de caliza cristalina a las que se asocian gran parte de los yacimientos de tungsteno.

Unos de los problemas en la descripción del distrito es la carencia de ubicación fidedigna de los yacimientos, encontrándose localizaciones diferentes para un mismo depósito, según los autores que lo tratan.

- *Mina El Salto*. [Oliveri et al., 1953]. Su medio geológico es cuarcita micácea, micacita cuarzosa, migmatita, anfíbolita, caliza, diques y stocks pegmatíticos, muy tectonizados. Probablemente coincidiendo con un fracturamiento transversal que proyecta la falla Las Tapias-Altautina hacia el este. El yacimiento presenta tres sectores (Oeste, Central y Norte) en un desarrollo E-O de 350 m. El

Tabla 1. Minas del Distrito Ciénaga de Allende.

Nombre de mina y N° bibliográfico.	Ubicación	Medio geológico; yacimiento; laboreo; varios
El Triunfo 5	5 km al N de San Ignacio.	dos vetas N27°O, buz. 75 E, 0,20 m, corrida 200 m, wolframita, scheelita, Bi, pirita, en cuarzo; tres cortavetas (30 m), destapes.
San Ignacio 1-5	2,5 km al ONO del C° San José.	gneis y micacitas, N35° O, subvertical; tres mantos buz. 10-20° N, 0,10-0,20 m, corrida 600 m, wolframita, scheelita, Bi, pirita, calcopirita; varios km de galerías y piques; buenas perspectivas.
El Misterio 3	2 km al SO del Cerro San José.	micacitas, calizas y anfíbolitas; fajas mineralizadas en anfíbolitas, veta ppal. N-S, buz. 25° E, 0,50 m, corrida 300 m, epidoto, wollastonita, apatita, pirita, calcop. y Bi; trincheras prof. 20 m.
San José 5	7 km al ONO de Ciénaga Allende.	micacita, anfíbolita, lentes NS de caliza intersectadas por pegmatita; mineraliz. en contacto caliza, corrida 350 m (ídem Misterio), 1,50-5 m, scheelita, epidoto, granato; trincheras; buenas perspectivas.
La Gringa 2-3	3 km al SO del C° San José, A° Chaquincana.	micacita, calizas y anfíbolitas N-S; mineralizac. impregnando metamorfitas y cajas de caliza, corridas 150-200 m, espesor hasta 1 m, buz. 25-30° E, scheelita en cuarzo; socav. exploratorio y dos galerías (15 y 25 m).
La Carlota 2-3	800 m al sur de la Gringa.	micacita y calizas NNO buz. 30°E, pegmatita; dos vetas concordantes, 0,40-1 m, separadas 7 m, veta ppal. 300 m de corrida; scheelita, calcop. y epidoto, diseminados en caliza anfíbolizada y en micacita.
La Pítila 1-3	1 km al SE de La Carlota.	micacita muy plegada y fracturada y caliza verdosa; dos fajas mineralizadas N15°O en caliza y esquisto, 0,50-0,80 m; scheelita, calcita, epidoto, wollastonita diseminados; destapes.
La Extremadura 2-3	1 km al SE de La Pítila.	micacitas y calizas N 20°O, pegmatitas; 2 vetas concordantes, veta Este 0,30-0,80 m, veta O 1,30 m, scheelita, calcita, epidoto en anfíbolita.
María Teresa 1	1,5 km al NE de Altautina.	micacita alternando con cuarcita micácea NNO buz. 15° O, caliza concordante potente y filones pegmatíticos; 2 vetas en contacto de caliza, veta E corrida 150 m y 0,60 m, veta O 0,20-0,50 m, scheelita en ojos, calcita, cuarzo, tremolita, wollastonita y pirita; galerías y piques.
La Pochita 1	1 km al ONO de Sta. Bárbara (?).	micacita, granito poco al O; 2 vetas NNO buz. 30°E separadas 300 m, corrida intermitente 500 m, 0,40-1,20 m, scheelita, pirita, Bi, caolín, en cuarzo con intercalaciones de anfíbolita; chiflones hasta 50 m prof.
San Juan Bosco 2-7	3 km al NNO de Ciénaga de Allende (?).	micacita, cuarcita y gneis NNO buz. 45-65 E, borde E del stock granítico C° S. José; 3 vetas, de O a E: Dita corrida 400 m, a 400 m Dita-Rubia 1300 m corrida, a 300 m Bosco-Hércules 600 m corrida, espesores 0,20-0,80 y 2 m en Bosco; scheelita, turmalina, berilo, fluorita, pirita, calcop.; explotac. mayor en Bosco: 200 m longitud y 60 m profundo; buenas perspectivas.
La Toyita 1	1 km al N de El Salto.	esquistos micáceos N-S buz. 25°E; cuarzo concordante 0,80-1,20 m, turmalina fibrosa, clorita, scheelita, epidoto, biotita, calcita; pique 14 m, chiflones; produjo algunas toneladas de scheelita.
Las Enseñadas 6	3 km al E de Altautina.	esquistos, cuarcita, gneis y caliza intruídos por diques de apilita-pegmatita y cuerpos de pegmatita; a lo largo 1200 m y rumbo N-S, tres sectores con lentes de caliza: el norte 200 m de longitud y 30 m de ancho varias lentes, el central con 175 m dos lentes y el sur de 400 m de largo y 100 m de ancho con varias lentes, mineralización diseminada en bordes tectizados de caliza (y algo en caja esquistosa) dispuesta en clavos cortos y verticales es de scheelita; destapes y 200 m de laboreo subterráneo; perspectivas artesanales.
Catalina 3	500 m SO de Teresa.	veta N25°O, buz. 40° NE, 0,5-5 m, scheelita en ganga arcillosa-calcrea; 40 m de trincheras 2 m profundidad.
Totito 3	3 km al S de Catalina.	micacita cuarcosa y caliza; 2 fajas mineralizadas separadas 8 m, N 20° O, buz. 25 E, corrida 10 m, 0,50 m, scheelita y fluorita en anfíbolita.
Descada 3	al SE de Totito.	dos vetas N 20° O, buzamiento 50° NE, 0,20-0,30 m.
Noemí 3	al S de Totito.	1 veta N 20° O, buzamiento 45° NE, 0,15-0,25 m.
Hilda 3	2 km al sur de Totito.	faja mineralizada entre caliza y pegmatita N 15° O, buz. 25° O, corrida 100 m, 0,70 m, scheelita, pirita, fluorita, calcopirita, epidoto en anfíbolita talcosa; laboreo abundante, profundidad 50 m.
S. Carlos 3	500 m E de Hilda.	veta definida N 20° E, buz. 40° E, 0,05-0,10 m, mineral. ídem Hilda.
Anita 3	1 km al SSE de Hilda.	veta N25° E, buz. 45° E, 0,10-0,40 m en material calcáreo arcilloso friable, cuarzo, scheelita, epidoto, fluorita, wollastonita, calcopirita y pirita.
Prieto 3	ídem. Anita.	mizona corrida Anita; 2 piques cortos.
Santa Rita 3	2 km S de Hilda.	faja mineralizada N 20° O, buz. 30° O en micacita, scheelita diseminada.
Rubia 3	1 km NNO de Valeria.	veta N 25°O, buz. 15° NE, 0,10-0,20 m; 4 piques 4-10 m.
Valeria 3	3 km N de Salto.	veta NNO, buz. 45° NE, 0,10-1,00 m scheelita.
Carmencita 3	2 km NNE Salto.	dos guías paralelas 0,20 m, scheelita, dos socavones.
Guango 3	2 km N de Salto.	impregnación de scheelita en cuarcita micácea N 20° O, buz. 55 NE; 3 piques 3-6 m.
Bebé 3	400 m N de Salto.	2 guías 0,10-0,20 m, N25°E, buz. 85 NE, scheelita y cuarzo; socavón 4 m.
Cuca 3	200 m N de Salto.	guías, laboreo preliminar.
Cerro 3	1 km SSO Salto.	veta N35°O, buz. 50° NE, 0,08-0,20 m; scheelita, fluorita, cuarzo.
Siete Hermanos 3	12 km al NE de Villa Dolores.	cuarcitas micáceas y calizas N-S verticales, faja mineralizada 1,50 m, scheelita diseminada; labores preliminares.
Sta. Ana, Tota y Pedro 3	3 km al NNO de Siete Hermanos.	veta N 35° O, 0,30-0,35 m, scheelita en ganga caolínica.
Guitarra	0,5 km E 7 Hnos.	veta N 35° O, 0,30 m, scheelita en ganga caolínica.
Margarita	ídem Guitarra.	scheelita en cuarcita micácea; trincheras 30 m profundidad 3 m.

Números bibliográficos: 1, Angelelli (1950); 2, Angelelli (1948); 3, Olsacher (1972); 4, Oliveri et al. (1953); 5, Sister (1954); 6, Sister y Jutoran (1955, a); 7, Sister y Jutoran (1955, b).

- de Córdoba). *Revista Asociación Geológica Argentina*, 9, 4: 210-213.
- Lapidus, A. y N. Rossi, 1959. Las minas de tungsteno de Aguas de Ramón. Dirección Nacional de Geología y Minería, Anales X, 55 p. y 7 mapas, Buenos Aires.
- López, H., 1988. Informe de progreso n° 1, Area Pocho. Dirección General de Fabricaciones Militares, inédito, Buenos Aires.
- López, H. y R.J. Centeno, 1994. Areas de alteración hidrotermal en la Sierra de Pocho, Prov. de Córdoba. *Actas del Encuentro Internacional de Minería*, I: 49-51, Buenos Aires.
- Linares, E. y R.R. González, 1990. Catálogo de edades radiométricas de la República Argentina. Asociación Geológica Argentina. Publicaciones especiales. Serie B, Buenos Aires.
- Mapa Minero de la provincia de Córdoba 1:750.000, 1974. Subsecretaría de Minería, Buenos Aires.
- Martínez Ferrer, J., 1946. Los minerales de scheelita de la provincia de Córdoba. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 170 p., inédita, Córdoba.
- Martino, R.D., 1993. La faja de deformación "Guamanes": petrografía, estructura interna y significado tectónico, Sierra Grande de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 48 (1) 21-32.
- Martino, R., A. Guareschi y J. Sfragulla, 1997. Las anatexitas y las venas auríferas de Río Hondo, extremo sudoriental del Macizo de San Carlos, Córdoba, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 52 (4): 433-450.
- Miro, R., B. Torres y J. Boiero, 1986. Evaluación económica de la mina Diana. Dirección Nacional de Minería y Geología, Centro de Exploración Córdoba, inédito, Córdoba.
- Morelli, J., 1993. Síntesis petrográfica de algunas rocas de la Sierra de Pocho, Córdoba. Inédito. CIRGEO, Buenos Aires.
- Oliveri, J.C., H.N. Lucero y J.M. Terrero, 1953. Estudio geológico y minero del yacimiento de scheelita El Salto, Dto. S. Alberto, Ped. Panaholma, Pcia. de Córdoba. Dirección Nacional de Minería, carpeta 886, 11 p., inédito, Buenos Aires.
- Olsacher, J., 1960. Descripción geológica de la Hoja 20h, Los Gigantes (Prov. de Córdoba). Dirección Nacional de Geología y Minería, Anales XII, 48 p., Buenos Aires.
- Olsacher, J., 1972. Descripción geológica de la Hoja 21h, Cerro Champaquí, Prov. de Córdoba. Servicio Nacional Minero-Geológico, Boletín 133, 64 p., Buenos Aires.
- Pace Gigli, E., 1944. Yacimientos de minerales de plata, plomo y zinc en los departamentos de Minas y Cruz del Eje, provincia de Córdoba. Tesis doctoral, 145 p., Universidad Nacional de Córdoba, inédito, Córdoba.
- Quartino, B.J., Spiquermann J.P., Hurtado A.E. y M.G. López, 1981. Acerca de los factores en la formación de la cordierita. *Actas 7° Congreso Geológico Argentino*, IV: 953-965, Bs. As.
- Sabin, D.J., 1937. Gold mines in Patacón District, Córdoba Province, Argentina. Informe privado, inédito.
- Sister, R.G., 1954. Wolframio en la provincia de Córdoba. Zona Altautina - Ciénaga de Allende (Dto. S. Alberto, Pedanía Panaholma). Direc. Nac. de Minería, Carpeta 587, inédito.
- Sister, R.G. y A. Jutoran, 1955a. Informe del grupo minero Las Ensenadas, minas de scheelita La Esperanza y La Chichita, Dto. San Alberto, Pedanía El Carmen, Prov. de Córdoba. Dirección Nacional de Minería, Carpeta 314, inédito.
- Sister, R.G. y A. Jutoran, 1955b. Informe de las minas San Juan Bosco y La Dita, Pedanía de Panaholma, Dpto. San Alberto. Dirección Nacional de Minería, Carpeta 315, inédito.
- Stoll, W.C., 1963. Algunos yacimientos de tungsteno del Distrito Cerro El Morro. *Revista Asociación Geológica Argentina*, 18, 3-4: 121-128.
- Sureda, R.J., 1978. Las vetas de plomo, plata y zinc del distrito minero El Guaico en la provincia de Córdoba, República Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 33 (4): 299-324.

Manuscrito recibido y aceptado en diciembre de 2000.



**ACADEMIA NACIONAL DE CIENCIAS
EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES**

Autoridades

Académicos Titulares

Académicos Honorarios

Académicos Correspondientes en el Exterior

Académicos Correspondientes Nacionales

Secciones

Comisiones

Comisiones Especiales

Administración

ACADÉMICOS TITULARES

	Fecha de nombramiento
1 - Ingeniero ARTURO J. BIGNOLI	19-06-1965
2 - Doctor ANDRÉS O.M. STOPPANI	19-06-1965
3 - Ingeniero ARNOLDO J.L. BOLOGNESI	18-11-1967
4 - Ingeniero ROBERTO D. COTTA	18-10-1969
5 - Doctor ALEJANDRO J. ARVIA	19-05-1973
6 - Doctor HORACIO H. CAMACHO	19-05-1973
7 - Ingeniero HILARIO FERNÁNDEZ LONG	15-05-1976
8 - Doctor JUAN H. HUNZIKER	17-07-1976
9 - Doctor DANIEL R. BES	17-12-1977
10 - Ingeniero ROQUE SCARFIELLO	22-04-1978
11 - Doctor ROSENDO PASCUAL	18-12-1982
12 - Doctor EDUARDO G. GROS *	19-10-1985
13 - Doctor MARIO A.J. MARISCOTTI	25-04-1986
14 - Ingeniero HORACIO C. REGGINI	28-08-1987
15 - Doctor ALBERTO PIGNOTTI	27-05-1988
16 - Doctor RODOLFO R. BRENNER	24-06-1988
17 - Doctor CARLOS SEGOVIA FERNÁNDEZ	24-06-1988
18 - Doctor PEDRO J. AYMÓNINO	30-06-1989
19 - Doctor HUNER FANCHIOTTI	28-06-1991
20 - Ingeniero LUIS F. ROCHA	28-06-1991
21 - Doctor NORBERTO A. FAVA	29-11-1991
22 - Doctor JORGE E. WRIGHT	28-05-1993
23 - Doctor ÁNGEL R. LAROTONDA	27-08-1993
24 - Ingeniero FÉLIX J. LILLI	28-07-1995
25 - Doctor Ingeniero RAÚL A. LOPARDO	24-11-1995
26 - Doctora MARIANA D. WEISSMANN	31-05-1996
27 - Doctor ENRIQUE J. BARAN	31-05-1996
28 - Doctor EDUARDO H. CHARREAU	31-05-1996
29 - Doctor Ingeniero EDUARDO N. DVORKIN	31-05-1996
30 - Doctor ROBERTO L.O. CIGNOLI	24-04-1998
31 - Ingeniero EDUARDO NUÑEZ	28-08-1998
32 - Doctor VÍCTOR J. YOHAI	29-10-1999
33 - Doctora VIRPI S. NIEMELA	28-07-2000
34 - Doctor JOSÉ R. GALVELE	29-06-2001
35 - Doctor JORGE V. CRISCI (electo)	27-07-2001
36 - Doctor PEDRO N. STIPANICIC (electo)	27-07-2001

* Falleció el 12 de junio de 2001.

ACADÉMICOS

ACADÉMICOS HONORARIOS

Doctor **James W. Cronin** (Chicago, Illinois, Estados Unidos), Doctor **Leon M. Lederman** (Batavia, Estados Unidos), Doctor **César Milstein** (Cambridge, Inglaterra), Doctor **Ilya Prigogine** (Bruselas, Bélgica), Doctor **Frederick Sanger** (Cambridge, Inglaterra), Doctor **Luis A. Santaló** (Buenos Aires, Argentina), Doctor **Laurent Schwartz** (París, Francia).

ACADÉMICOS CORRESPONDIENTES EN EL EXTERIOR

Doctor **Petar Alaupovic** (Oklahoma City, Oklahoma, Estados Unidos), Doctor **Eduardo J. Ansaldo** (Saskatoon, Saskatchewan, Canadá), Doctor **Agustín Arévalo Medina** (La Laguna, España), Doctor **Francisco E. Baralle** (Trieste, Italia), Doctor **José Bernabéu Alberola** (Burjassot, Valencia, España), Ingeniero **Vitelmo V. Bertero** (Berkeley, California, Estados Unidos), Doctor **David I. Blockley** (Bristol, Inglaterra), Profesor **Vinicio Boffi** (Roma, Italia), Doctor **Luis A. Caffarelli** (Princeton, New Jersey, Estados Unidos), Doctor **César A. Carranza Saravia** (Lima, Perú), Doctor **Eduardo E. Castellano** (San Carlos, San Pablo, Brasil), Doctor **Mischa Cotlar** (Caracas, Venezuela), Doctor **John C. Crowell** (Santa Barbara, California, Estados Unidos), Doctor **Héctor R. Croxatto** (Santiago, Chile), Doctor **Britton Chance** (Philadelphia, Pennsylvania, Estados Unidos), Dr. **John W. Daly** (Bethesda, Maryland, Estados Unidos), Doctor **Ubiratán D'Ambrosio** (Campinas, Brasil), Doctora **Angela F. Danil de Namor** (Guildford, Surrey, Inglaterra), Dr. **Walter F. Davidson** (Ottawa, Ontario, Canadá), Ingeniero **Don U. Deere** (Gainesville, Florida, Estados Unidos), Profesor **Patrick J. Dowling** (Guildford, Surrey, Inglaterra), Doctor **Horacio A. Farach** (Columbia, South Carolina, Estados Unidos), Profesor **Emanuele Fumagalli** (Vancouver, Canadá), Doctor **Francisco Giral** (México, México), Doctor **Miguel de Guzmán Ozamiz** (Madrid, España), Doctor **Bernard L. Horecker** (Fort Myers, Florida, Estados Unidos), Doctor **Derek Horton** (Washington D.C., Estados Unidos), Doctor **Shyam L. Kalla** (Maracaibo, Venezuela), Doctor **Marcus Karel** (Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos), Doctor **Ephraim Katzir** (Tel-Aviv, Israel), Doctor **José Leite Lopes** (Río de Janeiro, Brasil), Ingeniero **Giovanni Lombardi** (Locarno, Suiza), Doctor **Manuel Lora-Tamayo** (Madrid, España), Doctor **Emilio Lluís Riera** (México, México), Ingeniero **Mauricio Matos Peixoto** (Río de Janeiro, Brasil), Doctor **James R. Mattoon** (Colorado Springs, Colorado, Estados Unidos), Ingeniero **Victor F.B. de Mello** (San Pablo, Brasil), Profesor **Marvin Minsky** (Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos), Profesor **Marcos Moshinsky** (México, México), Profesor-Doctor **Achim Müller** (Bielefeld, Alemania), Doctor **Daniele Mundici** (Milán, Italia), Doctor **Eduardo L. Ortiz** (London, Inglaterra), Doctor **Norberto J. Palleroni** (Norths Caldwell, New Jersey, Estados Unidos), Doctor **Peter H. Raven** (St. Louis, Missouri, Estados Unidos), Doctor **Lázaro Recht** (Caracas, Venezuela), Doctor-Ingeniero **Jorge Riera** (Porto Alegre, Brasil), Doctor **Sixto Ríos García** (Madrid, España), Doctor **Juan G. Roederer** (Fairbanks, Alaska, Estados Unidos), Doctor **Igor Saavedra** (Santiago, Chile), Doctor **Victor A. Sardi Socorro** (Caracas, Venezuela), Doctor **Edward C. Slater** (Southampton, Inglaterra), Doctor **Peter Thieberger** (Upton, New York, Estados Unidos), Doctor **Antonio F. R. de Toledo Piza** (San Pablo, Brasil), Doctor **Sergio Trasatti** (Milán, Italia), Ingeniero **Milton Vargas** (San Pablo,

**COMISIÓN ESPECIAL DE
RELACIONES INSTITUCIONALES E INTERNACIONALES**

Miembros: Dr. Pedro J. Aymonino, Dr. Huner Fanchiotti e Ing. Félix J. Lilli.

**COMISIÓN ESPECIAL DE
POLÍTICA CIENTÍFICA**

Presidente: Dr. Andrés O.M. Stoppani.

Miembros: Dr. Alejandro J. Arvia, Dr. Eduardo H. Charreau, Dr. Mario A.J. Mariscotti, Dr. Rosendo Pascual, Ing. Horacio C. Reggini, Dr. Carlos Segovia Fernández y Dra. Mariana D. Weissmann.

ADMINISTRACIÓN

Secretario Técnico: Dr. Juan Carlos Vallés.

Secretario Administrativo: Sr. Mariano G. Fernández Alt.

Bibliotecaria: Sra. Diana L. Pallini.

Auxiliares: Srta. Patricia N. López, Srta. Beatriz L. Manso y Sr. Ramón Berón.