

Dr. Bernardo Grossling

Geología de Petróleo de la formación Springhill en el Distrito Springhill, Magallanes

(Continuación)

2) ESTRATIGRAFIA DEL DISTRITO SPRINGHILL

2.1) *Complejo porfirico*

A lo largo de una gran extensión del flanco oriental de la cordillera patagónica —desde la Isla de los Estados hasta más al norte de la latitud 44°— y en marcada discordancia sobre los esquistos paleozoicos, se presentan pórfidos cuarcíferos, porfiritas y tobas que se han llamado Complejo porfirico en Argentina y Serie tobífera durante la prospección petrolífera en Magallanes. Se extiende también esta serie por el subsuelo de la Patagonia extra-andina, descansando posiblemente sobre el basamento cristalino o sobre rocas metamórficas o sedimentarias del Paleozoico y Mesozoico hasta el Líasico, y por debajo de los sedimentos terciarios y cretáceos.

Las secciones que han sido reconocidas, aunque en forma muy somera, durante la prospección petrolífera, se encuentran en Seno Ultima Esperanza, Canal Gajardo, Bahía Brooks y Seno Almirantazgo. Parece que su sección inferior está compuesta principalmente por rocas efusivas y su superior por sedimentos piroclásticos. La sección efusiva, que podría tener varios cientos de metros de espesor, es masiva y está formada por pórfidos cuarcíferos que, debido al metamorfismo, pasan a porfiroides sericíticos y esquistos sericíticos hacia el oeste. En Monte Buckland, Kranck (14) observó un conglomerado o brecha basal donde el complejo se asienta sobre los esquistos metamórficos. Y la sección principalmente sedimentaria es bastante bien estratificada, está compuesta por tobas silicificadas y rocas bentoníticas, que en su parte superior contienen capitas de arenisca de grano grueso cuarzoso. Según Feruglio, su espesor a lo largo de la cordillera sería del orden de varios cientos de metros, que bien podría ser de varios miles de metros si fueran correctas las estimaciones de Thomas en el Canal Gajardo.

En la Patagonia extra-andina el complejo eruptivo es de acumulación subaérea, compuesto por coladas y masas de pórfido cuarcífero y queratófiro alter-

(14) Kranck, E. H.: *Geological investigations in the cordillera of Tierra del Fuego*. Acta Geographica 4, N.º 2, Helsinki, 1932.

nando con tobas y areniscas tobíferas. Los fósiles más comunes son *Estheria*, *Araucaria mirabilis* y *Hausmannia*, encontrados en zonas expuestas de la Patagonia argentina. Numerosos pozos perforados en el distrito petrolífero de Springhill han tocado y atravesado parte del complejo. El pozo CM-2 atravesó unos 1.000 m. de él, que hasta ahora se han descrito como sedimentos continentales de origen volcánico transportados por agua, con granos dispersos de cuarzo esmerilado y subangular. Predominarían las arcillas untuosas verdes y blancas con material silíceo, que podrían derivarse de la descomposición de cenizas volcánicas. Hay frecuentes restos vegetales y carbonosos. Recientemente se han identificado mantos de pórfido cuarcífero en algunos testigos, y es posible que los pórfidos sean más frecuentes de lo que se pensó originalmente. En el pozo SS-1 y en varios otros pozos perforados en Península Espora, también se han encontrados pórfidos tanto aflorando en la platea porfírica como dentro de las pocas decenas de metros que han penetrado esos pozos. A juzgar por el pozo CM-2, parecería que en la parte norte de Tierra del Fuego los 1.000 metros atravesados corresponderían a la sección superior principalmente sedimentaria de la Serie tobífera.

En Lago Argentino (15), la parte superior del complejo engrana con tobas y sedimentos arcillolíticos marinos del Kimmeridgiano o Titoniano. Durante el Neocomiano se producen erupciones submarinas con algunas inyecciones porfíricas. En Lago San Martín (16) se ha observado una transición entre los sedimentos volcánicos y marinos. Allí la serie marina, en su parte inferior, se inicia con tobas, areniscas tobíferas, bancos conglomerádicos, arcillas tobíferas y delgadas lentes de carbón. A 118 metros sobre la base comienzan los fósiles marinos: *Eriphyla* sp., *Cucullaea* sp., *Pecten* sp. y *Belemnopsis patagoniensis* (Titonense).

Según Feruglio, la mayoría de los autores estima que el complejo abarca desde el Lías o Dogger hasta el neo-Jurásico, Titoniano. En el complejo tal vez está representado más de un ciclo eruptivo, pero no hay antecedentes suficientes para definir esta cuestión.

2.2) Complejo neojurásico-infracretácico o Andico

Normalmente, descansando sobre la Serie porfírica y en una banda a lo largo de la vertiente oriental de la cordillera —desde más allá de Lago Pueyrredón hasta la Isla de los Estados— se extiende un complejo sedimentario marino que comprende desde el Titoniano al Neocomiano. También se le encuentra en la parte austral del archipiélago fueguino y en un trecho de la vertiente occidental de la cordillera al norte del Estrecho. Se extiende por el subsuelo de la Patagonia extra-andina hasta el Lago Cardiel y Río Chico, Santa Cruz, en el norte y hasta el borde atlántico hacia el este. Consiste principalmente en arcillas generalmente duras, de color gris oscuro a negro, a menudo arenosas y silíceas, con fractura irregular y astillosa.

Varios nombres han sido propuestos para designar este complejo sedimentario; algunos de carácter local como Capas de río Mayer y Serie Pueyrredón, por Hatcher; y Esquistos Meseta, por Stolley; otros de referencia estratigráfica

(15) Feruglio, E.: *Descripción geológica de la Patagonia*. Vol. I, p. 156.

(16) Feruglio, E.: Ob. cit., p. 173.

(17) Groeber, P.: *Observaciones geológicas a lo largo del meridiano 70.1 Hoja Chos Malal*. Rev. Soc. Geol. Arg., vol. I, N.º 3, Buenos Aires, 1946.

como Serie límite, por Decat-Pomeyrol. Pre-Remarcable de Hollister y Pre-Valdez de Thomas, y otras de carácter faunístico, como estratos con *Inoceramus Steinmmani*, por Wilckens. Sería conveniente tener una denominación general, y se podría aceptar el nombre Andico sugerido por Groeber (17).

En la provincia sólo se han efectuado unas pocas determinaciones faunísticas del Cretáceo inferior en lugares dispersos en la vertiente oriental de la cordillera, y al sur del archipiélago fueguino. Al norte del Lago Fagnano, Doello Hurado (18) ha encontrado en una caliza:

Aucellina caucásica v. Buch. var. *striata* Richter,
Kingena cf. *lima* Defr.,
Parahibolites fueguensis Stoll,
además: radiolarios y restos de foraminíferos,

y que, según Stolley, indicarían Aptense o Genomanense inferior. En el pie oriental del Cerro Paine, Hauthal (19) encontró una amonita:

Leopoldia paynensis,

que, según Favre, es comparable a una forma europea del Hauterivense inferior. Cecioni, como veremos más adelante, ha identificado del Hauteriviano hasta el Coniaciano en el Seno de Ultima Esperanza y del Albiano al Aptiano superior en la zona del Lago Blanco, Tierra del Fuego. Tal vez el único lugar en que se han encontrado fósiles determinables al sur de la cordillera es Bahía Tekenika, Isla Hoste, donde Halle (20) indica restos de plantas:

Sphenopterys hymenophylloides,
Dictyozamites cf. *falcatus*,

que asigna al Jurásico medio. En Lago Argentino, Santa Cruz, se ha comprobado la presencia de varios subpisos del Titonense hasta el Senonense (21). En la Isla de los Estados, Feruglio y en Bahía Orange, Stolley han determinado el Titonense.

Feruglio (22) en base a las determinaciones paleontológicas efectuadas concluye que la edad del complejo es neojurásica-cretácica inferior.

Aún no está bien definida la posición estratigráfica de las capas con *Inoceramus steinmmani*; pero parece estar demostrado que esta especie sólo se encuentra en una zona intermedia de los sedimentos cretáceos. En Lago Argentino hay otras especies de *Inoceramus* que se presentan en el complejo a partir de su parte basal, pero los horizontes con *Inoceramus steinmmani* Wilck e *I. andinus* Wilck ocurren sólo a cierto nivel estratigráfico sobre la Serie porfírica. De modo que no es apropiada la designación faunística de capas con *Inoceramus stein-*

(18) Feruglio, E.: Ob. cit., pp. 164/168.

(19) Feruglio, E.: Ob. cit., pp. 164/168.

(20) Halle, C. Th.: *Some mesozoic plant bearing deposits in Patagonia and Tierra del Fuego and their floras*. Kungl. Svensk. Vetensk. Akad. Hand. Bd. 5, N.º 3, Upsala and Stockl., 1913.

(21) Feruglio, E.: Ob. cit., pp. 168/170.

(22) Feruglio, E.: Ob. cit., p. 162.

manipara designar un complejo de mayor amplitud. Según Heinz (23) esta especie vivía durante el Turoniano superior hasta el Senoniano inferior (Santoniano) y por otro lado Reeside (24) llama las colecciones con esta especie de edad Santoniana; por lo tanto, pueden ser en parte posteriores al complejo titoniano-infractetáceo.

El complejo se extiende hacia el norte y adquiere a partir de cierta latitud geográfica un carácter marino (25). En Lago Cardiel tiene un carácter francamente de transición marino-continental, alternándose arcillas con intercalaciones de areniscas y tobas, alrededor de 500 metros de potencia. En Lago San Martín el complejo, con un espesor total del orden de 1.000 metros, adquiere un carácter continental en su parte inferior, Titonense, y en Lago Argentino es enteramente marino, espesor de más de 1.350 metros. En el pozo Piedra Clavada se encontraron arcillas grises y negras, bituminosas, con capitas de arenisca fina y arcilla tobífera y con una arenisca en la base, en total 640 metros que corresponden al complejo.

Ciertos esquistos metamórficos presentes en la cordillera parecen corresponder a sedimentos metamorfoseados de origen posterior al de la serie porfírica. Se trata en general de sedimentos oscuros y aspecto filítico, en gran parte arcillas, de carácter tuftítico en la sección inferior. Comprenden pizarras arcillosas, ftanitas con radiolarios, pizarras arcillosas y areniscosas o calcáreas y grauvacas. Las grauvacas contienen abundantes detritos de rocas volcánicas básicas. Según la mayoría de los autores la edad de estas rocas es cretácea o jurásico-cretácica (26). Por su nítida estratificación y carácter petrográfico indican depositación en aguas no cercanas a la costa. Su origen marino queda demostrado por la presencia de microfósiles: radiolarios y globigerinas. Kranck (27), quien ha estudiado este grupo de rocas, introdujo los conceptos de formación Buckland, presente en la península de Buckland, y formación Yaghan, presente en parte de las islas Hoste y Navarino y al sureste de la cordillera Darwin. Según Kranck, la formación Yaghan corresponde a parte de la formación Buckland. En monte Buckland ha encontrado la siguiente secuencia, en ordenación normal, de arriba hacia abajo:

Muchos cientos de metros.....	Esquistos arcillosos filíticos, carbonosos y oscuros, con abundantes restos de radiolarios.
150 metros	Tobas felsíticas de aspecto cuarcítico, que alternan en su parte superior con esquistos arcillosos.
200 metros	Pórfidos cuarcíferos milonitizados con sus tobas y conglomerados, éstos con-

(23) Heinz, R.: *Ueber die Oberkreide - Inoceramen Sudamericas und ihre Beziehungen Zu den Europas und anderer Gebiete*. Mitt. Min. Geol. Staats instituts zu Hamburg, Heft 10, pp. 41/100, 1928.

(24) Reeside, J. B.: *Report on referred fossils*. June 16, 1950, Inf. Inédito.

(25) Feruglio, E.: Ob. cit., pp. 168/179.

(26) Feruglio, E.: Ob. cit., p. 162.

(27) Kranck: Ob. cit.

teniendo elementos de esquistos antiguos.

Base Esquistos metamórficos.

De modo que efectivamente los esquistos estarían sobrepuestos a los pórfidos y tobas y habría una transición gradual entre ambos.

Las perforaciones efectuadas en la zona extra-andina han encontrado también sedimentos del Cretáceo Inferior. En los pozos Puerto Coig y Cabo Buen Tiempo, Santa Cruz, se atravesaron alrededor de 200 metros de sedimentos turonianos-titonianos descansando sobre la plataforma tobífera, y en los pozos perforados en el distrito Springhill, alrededor de 750 metros. En ese distrito se distinguen las siguientes formaciones que se asignan al complejo titoniano-infracretáceo:

<i>Arcillas intermedias</i>	Arcillas oscuras y parduzcas, carbonosas, que descansan sobre la Serie tobífera. Cecioni y Fuenzalida han identificado en ellas una flora de Bennetitalles, que pertenecería al Jurásico medio o superior.
0 hasta 80 m. penetrados hasta la fecha.	

<i>Formación Springhill</i>	Areniscas de cuarzo, de carácter continental en su parte inferior y marino en su parte superior. Cecioni ha identificado la siguiente fauna:
0 — $\pm$ 30 metros	Exogira sp., Belemnopsis patagoniensis Favre, Paraduvalia sp., Neithea sp., Lucina? Ostrea, Cardium?

<i>Estratos con Favrella Steinmanni</i>	Arcillas gris-parduzcas, con brillo aceitoso, bien laminadas. Cecioni ha identificado la siguiente fauna:
$\pm$ 70 metros	Bennettitales, Lucina sp., Cardium sp., Aucellina bonarelli Fer. Favrella steinmanni (Favre), Isoarca? Bernasella? Duvalia o Paraduvalia sp., Favrella americana (Favre), Criocerás sp., Belemnopsis patagoniensis Favre, que considera del Hauteriviano.

<i>Arcillas con pintas</i> + 130 metros	Arcilla gris, arcilla bituminosa parda, arcilla margosa gris. Algunos bancos delgados de caliza color chocolate. En la base, 17 m. de arenisca glauconítica.
<i>Creta Dura</i> + 100 metros	Marga blanca a gris verdosa, abundante microfauna y bancos de <i>Inoceramus</i> . Cecioni ha identificado la siguiente fauna: <i>Lucina</i> sp., <i>Aucellina bonarelli</i> Fer. que considera del Barremiano o Aptiano.
<i>Lutita gris verdosa</i> + 410 metros	Arcilla gris uniforme. Frecuentes bancos de <i>Inoceramus</i> . Abundante microfauna. No se ha podido determinar la edad de esta formación, pero generalmente se le ha considerado perteneciente al Cretáceo Inferior.

2.3) Complejo neocretácico

En la pre-cordillera aflora un potente paquete sedimentario que abarcaría desde el Turoniano hasta el Daniano. En cambio, en el distrito Springhill tal vez sólo unos 60 metros de sección corresponderían a estas formaciones:

<i>Lutita arenosa</i> (60 metros)	Arcilla gris glauconítica y delgadas guías de arenisca fina.
--	--

La explicación de por qué las formaciones neocretácicas presentan tan reducido espesor en el flanco occidental de la cuenca —que es donde se encuentra el distrito Springhill— es de gran interés para la geología de petróleo de esas formaciones. Pero ya que su relación es muy remota con los recursos petrolíferos de la formación Springhill no parece necesario entrar en esta oportunidad en mayores detalles sobre su litología.

Por igual motivo se describirá a continuación muy brevemente la estratigrafía de las formaciones terciarias presentes en el distrito Springhill. El efecto de los movimientos terciarios sobre la migración de flúidos en la formación Springhill se discutirá más adelante (§ § 3.2, 3.4 y 5.2)

2.4) Sedimentos terciarios

Barwick distingue un grupo inferior, Bahía Inútil, y otro Superior, Balmaceda. El grupo Bahía Inútil consiste principalmente en sedimentos marinos, con abundante microfauna, que según Kniker corresponderían al Eoceno Superior y Mioceno. El grupo Balmaceda está formado principalmente por sedimentos continentales con algunas areniscas y arcillas marinas.

Grupo Bahía Inútil:

<i>Formación glauconítica</i> (140 m.)	Arcillas grises oscuras, glauconíticas y areniscas finas.
<i>Formación Discordia</i> (130 m.)	Arcilla gris glauconítica. Bancos delgados de caliza.
<i>Formación Puerto Nuevo</i> (85 m.)	Arcilla gris, glauconítica hacia la base.

Grupo Balmaceda:

<i>Formación Caupolicán</i> (320 m.)	Arcilla arenosa gris, con rastros de glauconita, impresiones de plantas y materia carbonosa. Areniscas arcillosas glauconíticas. Bancos delgados calcáreos.
<i>Formación Brush Lake</i> (200 m.)	Arcilla gris clara, abundante microfauna. Bancos delgados de caliza.
<i>Formación China Creek</i> (290 m.)	Arcilla arenosa verde a gris verdosa, con impresiones de plantas y gasterópodos. Areniscas y arcillas carbonosas.
<i>Formación Side</i> (230 m.)	Tobas blancas, amarillas y verdeclaras. Con areniscas y arcillas hacia la base.

<i>Pleistoceno</i> (0—más de 200 m.)	Depósitos glaciales.
--------------------------------------	----------------------

Debido a la fuerte convergencia de las secciones cretácica y terciaria hacia el este en el distrito Springhill, que es permitida en gran parte por variación de espesor de la sección terciaria, no es posible indicar cifras de espesor significativas para todo el distrito. Las cifras de espesor indicadas corresponden a la Península de Espora.

3) ESTRUCTURA DEL DISTRITO - SPRINGHILL

3.1) *Tectónica pre-cretácica*

Debido a que pocos pozos han penetrado en las formaciones pre-cretácicas del Distrito Springhill, y a que, los que lo han hecho, ha sido en decenas de metros solamente, no es posible definir adecuadamente la tectónica de estas rocas con observaciones de sub-superficie. En cambio, los extensos levantamientos sísmicos de reflexión que se han efectuado durante los últimos diez años permiten apreciar el grado de complejidad estructural. En los sismogramas obtenidos en este distrito se registran frecuentemente pulsos de reflexión provenientes de debajo del Horizonte Springhill, aunque no siempre se ha trabajado esta parte de los sismogramas. En el valle de San Sebastián, donde los sismogramas son de excelente calidad, los sismólogos de United han colocado en las secciones transversales la

mayoría de los pulsos de reflexión, y es utilizando estas secciones que he podido establecer ciertas notables características de la tectónica pre-cretácica en el centro de Tierra del Fuego.

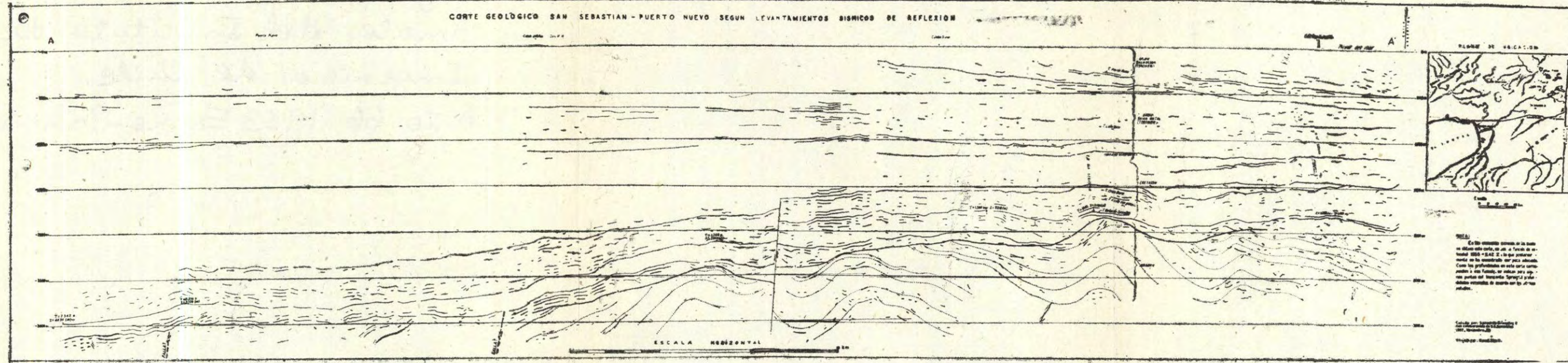
Para poder apreciar las variaciones estratigráficas —reflejadas en el espectro de reflexiones— y la configuración estructural regionales he recurrido al expediente de contraer cinco veces la dimensión horizontal de las secciones sísmicas respecto a la vertical. He escogido el perfil más extenso en dirección este-oeste de que disponemos, y que corre desde la costa de Bahía Inútil, algunos kilómetros al oeste de Puerto Nuevo, hasta la frontera argentina, cerca de la Estancia San Sebastián. Mediante un análisis de este perfil, AA', discuto a continuación la tectónica pre-cretácica; la figura 3.1 es una reducción fotográfica de él.

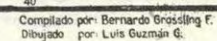
Bajo el Horizonte Springhill —que se ha identificado en el pozo SS-1— se observa una importante discordancia angular y erosional, que debería corresponder a un ciclo pre-cretácico de orogénesis. La sección pre-cretácica está plegada en anticlinales asimétricos, con planos axiales ligeramente inclinados al noreste y con algunas fallas. Regionalmente, en el valle de San Sebastián, la estructura consiste en un amplio arco o geoanticlinal, cuyo eje corre en dirección N 45° O, con varios plegamientos subsidiarios. Al este de una línea que une las Estancias San Sebastián y China Creek el manteo es principalmente al noreste. La parte más alta del geoanticlinal es relativamente plana, de un ancho del orden de 25 km., con dos ejes subsidiarios de plegamiento, y por lo menos una falla normal en su borde occidental. Desde Cañadón Grande al oeste, la sección manteea principalmente en esa misma dirección. Esta configuración estructural pre-cretácica es concéntrica con el arco de la cordillera, lo cual indicaría, al igual que el ligero volcamiento de los planos axiales, que los esfuerzos que la generaron provinieron de la cordillera central. Veremos más adelante que esto contrasta con la ausencia de un lineamiento estructural bien definido en los horizontes cretácicos.

Una cuestión de gran importancia es la relación del Horizonte Springhill con esta discordancia regional que se observa en las secciones sísmicas. El concepto que se tiene es que este horizonte, como se entiende actualmente, debería corresponder precisamente a la discordancia, marcando la transgresión marina del Neocomiano, después de la depositación de los sedimentos continentales de la Serie Tobífera y de un período de peniplanización. Sin embargo, hay varias dificultades para aceptar esta opinión. En primer lugar, ha sido una observación general de los sismólogos que han trabajado en la zona que la sección inmediatamente debajo del Horizonte Springhill, hasta unos 200 a 300 metros, es concordante con él. Por otro lado, los pozos no siempre han encontrado la formación Springhill descansando directamente sobre los sedimentos volcánicos de la Serie Tobífera, sino que en varios se ha encontrado una intercalación de arcillas negras y cafés, de origen continental y con delgadas intercalaciones de arena. En el área de Chañarcillo, por ejemplo, alcanzan un desarrollo de 80-90 m. Finalmente, y tal vez ésta es la cuestión más importante, la discordancia regional que se observa en las secciones sísmicas en el valle de San Sebastián, corte AA' (fig. 3.1), está decididamente por debajo del Horizonte Springhill, separada por un intervalo de espesor variable que aumentaría considerablemente hacia el oeste, hasta más de 350 m.

Como sería de cierta trascendencia el hecho que la discordancia regional más importante se encontrara más abajo que el Horizonte Springhill, es neces-

Corte Geológico San Sebastián - Puerto Nuevo según levantamientos sísmicos de reflexión





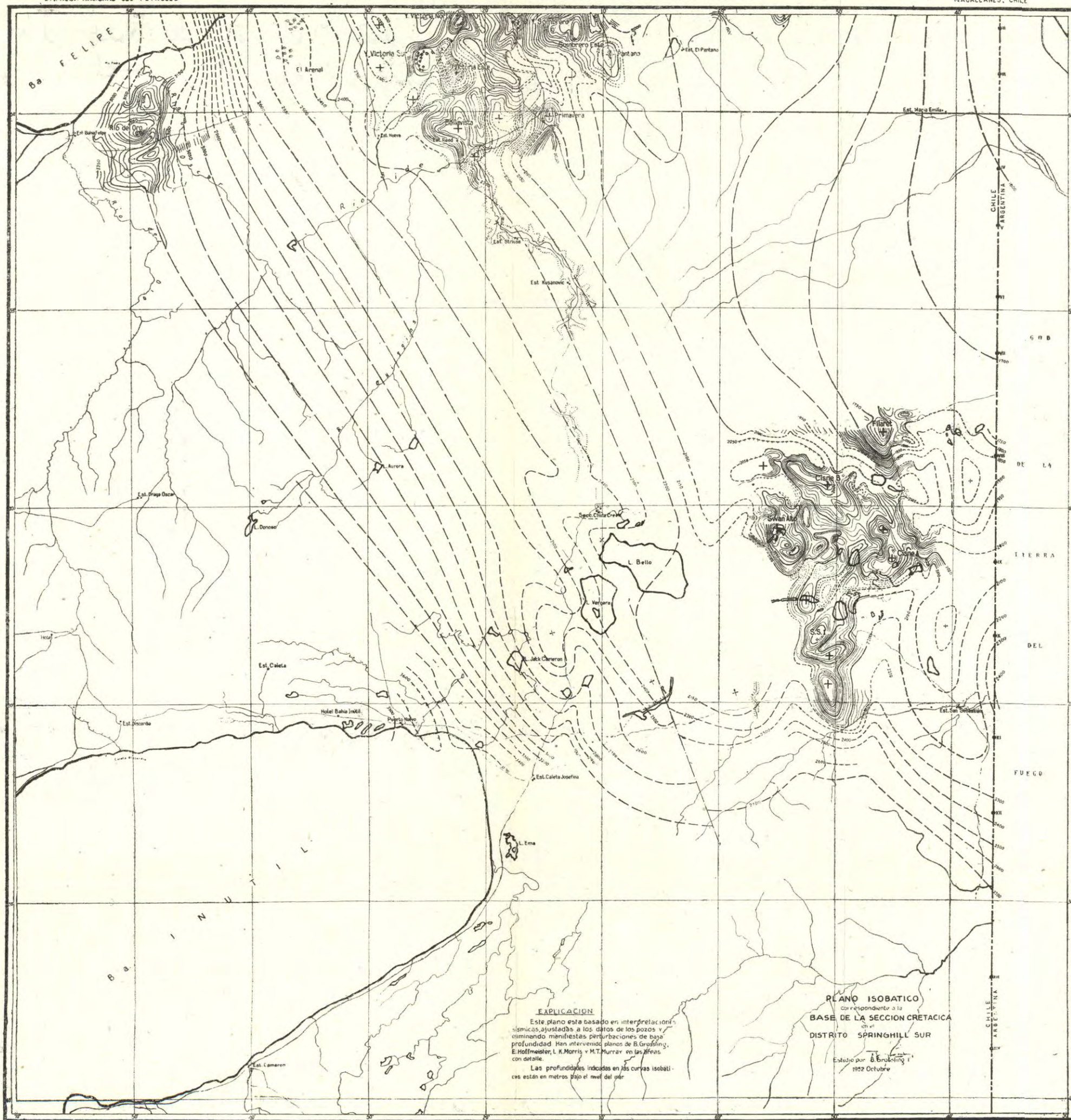


Fig. 3.3

rio reexaminar cuáles son las otras posibilidades de explicación. La concordancia, según los sismogramas, del horizonte con la sección inmediatamente inferior, podría explicarse suponiendo que el transiente reflejado por la zona de discordancia fuera múltiple, lo que se llama un «wavelet», y de gran intensidad; de este modo se introduciría una sección concordante ficticia, que en cierto modo correspondería a repeticiones de la discordancia. Sin embargo, este no siempre es el caso, ya que en ciertos lugares la discordancia parece llegar justamente por debajo del pulso del Horizonte Springhill. Por otro lado, sería importante establecer con datos de geología de sub-superficie cuál es la relación de las arcillas intermedias negras y cafés con el Horizonte Springhill, y si los intervalos estratigráficos varían o no. Con la poca evidencia que hay en el presente, parecería que no hay entre ellos una discordancia importante, y como además la sedimentación de estas arcillas está más relacionada con los elementos continentales de la formación Springhill que con la Serie Tobífera, entonces bien pudiera ser que la discordancia regional se encontrara bajo estas arcillas intermedias.

Si se confía en la identificación de la discordancia mediante las secciones sísmicas, resulta que el relieve de ella es bastante importante y corresponde a la configuración estructural pre-cretácica; de tal modo que han existido altos topográficos sobre los pliegues anticlinales. Hay un recubrimiento progresivo, hacia el este, de las arcillas intermedias sobre la discordancia.

La naturaleza de la sección intermedia es una cuestión de suma importancia desde el punto de vista de acumulación de petróleo. La transgresión progresiva, hacia el este a lo largo del perfil AA', puede presentar en la base algún conglomerado poroso. La sección de arcillas intermedias, perforadas en la Península de Espora, presenta delgadas intercalaciones de areniscas que pueden tener un mayor desarrollo en algunas zonas o llegar también a ser de importancia cuando sea suficientemente potente la sección de estas arcillas con intercalaciones. La zona meteorizada y lixiviada en la superficie de discordancia puede presentar porosidad, particularmente donde existieron altos topográficos. Todas estas posibles capas de acumulación, próximas al Horizonte Springhill donde se ha encontrado petróleo y gas en un extenso territorio, son naturalmente de gran interés. Los principales problemas planteados por estas especulaciones son:

- 1) Se encuentra o no la discordancia regional de mayor importancia por debajo de lo que hasta ahora hemos llamado formación Springhill;
- 2)Cuál es la naturaleza de la sección intermedia, en caso de que exista, y cuál es el desarrollo de sus intercalaciones de areniscas; y
- 3) Naturaleza de la zona de discordancia, especialmente en cuanto a porosidad secundaria

3.2) *Tectónica formaciones cretácicas*

Para definir la configuración estructural de las formaciones cretácicas disponemos de los antecedentes de los pozos perforados, de los levantamientos sísmicos de reflexión y refracción y de los levantamientos gravimétricos. Coordinando estos antecedentes he logrado un cuadro estructural del Distrito Springhill, en sus partes Norte y Sur, usando como referencia el Horizonte Springhill (figuras 3.2 y 3.3).

Este cuadro adolece de algunos defectos debidos principalmente a: 1) des-correcciones regionales de profundidad por variaciones de velocidades, 2) exis-

tencia de fluctuaciones locales ficticias del horizonte causadas por irregularidades del manto glacial, y 3) al error probable que, al igual que cualquier método experimental, tienen los levantamientos sísmicos. En las zonas donde hay escaso control se ha aumentado el intervalo entre isobáticas, siendo su trazado naturalmente una generalización de la realidad.

En sus rasgos más generales, la configuración estructural es un extenso monoclinial que desde el límite internacional mantea hacia el centro de la cuenca. Tanto en las secciones transversales (fig. 3.1), como en los planos isobáticos, se observan acentuamientos de la pendiente regional, en tal forma que se define un sistema de terrazas inclinadas. La terraza más oriental, en territorio chileno, desciende de —1.800 (28) en las vecindades de Cabo Espíritu Santo a —2.000 metros en su borde occidental que pasa por Sombrero Este y Filaret. Esta terraza desciende, hacia el oeste, 100-200 m. Los actuales yacimientos, las estructuras Punta Baja, Manantiales Sur, Bellavista, el área del Arenal, las estructuras de Cisne, Swan Alto y San Sebastián se encuentran en la segunda terraza. El descenso hacia la tercera terraza, de 500-700 m., se inicia al oeste de las estructuras de Delgada y Punta Baja y de la Estancia China Creek y de Cañadón Grande. Tan sólo el borde oriental de la tercera terraza, de profundidad de 3.100 m., está representado en las figuras 3.2 y 3.3, e incluye el área de Bahía Santiago, la estructura de Río de Oro y el área en las vecindades de Puerto Nuevo.

A pesar de que el control para definir la configuración estructural regional del Distrito Springhill es algo escaso, la interpretación que he hecho está en cierto modo reforzada por la uniformidad de condiciones desde Delgada a la Península de Espora y al valle de San Sebastián. Sin embargo, la realidad bien podría ser bastante distinta en ciertas zonas donde prácticamente hay poco o ningún control. En el extremo norte del distrito es de interés cualquier modificación que haya que hacer al cuadro regional presentado, ya que esto modificaría la extensión de territorio en que el horizonte productor se encuentra a profundidad económica de perforación. El cuadro aquí presentado satisface en cierto modo los antecedentes de refracción obtenidos por ENAP e Y. P. F., los datos de los pozos y las indicaciones de trabajos de «dip-shooting» al norte de Delgada y desde la frontera hasta Río Gallegos. El único antecedente de que disponemos, en territorio chileno, al sur de San Sebastián, es un perfil sísmico en Río Chico, de modo que el cuadro presentado podría también requerir modificaciones en el extremo sur del distrito.

Para apreciar cómo el Horizonte Springhill está distribuido entre diferentes intervalos de profundidades, he preparado un gráfico de frecuencia de distribución de áreas (fig. 3.4). Se ha tomado como 100% el área, en territorio chileno, hasta la profundidad de —3.000 m., que es de 10.300 km.². De esta área, 2.900 kilómetros cuadrados se encuentran cubiertos por aguas del Estrecho. El gráfico indica que hay un pronunciado máximo entre —2.100 y —2.200 m., que es el intervalo de profundidades más frecuente; un 14,4% del área total se encuentra en él. El efecto de las terrazas está oscurecido en parte, en el gráfico, por la forma

(28) Las profundidades indicadas en los planos isobáticos de las figuras 3.2 y 3.3 corresponden a funciones de velocidad empleadas durante los levantamientos mismos. Al considerar las variaciones regionales resultan profundidades algo diferentes. (*Profundidad del Horizonte Springhill, según reflexiones sísmicas*. B. Grossling. 30, septiembre, 1952, informe inédito.)

de la línea internacional. Es, sin embargo, la distribución probable en territorio chileno. La mayor parte del área bajo agua se encuentra entre -2.000 y -2.300 metros. Entre -2.200 y -2.600 m. hay consistentes manteos regionales. La pri-

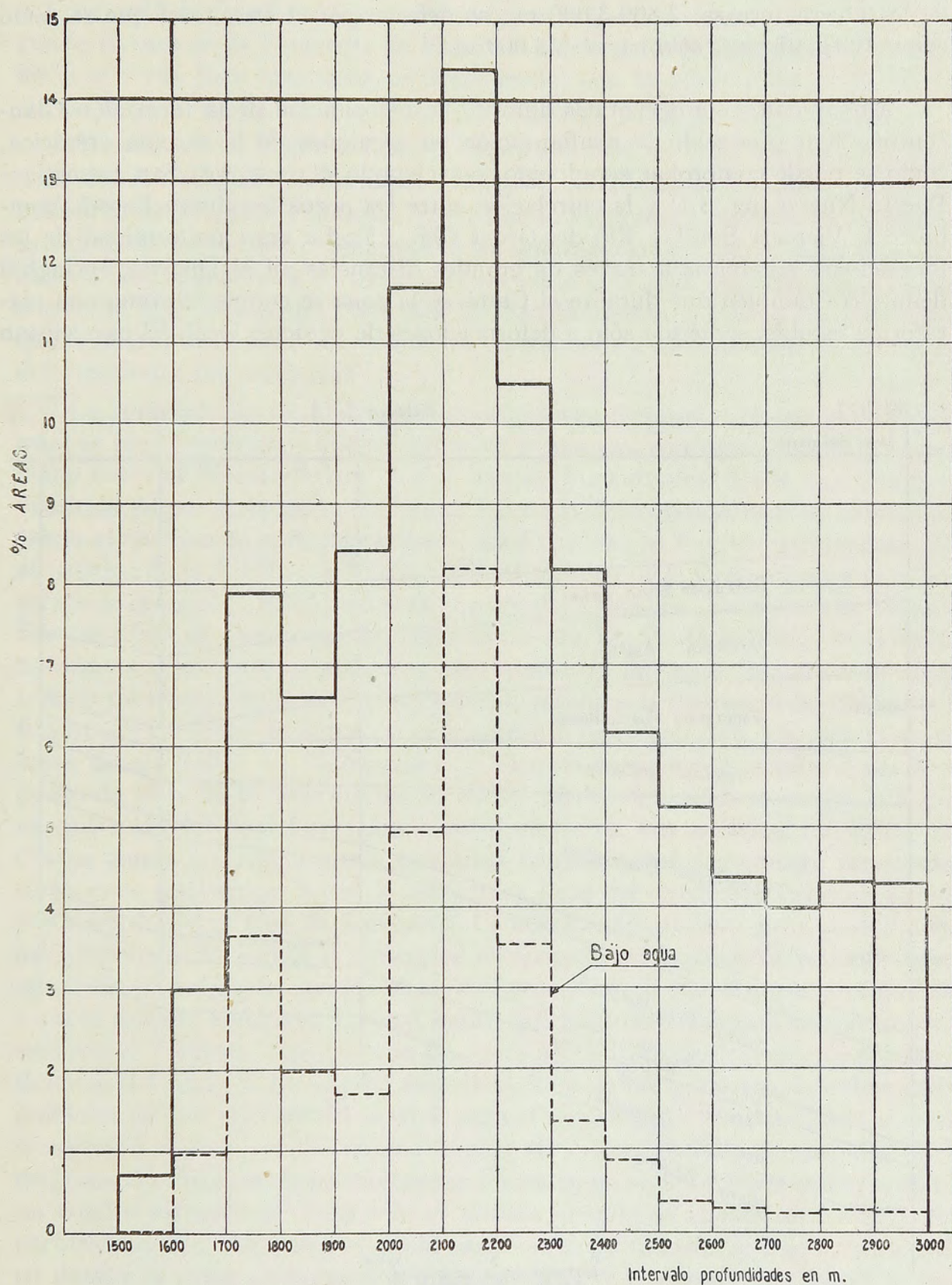


Fig.3.4).- Frecuencia de distribución de áreas, entre profundidades, del Horizonte Springhill en territorio chileno. Se ha tomado como 100% el área hasta 3.000 m.

mera terraza se extiende sobre —2.000 m.; la pequeña representación de los intervalos 1.500-1.600 y 1.600-1.700 se debe a la posición del límite internacional. La segunda terraza corresponde al intervalo 2.100-2.400 m. Entre —2.200 m. y —2.700 m. predominan los manteos regionales. La pequeña representación de la tercera terraza, 2.800-3.000 m., se debe a que el área total que se tomó como 100% alcanza sólo hasta —3.000 m.

Movimientos epirogenéticos durante la depositación de la formación Glauconítica han producido la configuración en escalones de la sección cretácica, como se puede comprobar estudiando, por ejemplo, el corte AA' San Sebastián-Puerto Nuevo (fig. 3.1) y la correlación entre los pozos Sombrero Este-1, Sombrero-1, Victoria Sur-1 y Río del Oro-1 (fig. 3.5). La gran uniformidad de las formaciones cretácicas a través de grandes distancias en el Distrito Springhill demuestra también que durante el Cretáceo la zona se comportó como una plataforma estable, sometida sólo a deformaciones de carácter local. El paralelismo

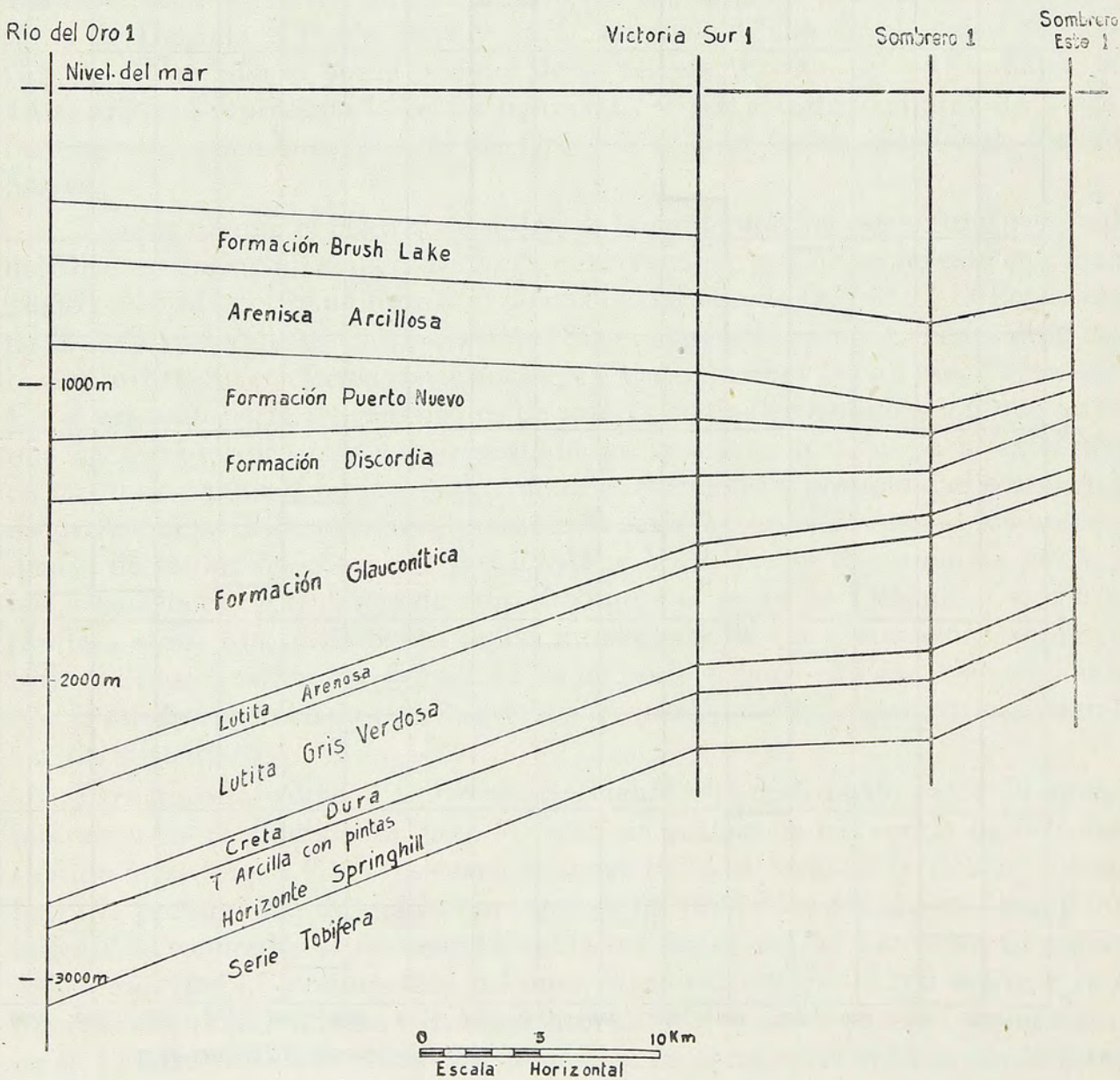


Fig 3.5) Correlaciones de pozo R.O.1 hasta pozo SE 1 en Distrito Springhill Norte

del borde de estos escalones con el arco de la cordillera y con el lineamiento estructural-precretácico —por lo menos en el valle de San Sebastián— indica que la configuración regional cretácica estaría condicionada por antiguas líneas estructurales. En el valle de San Sebastián la segunda terraza corresponde al geoanticlinal pre-cretácico que hemos mencionado, y para que lo mismo sucediera en la segunda terraza de la Península de Espora el eje del geoanticlinal debería curvarse hacia el norte. Esto concuerda, en cierto modo, con la orientación norte-sur del eje de Espora, desde Chañarcillo al sur, sugerida por el cuadro gravimétrico

Al contrario de lo que se observa regionalmente, la configuración estructural de la sección cretácica es localmente de gran complejidad. No existe un alineamiento preponderante y definido, presentando los domos, anticlinales y terraza una disposición irregular. Se requiere un análisis algo cuidadoso para descubrir características generales y concebir cómo pudo generarse esta configuración estructural. Un examen del corte AA' de San Sebastián a Puerto Nuevo, indica que el plegamiento local inter-cretácico corresponde a una reactivación de ciertas deformaciones pre-cretácicas.

La comparación de intervalos estratigráficos demuestra que el plegamiento local es inter-cretácico y que se realizó en forma casi continua desde el Hauteriviano hasta el Maestrichtiano. En el área de Manantiales, donde hay una gran densidad de pozos, he encontrado que 1% de la deformación local se había efectuado al término de la depositación de los Estratos con *Favrella steinmanni*, 5% al término de la Arcilla con Pintas, 10% al término de la Creta Dura y prácticamente se completó (100%) durante el resto del Cretácico. En el área de Victoria Sur las cifras de intensidad de plegamiento son 15, 35, 45 y 100%. Si la deformación local afectó toda esta área con intensidad uniforme durante todo el intervalo de tiempo de la deformación local, entonces la diferencia de cifras significa que el conjunto de datos no es igualmente representativo. En todo caso, las áreas desarrolladas en Manantiales y Victoria Sur no son similares desde el punto de vista de la deformación local. La diferencia estriba ya sea en la forma en que aumentó la deformación o en el efecto de volcamientos terciarios. En ciertas zonas los movimientos terciarios fueron lo suficientemente localizados como para predominar sobre la estructura local del Cretáceo. Tal cosa sucede por ejemplo, en el área de Sombrero. La correlación positiva entre profundidad del Horizonte Springhill e intervalos estratigráficos se invierte totalmente en esta área, de tal modo que los intervalos aumentan al disminuir la profundidad o sea al subir el horizonte. Lo cual indica que hubo movimientos de volcamiento durante el Terciario, desplazando las zonas altas de las posiciones que ocuparon durante el Cretáceo. En el caso específico del área de Sombrero, la culminación cretácica estuvo al oeste del pozo 4, pero el volcamiento terciario hacia el oeste transformó el área cerrada en una terraza sin cierre. Dada la complejidad de la deformación inter-cretácica, no bastan los datos de algunos pozos para construir un cuadro estructural. Esto sólo es posible cuando se cuenta además con los perfiles sísmicos. Sin embargo, en la parte norte del distrito, sólo se ha trabajado en detalle la parte de los sismogramas próxima al Horizonte Springhill, lo cual impide, por ejemplo, la preparación de planos isopach representativos. Esto es posible en el valle de San Sebastián, y se puede observar (fig. 3.6) que el plano isopach de la sección cretácica indica la gran complejidad de la deformación inter-cretácica.

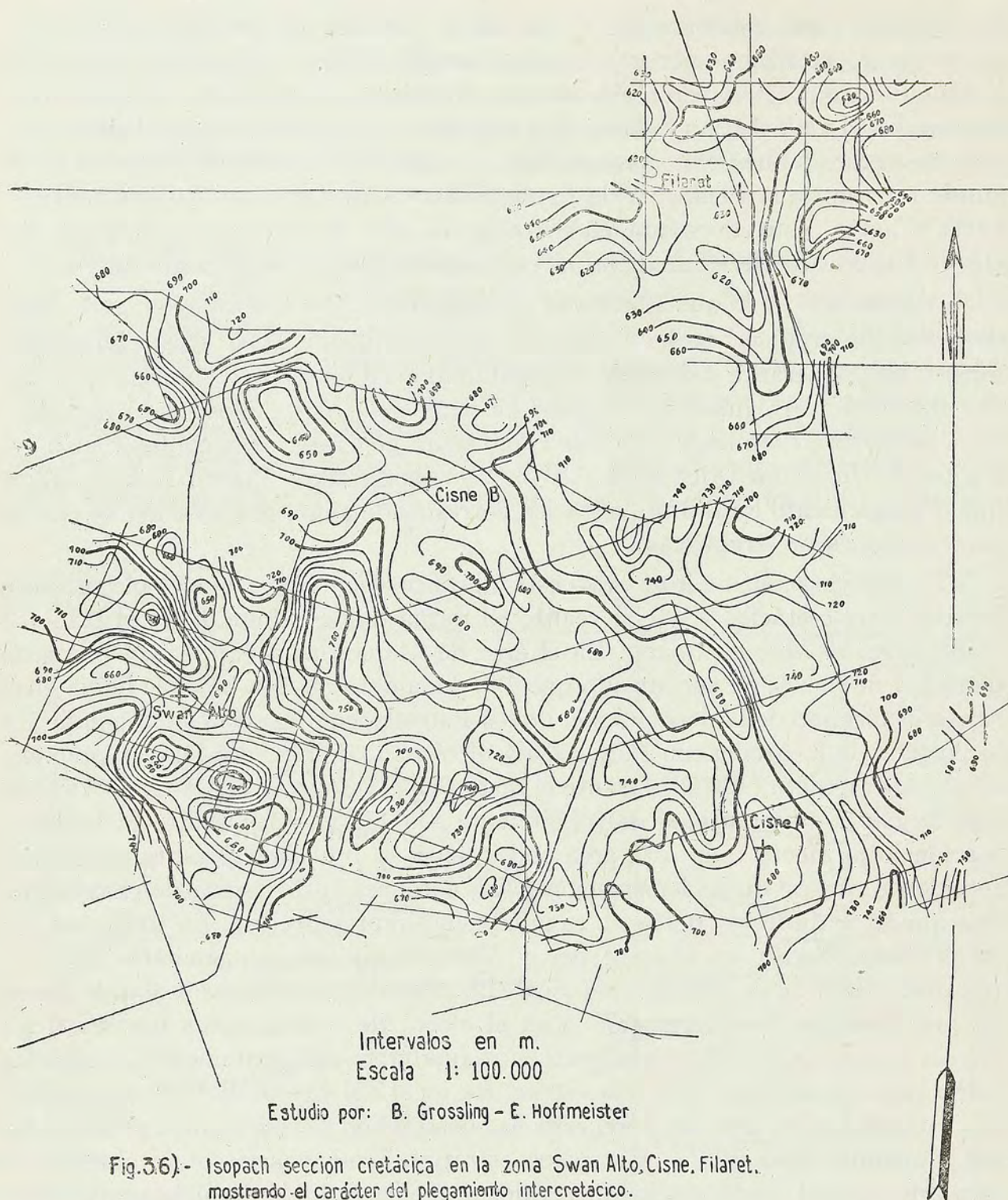


Fig.36).- Isopach sección cretácica en la zona Swan Alto, Cisne, Filarat, mostrando el carácter del plegamiento intercretácico.

Todo indica que la sección sedimentaria reconocida no ha estado sometida a compresiones activas durante el Cretáceo o posteriormente. Las fallas que se han podido constatar son normales y de pequeño desplazamiento; no hay fallas inversas. Tampoco hay engrosamiento de las secciones en las culminaciones estructurales, excepto cuando volcamientos durante el Terciario han logrado alterar esta relación. Esta ausencia de esfuerzos activos de compresión, en la sección sedimentaria misma, junto con el aspecto de la configuración estructural descarta la hipótesis de plegamiento por compresión.

Una topografía que sea cubierta por sedimentación puede reflejarse en la deformación de los estratos sedimentarios debido a compactación diferencial; este concepto, que fué introducido por Sydney Powers (1926), ha sido verificado posteriormente en varias partes del mundo. Como algún relieve debió retener la

peniplanicie de la Serie Tobífera, lo cual estaría confirmado en el área del valle de San Sebastián (ver por ejemplo Corte AA', figura 3.1), es de esperar que parte de la deformación local de la sección cretácica se deba a compactación diferencial. Si este relieve hubiera sido importante, debería existir un recubrimiento progresivo de la sección inferior sobre la superficie de discordancia, lo cual no parece haberse observado durante el desarrollo de los yacimientos. Pero, en este caso, se ha estado tomando como referencia la Arenisca Springhill, es decir, los elementos superiores, constituidos principalmente por areniscas, de la formación Springhill. Si se acepta la hipótesis que la discordancia regional más importante se encuentra por debajo de las Arcillas Intermedias, entonces la magnitud y la variabilidad del intervalo entre el techo de la formación Springhill y la discordancia serían suficientes para explicar, en el grado que fuera necesario, la deformación local mediante compactación diferencial de los sedimentos en ese intervalo.

Ciertas deformaciones del basamento —como solevantamientos locales, rotaciones y reajustes entre diferentes blocks— pueden producir una deformación similar a la indicada para la sección cretácica. Tales fenómenos se cree que intervinieron en la génesis de las deformaciones locales en la zona del Mid-Continent, U. S. A. (29). Es más difícil verificar esta hipótesis que las anteriores, ya que no hay antecedentes estructurales suficientes sobre las rocas pre-cretácicas. Esto obliga a entrar de lleno en terreno especulativo. Rotaciones y reajustes de blocks del basamento deberían producir sistemas conjugados de pliegues y fallas, puesto que estas deformaciones envuelven direcciones conjugadas de compresiones y tensiones respectivamente. No hay antecedentes suficientes para decidir si esto se ha producido o no.

En suma, me parece que la deformación local intercretácica, en el Distrito Springhill, es el resultado de compactación diferencial de las arcillas intermedias que cubren el relieve de la discordancia principal, de reactivación de deformaciones pre-cretácicas y rotaciones y ajustes de blocks del basamento pre-cretácico. Tal vez las causas más importantes son compactación diferencial y reactivación de deformaciones pre-cretácicas.

Tal vez es oportuno, en este punto del argumento, estudiar la realidad del cuadro de deformaciones locales inter-cretácicas que se trata de explicar.

3.3) *Estudio crítico del cuadro estructural cretácico*

En un esfuerzo por juzgar la veracidad del cuadro estructural de la sección cretácica, que resulta de los levantamientos sísmicos —representado por el isobático del Horizonte Springhill— he examinado la puntería de los pozos a la luz de la distribución en profundidades de este horizonte. Si los pozos de exploración estuvieran ubicados totalmente al azar, la probabilidad que toquen el horizonte dentro de un cierto intervalo determinado de profundidades es proporcional al área bajo la cual el horizonte está dentro del mismo intervalo. Y, dicho en forma más precisa, las frecuencias de distribución en profundidades del horizonte y de los pozos de exploración deberían ser las mismas. Si el número de pozos es grande, la diferencia que se observe entre estas frecuencias de distribución re-

(29) Mc. Coy, Alex W.: *An interpretation of local structural development in Mid-Continent. Areas associated with deposits of Petroleum*. Symposium: Problems of Petroleum Geology, A. A. P. G. 1934.

presenta una «puntería» en la colocación de los pozos y no un efecto casual. Este método he aplicado al sector Chañarcillo-Victoria-Sombrero, donde hay levantamientos sísmicos relativamente completos y un suficiente número de pozos (figura 3.7). La frecuencia de distribución de la extensión del horizonte tiene la forma de dos escalones, lo que corresponde a la transición de la primera a la segunda terraza, a que me he referido anteriormente. Se observa que hay un marcado contraste entre el resultado para los pozos y para la extensión del horizonte. Los pozos aparecen agrupados densamente en pequeños intervalos de profundidades, a los cuales corresponde un pequeño porcentaje del horizonte. Así, por ejemplo, 5 pozos de exploración habrían logrado caer en el mismo 6% del área, que corresponde al intervalo 2.150-2.200 m. La probabilidad que un acontecimiento semejante ocurra por azar es del orden de uno en un millón. Los pozos de desarrollo y cubicación aparecen concentrados, en su mayor parte, 25-50 m. más profundos que los pozos de exploración. Esta aparente gran eficacia del control estructural en la ubicación de pozos, según las frecuencias de distribución, podría interpretarse como:

1) Que el cuadro estructural del Horizonte Springhill, que se ha obtenido con los levantamientos sísmicos, es en algún sentido incorrecto, o

2) Que efectivamente es muy alta la eficacia de los levantamientos sísmicos para definir áreas estructuralmente positivas.

No es probable que el cuadro estructural sísmico sea totalmente incorrecto por las siguientes consideraciones: a) debe existir en realidad algún cierre —aún cuando no siempre estructural— en torno a las ubicaciones de exploración sísmicas, ya que el 90% de ellas ha correspondido a pozos de gas o petróleo, llegándose al agua al alejarse de ellas los pozos de desarrollo, y b) en numerosas ocasiones se ha comprobado directamente la semejanza entre los cuadros sísmicos y el suministrado por los pozos. Sin embargo, no podría admitir que el error probable de estos levantamientos sísmicos sea tan pequeño como para explicar la puntería que se deduce de la comparación de las curvas de frecuencia.

Todo este análisis me lleva a buscar la forma en que es incorrecto el cuadro sísmico. Si el techo del horizonte no fluctuara en la realidad tanto como lo indica el cuadro sísmico y se encontrara aproximadamente a la profundidad más frecuente según los pozos, no sería necesario un error probable muy pequeño de los levantamientos sísmicos. Y, si por otra parte, el cuadro sísmico exagera de algún modo el relieve estructural, explicaríamos también el porqué de las acumulaciones de hidrocarburos en las ubicaciones sísmicas. La solución me parece estar en el hecho que los horizontes sísmicos, a la profundidad de la formación Springhill, no coinciden siempre con horizontes estratigráficos o litológicos. Por principios teóricos, el pulso reflejado por la formación Springhill, o sea la zona de transición entre las arcillas cretácicas y la Serie Tobífera es probablemente un pulso múltiple, cuyo carácter —frecuencia y amplitudes— depende de las propiedades elásticas de los tres medios y del espesor del intermedio. Se sabe que la zona de transición es variable, tanto en espesor como en naturaleza. No se debería esperar, por lo tanto, que estos horizontes sísmicos correspondan siempre a horizontes litológicos o estratigráficos. Así, el mismo horizonte sísmico puede corresponder al techo de la formación Springhill, a una zona intermedia y aún tal vez a la base de ella. Este fenómeno tendría mayor gravedad si en realidad las arcillas intermedias (§3.1) corresponden a la formación Springhill, en cuyo caso la zona de transición alcanzaría un espesor apreciable.

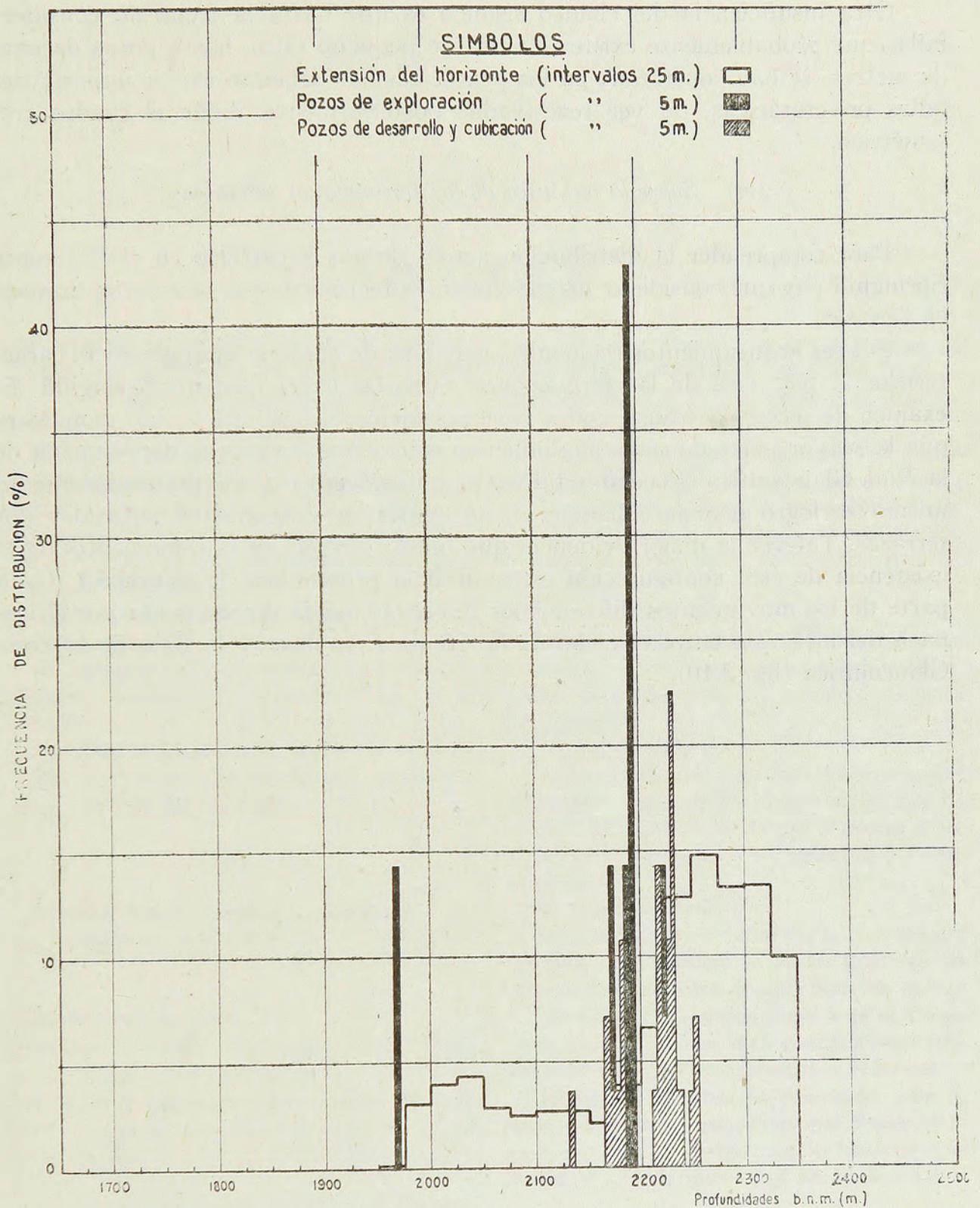


Fig.-3.7) - Comparación de las frecuencias de distribución en profundidades, correspondientes al techo del Horizonte Springhill, de:

- 1) la extensión de este horizonte,
 - 2) del número de pozos de exploración y
 - 3) del número de pozos de desarrollo y cubicación
- el sector Chañarcillo - Victoria - Sombrero.

Otra insuficiencia del cuadro sísmico es que hasta la fecha no considera fallas que probablemente existen. Fallas de pequeño salto, hasta pocas decenas de metros, se han constatado en los pozos; además deberían existir importantes fallas pre-cretácicas, tal vez reactivadas posteriormente, según el cuadro gravimétrico.

3.4) *Sobre la tectónica de las formaciones terciarias*

Para comprender la distribución actual de gas y petróleo en el Horizonte Springhill hay que considerar los movimientos tectónicos que ocurrieron durante el Terciario.

Suaves arqueamientos regionales, más bien de carácter epirogenético, caracterizan la tectónica de las formaciones terciarias en el Distrito Springhill. El examen de secciones transversales (ver, por ejemplo, figs. 3.1 y 3.5) demuestra que la mayor parte de estos movimientos ocurrieron durante la depositación de la Zona Glauconítica (Eoceno, y tal vez algo Cretáceo) y que el profundizamiento mismo se logró mediante bandas monoclinales de volcamiento separadas por terrazas. Tal vez la mejor evidencia que puedo ofrecer, en este momento, de la existencia de esta configuración estructural la proporciona la figura 3.1. Gran parte de los movimientos diferenciales terciarios queda representada por el isopach del intervalo entre el techo de la Arenisca Arcillosa y la Base de la Zona Glauconítica (fig. 3.10).