

Observaciones hidrogeológicas e hidroquímicas sobre los manantiales termominerales de Alhama de Granada (Cordilleras Béticas. España)

Hydrogeological and hydrochemical observations about the thermomineral springs of Alhama de Granada (Betic Cordilleras, Spain)

M. López Chicano y A. Pulido Bosch

Departamento de Geodinámica. Facultad de Ciencias. Universidad de Granada. 18071 Granada.

ABSTRACT

They are revised the complex hydrogeological conditions of the low enthalpy and scarce mineralization hydrothermal anomaly of Alhama de Granada, as well as the temporary and spatial evolution of the physico-chemical characteristics of the waters. In spite that the composition of the groundwater is very constant in time, it seems to exist a small mixture with waters more colds originating from the neogene materials that fill the Granada depression. The discussion about the origin of the thermal water indicates a probable flow from carbonate aquifers corresponding to the Alpujarride domain.

Key words: thermal waters, hydrogeochemistry, carbonate aquifers.

Geogaceta, 19 (1996), 134-137
ISSN: 0213683X

Introducción

Al norte de la población de Alhama de Granada (provincia de Granada), en las inmediaciones del paraje denominado los Baños (Fig. 1), existe una anomalía hidrogeotérmica importante en el contexto de las Cordilleras Béticas (Cruz San Julián *et al.*, 1972), de baja entalpía y escasa mineralización, en la cual se localizan al menos tres manantiales con aguas de características fisicoquímicas fuera de lo normal respecto a las de los demás puntos acuíferos del entorno. La originalidad de estas surgencias se basa, no sólo en su temperatura y mineralización, sino también en sus características hidrodinámicas, con caudales muy constantes en el tiempo.

El manantial más conocido e importante es el de los Baños Viejos (Fig. 1), ya explotado en balneoterapia en tiempos de las dominaciones romana y árabe, dispone en la actualidad de una pujante instalación balnearia. Los Baños Nuevos deben el nombre a su aparición repentina a raíz del terremoto que asoló la región el 25 de Diciembre de 1884 (López Arroyo *et al.*, 1981). También es explotado en la actualidad en balneoterapia. El manantial de Huerta Rodero fue descrito por primera vez en López Chicano (1992) y sólo se utiliza en regadío.

La revisión de los conocimientos que

se poseen actualmente sobre el entorno hidrogeológico de estas surgencias, así como de las características fisicoquímicas de las aguas es el objeto de este estudio.

Contexto hidrogeológico

Las condiciones geológicas del área de Alhama de Granada son bastante complejas, al estar involucrado directamente en el contacto entre Zonas Externas y Zonas Internas, uno de cuyos principales rasgos es la existencia de numerosas unidades geológicas implicadas, con complejas relaciones tectónicas aún no bien definidas. La gran extensión que alcanza en el sector de estudio el relleno neógeno de la depresión de Granada dificulta la observación de los materiales preorogénicos que constituyen el substrato.

Simplificando en gran medida (Fig. 1), en el área de anomalía hidrogeotérmica afloran materiales acuíferos, esencialmente carbonatados, de edad Lías inferior y medio (Braga *et al.*, 1984) atribuidos por Busnardo *et al.* (1969) a la Dorsal Bética, y por Martín Algarra (1987) a las unidades Rondaides, en relación a los cuales se encuentran las manifestaciones termales. Pertenecientes al dominio de las Zonas Internas, los afloramientos son poco extensos y aparecen muy cubiertos por materiales «postorogénicos» del Mioceno

superior. Estos últimos, afectados de una importante deformación neotectónica, consisten en una sucesión de conglomerados marinos cementados que lateralmente y hacia el techo pasan a calcarenitas bioclásticas de edad Tortoniense inferior. Sobre las calcarenitas aparece una potente formación formada esencialmente por lutitas y margas, que pueden intercalar niveles conglomeráticos o niveles evaporíticos (Tortoniense superior a Turolense superior).

La descarga visible por los manantiales termales de Alhama de Granada supera los 35 l/s de caudal medio. Esta no se justifica sólo por infiltración del agua de lluvia en los pequeños afloramientos carbonatados rondaides. Debe existir un área de alimentación más importante en conexión hidráulica profunda con aquéllos, lo que también explicaría la anomalía térmica. En ese sentido cabe la posibilidad de que se trate de alguno de los acuíferos carbonatados más próximos y extensos: Sierra Gorda o Sierra Tejeda.

El acuífero de Sierra Gorda, constituido por materiales carbonatados jurásicos de las unidades geológicas de Sierra Gorda (*s.str.*) y Zafarraya, ambas encuadradas en el dominio de las Zonas Externas por Vera (1966), se sitúa al oeste de Los Baños (Fig. 1). A pesar de su proximidad, los niveles piezométricos

observados en él, más bajos que la cota de las surgencias termales, y el sentido de flujo que se deduce, opuesto a la posición de los mismos, hacen muy improbable que sea este acuífero el origen de la descarga hidrotermal.

A unos 5 km al sur del Los Baños de Alhama afloran materiales metamórficos del Complejo Alpujárride, entre los que abundan materiales acuíferos carbonatados de edad triásica, el más extenso de los cuales es el de Sierra Tejeda, con cotas que pueden alcanzar los 2000 m s.n.m. Diversos criterios hidroquímicos que serán expuestos más adelante, junto con la afinidad que según Martín Algarra (1987) existe entre Alpujárrides y Rondaides, parece indicar que este sector constituye el área de alimentación principal de los manantiales de Alhama.

Los tres manantiales termales se alinean en el sentido N-S, a la vez que disminuye la cota de emergencia, desde 798 m s.n.m. en los Baños Viejos hasta 790 m en Huerta Rodero, de manera que puede considerarse éste como el sentido de flujo preferente de las aguas subterráneas, con un gradiente hidráulico en torno a 0,7 %. Un cuarto punto, presumiblemente termal (Fig. 1), consiste en un sondeo realizado por el IRYDA en las proximidades del manantial de Huerta Rodero, con un nivel piezométrico artesiano a unos 11 m de profundidad, que suministró un valor de transmisividad en torno a 60 m²/día. No obstante, prueba de la heterogeneidad y anisotropía del medio acuífero es la perforación llevada a cabo por el IARA que resultó negativa pese a alcanzar una profundidad de 180 m.

Características hidroquímicas

Entre Enero de 1987 y Octubre de 1988 se muestreó cada dos días, aproximadamente, el manantial de los Baños Viejos. El número de muestras correspondientes a Huerta Rodero y Baños Nuevos fue mucho menor. En la tabla 1 se presentan algunos de los datos analíticos obtenidos, a fin de dar una idea de la composición mayoritaria de las aguas termominerales. La facies hidroquímica dominante es la sulfatada-bicarbonatada cálcico-magnésica, aunque el manantial de Huerta Rodero puede presentarla sulfatada-clorurada. La fase gaseosa es importante, consecuencia de la pérdida de presión que sufre el fluido en el ascenso. Debido al gran contenido en sulfatos, en las paredes de los recintos de captación, la condensación y evaporación del agua deja visibles precipitados de yeso.

Se trata de aguas hipotermales y mesotermales, con poca mineralización

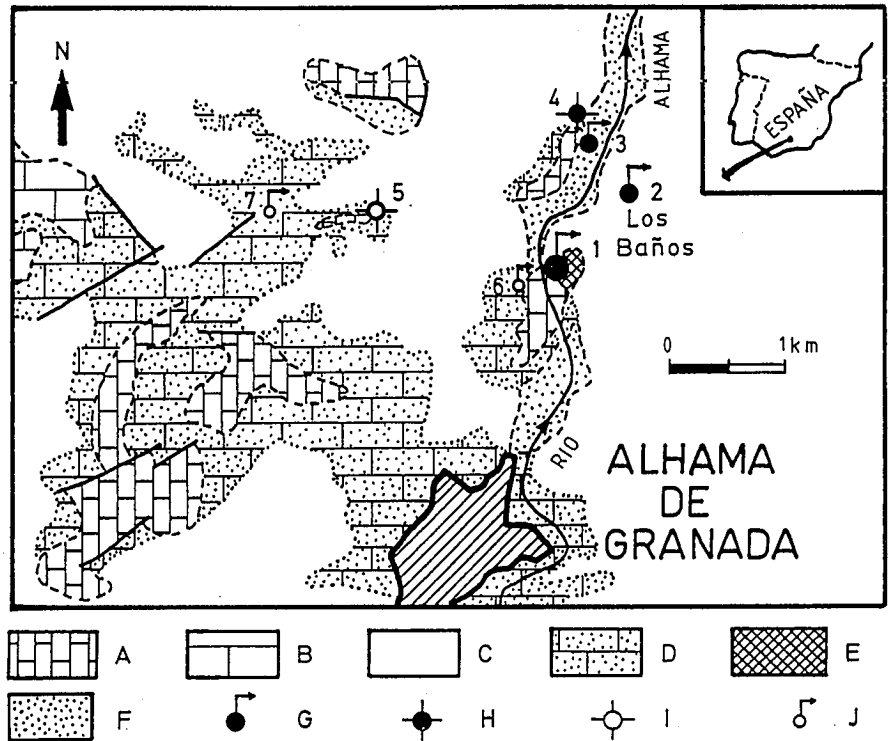


Fig. 1.- Esquema hidrogeológico del área estudiada. A, calizas y margas Rondaides. B, calizas liásicas de Sierra Gorda. C, margas y limos del Tortonense y Turoliense. D, conglomerados y calcarenitas tortonienses. E, travertinos cuaternarios. F, materiales detríticos cuaternarios. G, manantiales termominerales (tamaño relativo al caudal medio): 1, Baños Viejos; 2, Baños Nuevos; 3, Huerta Rodero. H, sondeo productivo. I, sondeo negativo. J, otros manantiales de aguas frías.

Fig.1.- Hydrogeological map of the studied are. A, Rondaides limestones and marls. B, liassic limestone of Sierra Gorda. C, tortonian and turolian marls and silts. D, tortonian conglomerates and calcarenites. E, quaternary travertines. F, quaternary detrital materials. G, thermomineral springs (size relative to the discharge): 1, Baños Viejos; 2, Baños Nuevos; 3, Huerta Rodero. H, productive borehole. I, negative borehole. J, other cold water springs.

(Tsd inferior a 1 g/l). Por ello, en principio, la mineralización parece ser debida principalmente al tiempo de contacto agua-roca (bastante prolongado como se verá más adelante), no siendo necesario invocar la influencia de posibles niveles evaporíticos en profundidad.

Se observan algunas diferencias en los valores de los parámetros fisicoquímicos entre las surgencias. Así, la conductividad aumenta desde el manantial de los Baños viejos hasta el de Huerta Rodero, en el mismo sentido de la disminución de los caudales. Algo similar ocurre con los cloruros, los sulfatos y el sodio. Por el contrario, la temperatura disminuye en ese sentido. Todo ello podría indicar una mayor velocidad de ascenso de las aguas hacia los puntos más meridionales, junto con un mayor tiempo de residencia en el acuífero hacia los manantiales más septentrionales, lo que favorecería un enfriamiento en el ascenso más importante para estos últimos.

Llaman la atención los bajos valores de pH registrados en los Baños viejos, en general inferiores a 7,2. Una posible explicación podría ser la menor

importancia de los procesos de reducción de los sulfatos en las aguas que surgen por este manantial, al contrario que en el manantial de Huerta Rodero, donde es posible apreciar un fuerte olor a sulfhídrico y la existencia de concreciones sulfurosas en el entorno de la captación.

Por regla general, las aguas de estos manantiales se muestran en equilibrio o con tendencia a la saturación en calcita, dolomita y aragonito, salvo en los Baños Nuevos donde se observa una clara sobresaturación en estas especies, claramente subsaturadas en halita, yeso y anhidrita, y subsaturadas en otros sulfatos de sodio y carbonatos magnésicos.

En la figura 2 se muestra la evolución de los parámetros hidroquímicos más variables correspondientes al control periódico de los Baños Viejos. Los datos disponibles de temperatura del agua son escasos, oscilando muy poco, entre 44,2 y 44,8 °C. Los valores más bajos se obtienen hacia el final del período lluvioso (Mayo-Junio). La conductividad oscila entre márgenes muy estrechos, desde 890 hasta 930 µmhos/cm, con una única moda en torno a 911 µmhos/cm

Punto	Fecha	T (°C)	pH	Cond. (25°C)	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Tsd
Huerta Rodero (3)	11/12/87	27,4	7,35	1173	124	303	192	61	44	110	7,7	842
	21/11/89	26,0	7,30	1190	121	312	217	60	44	120	7,7	882
Baños Nuevos (2)	16/06/86	40,0	7,50	964	82	225	244	47	44	88	7,0	737
	17/10/86	40,8		948	75	242	213	44	44	82	8,8	709
Baños Viejos (1)	29/01/88	44,8	7,15	910	85	230	207	33	39	104	6,3	704
	21/10/88	44,3	7,08	915	67	232	206	32	34	100	5,1	676

Tabla 1.- Características fisicoquímicas de las aguas de los manantiales termominerales de Alhama de Granada. Concentraciones iónicas en mg/l.

Table 1.- Physico-chemical characteristics of the thermomineral spring waters of Alhama de Granada. Ionic concentrations in mg/l.

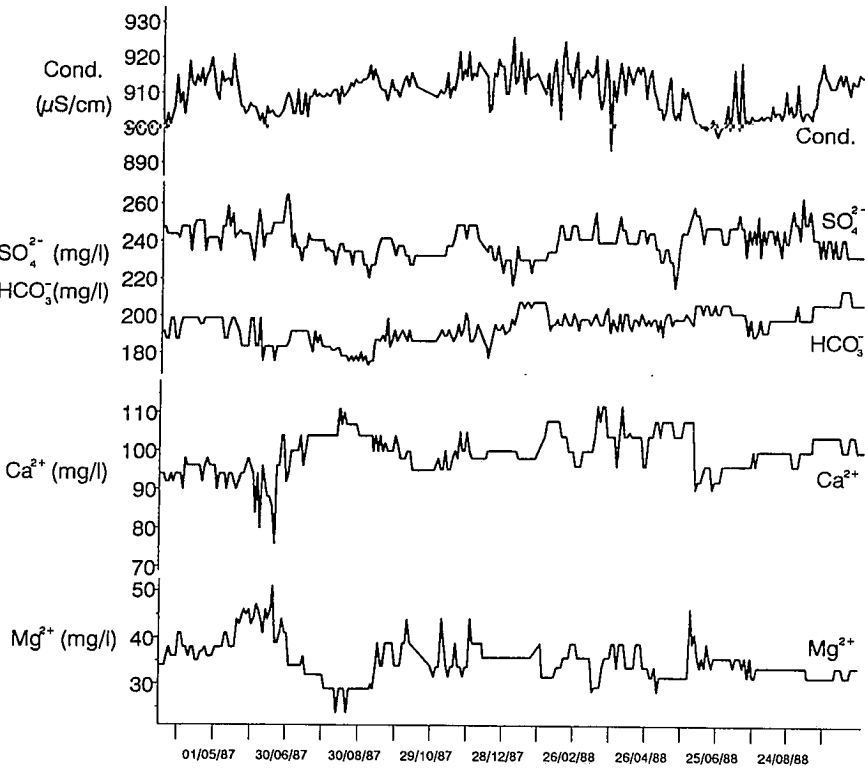


Fig. 2.- Evolución hidroquímica del manantial termomineral de los Baños Viejos en 1987 y 1988.

Fig. 2.- Hydrochemical evolution of the Baños Viejos thermomineral spring for 1987 and 1988.

para el período considerado. El coeficiente de variación medio de este parámetro es de 0,6 %, valor bajo que traduce una escasa variabilidad de la mineralización total.

Se observa un descenso importante de la conductividad en los meses de Mayo y Junio, con una recuperación lenta y progresiva a lo largo de los meses de estiaje. Es posible que se trate de la

llegada al manantial de aguas menos mineralizadas, con un desfase de varios meses respecto al período de recarga pluviométrica. Descartada la renovación estacional de las aguas propias del acuífero, habría que pensar en una alimentación procedente de otro acuífero de comportamiento inercial, condición que cumplen los materiales neógenos. Por otra parte, puesto que los sistemas

hidrotermales deben ser considerados como sistemas en régimen estacionario - y éste sin duda lo es- las variaciones hidroquímicas e hidrodinámicas hay que atribuir las a influencias subsuperficiales (Corrigan y Verrière, 1985).

Hemos realizado un análisis en componentes principales para los datos del año 1987, a fin de interpretar más precisamente y de forma sintética las variaciones de los parámetros hidroquímicos. Los datos correspondientes al ciclo 1987/88 no ponen de manifiesto una estructura interesante, siendo preciso hasta 4 componentes para explicar el 76% de la varianza muestral. Los resultados del ACP (Fig. 3) se refieren a 106 muestras tomadas durante el año 1987 y a 7 de las variables fisicoquímicas determinadas. Los dos primeros componentes explican el 69,1 % de la varianza. El componente I viene condicionado principalmente por los cloruros, el calcio y en menor medida el sodio, a los que se oponen los sulfatos y el magnesio. Los bicarbonatos tienen un gran peso sobre el componente II, mientras que la conductividad se sitúa en una posición intermedia. La proyección de las muestras o unidades estadísticas sobre el ACP permite agruparlas en dos conjuntos principales de aguas, opuestos en los extremos del componente I. Un primer grupo corresponde a las muestras tomadas entre Marzo y Julio de ese año, caracterizadas, sobre todo, por contenidos altos en sulfatos y magnesio. Los extremos opuestos de este grupo se caracterizan por altos valores de conductividad y bicarbonatos (Marzo y Abril), y bajos valores de estos parámetros en el otro

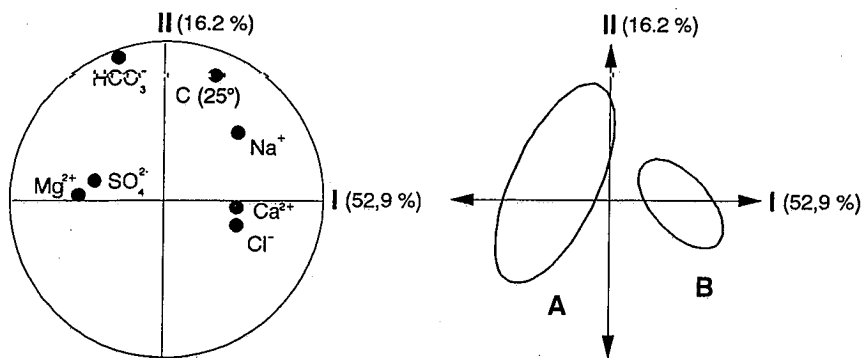


Fig. 3.- Representación, respecto a los dos primeros componentes del ACP, de las aguas del manantial de los Baños Viejos, según los muestreos realizados en 1987. A, muestras de Marzo a Julio; B, muestras posteriores a Julio.

Fig. 3.- Representation, with respect to the first two components of the ACP, of the waters from Baños Viejos spring, according to the samplings accomplished in 1987. A, samples from March to July; B, subsequent samples to July.

extremo (Mayo y Junio). Un segundo grupo comprendería las muestras de finales de Julio y posteriores, caracterizadas por altos contenidos en cloruros, sodio y calcio.

Cabe la posibilidad de interpretar los ascensos en el contenido en sulfatos y magnesio, coincidentes con los descensos de conductividad, como consecuencia de una mezcla con aguas más frías y menos mineralizadas, ricas en ambos iones, aportadas con un desfase importante respecto al período de mayor intensidad pluviométrica. Al final del verano, las aguas evolucionan hacia un mayor contenido en las especies más solubles (Cl^- y Na^+), con un enriquecimiento en calcio importante. No obstante, cabe invocar, para la evolución de los sulfatos, la existencia de procesos de oxidación de sulfuros y de reducción de sulfatos alternantes.

En Junio de 1993 se realizó un muestreo en el manantial de los Baños Viejos para la determinación de algunos parámetros isotópicos. El valor encontrado de $\delta^{18}\text{O}$ (-8,58 ‰) es más negativo que ningún otro de los hallados en puntos que no ofrecen duda de su relación con el acuífero de Sierra Gorda. Ello implica que la altitud media de recarga de este manantial se situaría entre 100 y 400 m más alta que la de cualquier punto de Sierra Gorda, con lo cual se refuerza la hipótesis de su origen en el sector alpujárride de Sierra Tejeda.

El valor de tritio que se determinó fue de 1 TU, valor muy bajo que indicaría que la mayor parte del agua drenada por los Baños Viejos se infiltró con anterioridad al año 1954. No obstante el hecho de que este valor no sea nulo deja

abierta la posibilidad de la existencia de una pequeña mezcla del agua termal con aguas más frías y subsuperficiales. Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ (-2,81 ‰) y el porcentaje de carbono moderno (19,3 %) indicarían una edad media para estas aguas cercana a los 4500 años, dato que debe considerarse como orientativo de la gran antigüedad de la mayor parte del agua y no como una datación absoluta.

Discusión y conclusiones

Respecto al origen de la anomalía térmica de baja entalpía de Alhama de Granada, en nuestra opinión parece plausible la existencia de un proceso de convección forzada o transporte de calor a favor del gradiente hidráulico, que, según Fernández y Banda (1988), es el que puede modificar sustancialmente la distribución «normal» o «conductiva» de la temperatura, dando lugar a marcadas anomalías geotérmicas.

El acuífero de Sierra Gorda queda descartado como posible área de alimentación a los manantiales termales, ya que las recientes perforaciones llevadas a cabo en el mismo proporcionan niveles piezométricos a más de 200 metros por debajo de la altura de las surgencias. Asimismo, los valores de $\delta^{18}\text{O}$ encontrados indican un área de recarga más alta. Aunque estos criterios no son definitivos, ya que el flujo del agua puede ser extremadamente lento y corresponder a un sistema de circulación intermedio o regional (Toth, 1963), es más probable que el área de recarga esté constituida por los acuíferos alpujárrides, de nivel piezométrico situado por encima de los 1000 m, lo que favorecería un gradiente hidráulico más elevado y, por

tanto, una circulación más profunda. Dada la complejidad geológica del área y la anisotropía del medio los fenómenos puramente convectivos pasarían a un plano secundario. Además, según Martín Algarra (1987) existe un parentesco geológico-paleogeográfico entre las unidades Alpujárrides y las series rondaides o dorsalianas de la Cordillera Bética. Por otro lado, parte del agua podría circular por los materiales neógenos más permeables.

Cruz Sanjulián y Granda (1979) estiman una temperatura de base próxima a 86-90 °C para estas aguas, mediante la aplicación del método de Fournier y Truesdell (1970). También indican que la presencia de travertinos es indicio de una baja temperatura de base. Estos materiales aparecen en un afloramiento colgado unos 15 m por encima de la cota actual de surgencia de los Baños viejos (Fig. 1), poniendo en evidencia que ha existido una importante disolución de CaCO_3 en profundidad. La aplicación del geotermómetro Mg-Li de Kharaka y Mariner (1989) a los datos de estos mismos autores indica temperaturas más bajas para la formación acuífera, entre 62,3 °C para los Baños Viejos y 72,1 °C para los Baños Nuevos, lo que implicaría un enraizamiento del acuífero a profundidades del orden de 1500-2000 m, nada descabelladas habida cuenta de la complejidad estructural.

Referencias

- Braga, J.C.; Martín Algarra, A. y Rivas, P. (1984): *Geobios*, 17, 3: 269-276.
- Busnardo, R.; Linares, A. y Mouterde, R. (1969): *C. R. Ac. Sc. Paris*, 268: 1354-1367.
- Corrigan, P. y Verrière, M. (1985): *Thèse 3ème cycle. Univ. P. Sabatier*, 323 p.
- Cruz-Sanjulián, J.; García Rossell, L. y Garrido Blasco, J. (1972): *Bol. Geol. Min.*, 83: 68-80.
- Cruz-Sanjulián, J. y Granda, J.M. (1979): *Hidrogeol. y Recur. Hidrául.*, 5: 547-568.
- Fernández, M. y Banda, E. (1988): *Acta Geol. Hisp.*, 23, 1: 1-20.
- Fournier, R.O. y Truesdell, A.M. (1970): *Geothermics, Special Issue*, 2: 529-535.
- Kharaka, Y.K. and Mariner, R.H. (1989): In Naeser, N.D. and McCulloh (eds.). *Springer-Verlag*: 99-117.
- López Arroyo, A.; Martín, A. y Mezcuá, J. (1981): *I.G.N.*, Madrid: 5-94.
- López Chicano, M. (1992): *Tesis Doctoral, Univ. Granada*, 429 p.
- Martín Algarra, A. (1987): *Tesis Doctoral, Univ. Granada*, 1171 p.
- Toth, J. (1963): *J. Geophys. Res.*, 67: 4375-4387.
- Vera, J.A. (1966): *Tesis Doctoral, Univ. Granada*, 191 p.