

**ANÁLISIS ESPACIAL DE CUATRO PARÁMETROS FÍSICO-
QUÍMICOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA, EN LA MESA DE LOS
SANTOS DEPARTAMENTO DE SANTANDER**

IVÁN RENÉ ADARME AMADO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA**

2008

**ANÁLISIS ESPACIAL DE CUATRO PARÁMETROS FÍSICO-
QUÍMICOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA, EN LA MESA DE LOS
SANTOS DEPARTAMENTO DE SANTANDER**

IVÁN RENÉ ADARME AMADO

**Trabajo de Investigación presentado como requisito
para optar el título de Geólogo**

Director:

Jorge Eduardo Pinto Valderrama

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA**

2008

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo investigativo lo he podido plasmar debido a la formación científica y política, de diferentes individuos y colectivos, los cuales me han proporcionado el conocimiento alcanzado gracias a sus sacrificios y esfuerzos. Muy especialmente gracias al campesinado y los proletarios sobre quienes se erige el desarrollo productivo del país.

Espero hacer de este conocimiento, un saber que sirva a los intereses de la inmensa mayoría: el pueblo.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	8
2. OBJETIVOS.....	9
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	9
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
3. METODOLOGÍA	10
3.1 LOCALIZACIÓN	14
3.2 ANTECEDENTES	15
3.3 MARCO GEOLÓGICO	17
4. RESULTADOS	18
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	22
6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	24
7. CONCLUSIONES	30
8. REFERENCIAS	32

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Puntos de agua inventariados en la Mesa de Los Santos	11
Tabla 2. Resultados del análisis estadístico	25

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de los puntos de agua inventariados en la Mesa de Los Santos.	11
Figura 2. Ubicación de los puntos de agua seleccionados y sectorización por bloques para la espacialización en la zona de la Mesa de Los Santos.	12
Figura 3. Localización de la zona de estudio.	14
Figura 4. Distribución espacial de pH en invierno y verano.	18
Figura 5. Distribución espacial de Conductividades eléctricas en invierno y verano.....	19
Figura 6. Distribución espacial de SDT en invierno y verano.	20
Figura 7. Distribución espacial de Temperaturas en verano e invierno.....	21

RESUMEN

TITULO:

ANÁLISIS ESPACIAL DE CUATRO PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA, EN LA MESA DE LOS SANTOS DEPARTAMENTO DE SANTANDER*

AUTOR:

Iván René Adarme Amado**

PALABRAS CLAVES:

pH, sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica, métodos geoestadísticos, kriging, agua subterránea.

DESCRIPCION:

El sistema hidrogeológico en la Mesa de Los Santos se considera como un sistema complejo debido a que las variables litológicas, tectónicas e hidroquímicas, interactúan conjuntamente en un proceso dinámico. La identificación, evaluación y control de dichas variables en sistemas abiertos requiere de una dedicación meticulosa y metódica. INGEOMINAS realiza un trabajo de investigación que busca interpretar el comportamiento de los acuíferos del sector en mención, mediante un estudio sistemático que se ejecutará en varias etapas. A partir de la información recopilada en la etapa inicial se logra la espacialización de variables físico-químicas del agua como pH, conductividad eléctrica, temperatura y sólidos disueltos totales lo que permite generar una representación primaria de las condiciones en que se encuentra el agua de los acuíferos y plantear hipótesis preliminares de la dirección del flujo y de la composición del agua.

El proceso de espacialización indicado, utiliza las variables geográficas (coordenadas Norte y Este) y las mediciones de los parámetros físico-químicos mencionados anteriormente, valorándolas mediante el software de interpolación Surfer 8.08, que utiliza algoritmos matemáticos estadísticos para generar un modelo espacial de los valores estimados.

Se toma el modelo generado a partir de parámetro pH medido en verano como muestra de una evaluación estadística para definir su confiabilidad, la cual se define a partir del reporte que genera Surfer en el momento de la interpolación.

* Pasantía de investigación.

** Facultad de Ingenierías Físico-Química, Escuela de Geología, Director: Jorge Pinto Valderrama.

ABSTRACT

TITLE:

SPATIAL ANALYSIS OF FOUR PHYSICOCHEMICAL PARAMETERS OF UNDERGROUND WATER, IN THE MESA DE LOS SANTOS AREA, DEPARTMENT OF SANTANDER*

AUTHORS:

Iván René Adarme Amado**

KEY KEYWORDS:

pH, total dissolved solids, electric conductivity, geostatistical methods, kriging.

DECRPTION:

The hidrogeologic system of Mesa de Los Santos area is considered as a complex system due to lithologic, tectonic and hidrochemical variables, wich interact jointly in a dynamic process. The identification, evaluation and control of this variables in open systems require of a meticulous and methodical dedication. INGEOMINAS carries out an investigation work aimed to understand the aquifer's behavior of the mentioned area, through a systematic study will carried out in several stages; Since the information gathered in the initial stage, it is achieved the spatialization of physicochemical variables of water such as pH, electric conductivity, temperature and total dissolved solids, what allows to generate a primary representation of the conditions in which the aquifers water can be found and to outline preliminary hypothesis of water flow's bearing and its composition.

The spatialization process uses geographical variables (North and East coordinates) and the physicochemical parameters measurements mentioned above, valuing them by means of the interpolation software Surfer 8.08 which uses statistical mathematical algorithms to generate a space model of the estimated values.

The model generated from the pH data measured in summer, is taken a sample of an statistical evaluation to define its reliability, which is defined from the report that Surfer generates in the interpolation.

* Research.

** Faculty of Physical-chemical's Engineerings, Program of Geology, Manager: Jorge Pinto Valderrama.

INTRODUCCIÓN

El estudio e investigación de los recursos hídricos, y particularmente del agua subterránea juegan un papel cada vez más importante dentro del marco socio-económico de las diferentes regiones, así como en el contexto socio-ambiental. Este proceso investigativo incluye la identificación de las circunstancias físicas, químicas y geológicas que influyen en las condiciones de calidad y cantidad del recurso, lo que lo convierte en un proceso investigativo extenso, donde inicialmente se busca identificar las variables y factores que influyen y condicionan el transporte, almacenamiento y composición del agua subterránea, para finalmente valorar la viabilidad del control de dichas variables con fines de explotación.

En este sentido el objetivo de este trabajo se enmarca dentro de la etapa inicial del proceso mencionado anteriormente, donde se busca presentar concretamente un análisis espacial de cuatro parámetros físico-químicos del agua (pH, conductividad eléctrica, temperatura y sólidos disueltos totales) los cuales aportan una idea preliminar de la calidad del agua en los acuíferos existentes en el sector de la Mesa de Los Santos. También se presenta un análisis estadístico del parámetro pH medido en verano, fundamentándose en la información generada en la espacialización de dicho parámetro químico.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir al conocimiento hidrogeológico de la zona centro, sur y sureste de la Mesa de Los Santos, Departamento de Santander, mediante la valoración de datos físico-químicos del agua subterránea en dicho sector.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analizar espacialmente cuatro parámetros físico-químicos del agua (pH, conductividad eléctrica, temperatura y sólidos disueltos totales) como aporte preliminar de la calidad del agua en los acuíferos existentes en el sector de la Mesa de Los Santos.

Analizar estadísticamente el parámetro pH medido en verano, fundamentándose en la información generada en la interpolación de dicho parámetro químico.

3. METODOLOGÍA

El presente estudio se elabora a partir de la información físico-química recopilada en dos fases de campo, donde se realizó un inventario de fuentes de agua subterránea en los periodos de invierno y de verano (TABLA 1 y FIGURA 1).

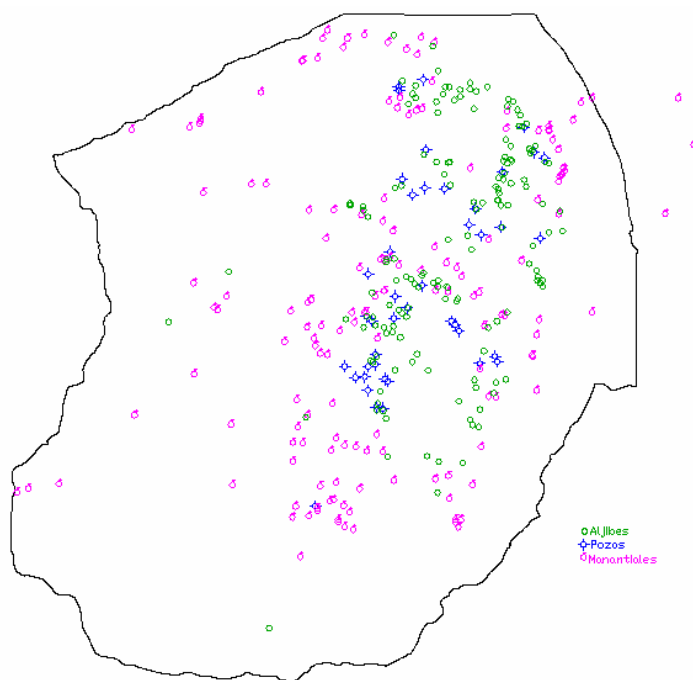


Figura 1. Ubicación de los puntos de agua inventariados en la Mesa de Los Santos.

Tabla 1. Puntos de agua inventariados en la Mesa de Los Santos

CAMPAÑAS	MANANTIALES	POZOS	ALJIBES	TOTAL	PUNTOS POR Km²
VERANO	128	40	157	325	0.8
INVIERNO	161	44	168	373	0.9

Durante esta etapa se realizaron las diferentes mediciones de las condiciones de diseño de las construcciones que enmarcan las fuentes,

así como las mediciones de parámetros físicos y químicos del agua tales como el pH, los sólidos disueltos totales (SDT), la conductividad eléctrica, y la temperatura. La información recopilada se georeferencia y archiva en formatos estandarizados de INGEOMINAS.

La información inventariada se somete a clasificación para el procesamiento estadístico, descartando algunos valores de manantiales en las zonas donde existe suficiente información de pozos y aljibes cuyos valores se aproximan mejor a las condiciones subterráneas; igualmente el área de estudio se divide en seis sectores o bloques, buscando reducir el porcentaje de error en el procesamiento estadístico. (Figura 2)

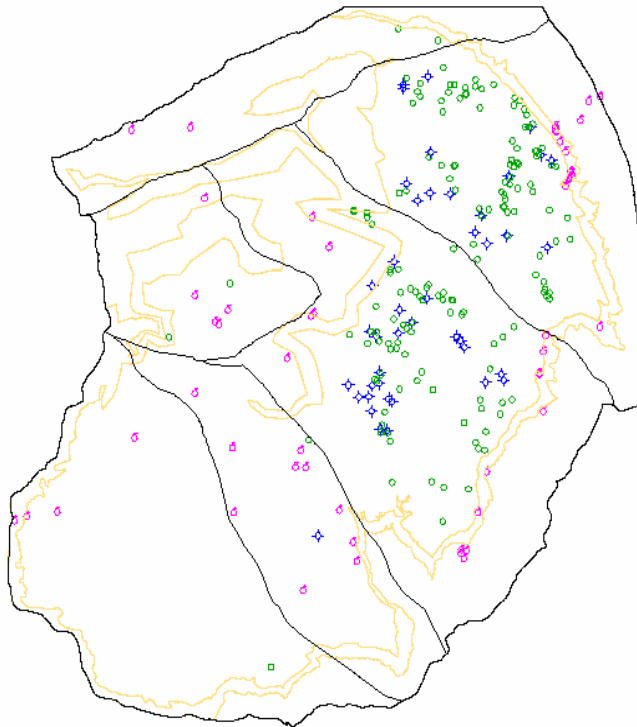


Figura 2. Ubicación de los puntos de agua seleccionados y sectorización por bloques para la espacialización en la zona de la Mesa de Los Santos.

El análisis espacial de los datos físico-químicos e hidrológicos se realiza con el programa de interpolación Surfer 8.08 (Golden Software, 2004), el cual utiliza algoritmos matemáticos estadísticos para generar un modelo espacial de los valores que se estimen.

Surfer implementa varios métodos de interpolación de acuerdo con las necesidades del usuario. Para este trabajo se aplicó el método geoestadístico Kriging (los métodos geoestadísticos además de tomar en cuenta los factores geométricos también incluyen una relación estadística entre los distintos puntos medios para generar la predicción y establecer la fiabilidad del modelo).

Posteriormente se seleccionó el parámetro químico pH (en época de verano) para la valoración estadística, la cual parte de información reportada por el software SURFER al generar las espacializaciones, donde se plantea un modelo que relacionan las coordenadas geográficas X e Y con el valor medido de pH. Este reporte se conoce como "Gridding Report".

3.1 LOCALIZACIÓN

La zona de la Mesa de Los Santos está localizada en la Provincia santandereana de Soto entre las coordenadas geográficas 6° 43' a 6° 56' de Latitud Norte y 73° 00' a 73° 11' de longitud al Oeste.

El área de estudio comprende 400Km² y abarca los municipios de Piedecuesta, Los Santos y una pequeña porción al Noroeste del municipio de Girón. (Figura 3)

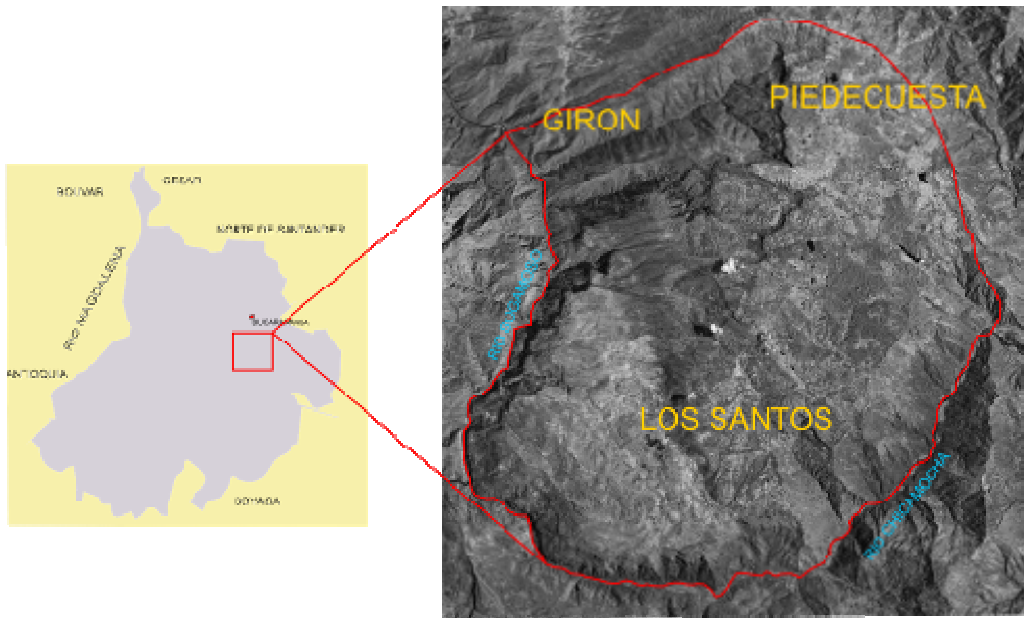


Figura 3. Localización de la zona de estudio.

3.2 ANTECEDENTES

Los parámetros hidro-químicos y su distribución aportan información acerca del origen y distribución del agua subterránea, permiten identificar los procesos físico-químicos que afectan al agua, e igualmente muestran la calidad de la misma, su degradación y la presencia de contaminantes; dicha información es de suma importancia para establecer la evolución del acuífero en el tiempo y el espacio, así como evaluar su vulnerabilidad. Además, de esta manera se pueden detectar afecciones y establecer las medidas correctoras en cuanto a contaminación, salinización, pérdida de calidad y de esta manera gestionar el recurso.

La estimación de los factores exactos que influyen en la composición química del agua subterránea y en el comportamiento a profundidad de la misma, corresponden a un análisis extenso que implica un seguimiento temporal y una serie de análisis químicos bastante precisos. Aún así, con la información primaria recolectada en este estudio, se pueden definir unas condiciones parciales, las cuales dan una visión general de lo que le ocurre al agua subterránea, al tiempo que aportan información para la comprensión del sistema hidrogeológico que se está estudiando.

Para la valoración de los parámetros se utilizaron las normas técnicas para el agua potable, establecido por el Ministerio de salud en el decreto 475 de 1998 (Ministerio de Salud, 1998).

Es necesario aclarar que la composición química total del agua varía dentro de ciertas condiciones, como consecuencia de las lluvias; en los períodos lluviosos (que para la Mesa de Los Santos corresponde a los meses de Marzo-Abril y Octubre-Noviembre) la mineralización es menor que en los períodos de sequía (Diciembre-Febrero y Mayo-Septiembre).

Aun así, la composición química relativa varía poco (González et al., 2001).

Este estudio se enmarca dentro del proceso de investigación geológica e hidrogeológica que adelanta INGEOMINAS en el departamento de Santander, donde mediante el convenio INGEOMINAS-UIS se ejecutó el trabajo de apoyo denominado Investigación Geológica e Hidrogeológica de la Mesa de Los Santos y sector Nordeste de Curití (INGEOMINAS-UIS, 2008), cuyas información de campo sirvió como material de fundamento para la elaboración del presente documento.

La zona de la Mesa de Los Santos ubicada en la cordillera Oriental colombiana, desde el punto de vista geológico se ha venido estudiando tectónica y litológicamente desde hace varias décadas, con valiosos aportes de Cediel (1968), Etayo (1989) y Toussant (1993) entre otros, las cuales contribuyeron en las definiciones actuales de las unidades geológicas presentes en el sector: la de edad paleozoica, Formación Silgará y las de edades mesozoicas como las Formaciones Granito de Pescadero, Jordán, Los Santos, Rosablanca, Paja, Tablazo.

Sin embargo el análisis físico-químico e hidrológico de las condiciones del agua subterránea en la Mesa de Los Santos se reduce a los Informes recopilados por la autoridades regionales ambientales que para la Mesa de los Santos corresponden a la Corporación Autónoma Regional de Santander-CAS y la Corporación Autónoma de Bucaramanga-CDMB (CDMB, 2005 a 2007), pues el estudio hidrogeológico previo es nulo.

3.3 MARCO GEOLÓGICO

La Mesa de Los Santos tiene una extensión aproximada de 430 Km², y está limitada por los Ríos Chicamocha, Suárez, Manco y las Quebradas Los Montes y Grande.

Litológicamente la zona presenta metasedimentos de la Formación Silgara que son intruídas por un granito de textura porfirítica a afanítica, compuesto de feldespato potásico, cuarzo y mica biotita, (Formación Granito de Pescadero) que aflora al Este del área. Existen también rocas cretácicas siliciclásticas donde los conglomerados líticos, areniscas, limolitas y arcillolitas se disponen por toda la Mesa de Los Santos, y que composicionalmente se definen en su mayoría como cuarzoarenitas, sublitoarenitas. Las rocas evaporíticas dominan la zona Suroeste compuesta de capas de calizas tipo mudstone principalmente, y yeso con oolitos, ostrácodos y dolomías.

Finalmente se encuentran depósitos aluviales y derrubios discordantes con respecto a las formaciones Jordán, Los Santos y Silgará, a lo largo de los ríos y quebradas así como en la base de los escarpes (INGEOMINAS-UIS, 2008).

Tectónicamente la zona presenta una singularidad en la que incide el dominio de los sistemas de Fallas del Suárez y de Bucaramanga, lo cual se ve fuertemente marcado en el diaclasamiento disperso por toda la Mesa de Los Santos. Los tres sistemas de fallas principales tienen dirección NW-SE, NE-SW y E-W en orden de preferencia (INGEOMINAS-UIS, 2008).

4. RESULTADOS

pH

En aguas subterráneas el valor del pH comprende un rango de 6,5 a 8 (Custodio y Llamas, 1983), significando que son entre neutras a un poco alcalinas, aun así este valor es relativo pues son muchos los factores que modifican este valor medio. El agua lluvia normal se considera que tiene un pH en un rango de 5.5 a 6,0 lo que indica una buena cantidad de iones hidrógeno.

La FIGURA 4 presenta la espacialización de los datos obtenidos en cada campaña, allí se observa la variación entre los dos campañas, donde en términos generales se puede estimar que el agua extraída en la zona tiene valores de pH entre 4 y 8.

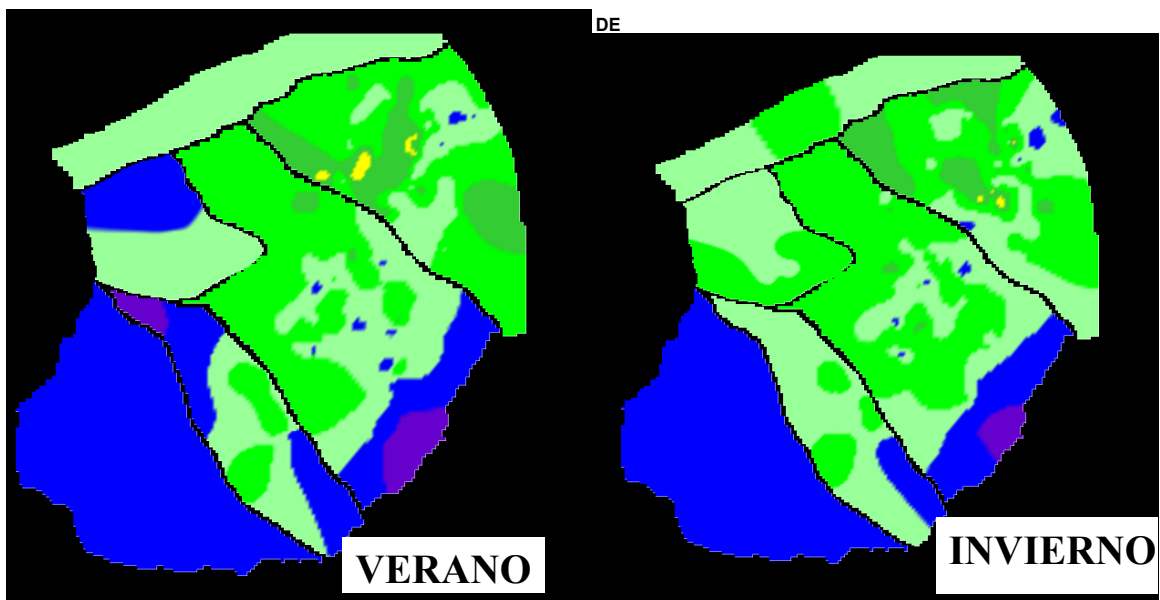


Figura 4. Distribución espacial de pH en invierno y verano.

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es la facilidad del agua de conducir corriente eléctrica (Custodio y Llamas, 1983) y es directamente proporcional a la cantidad de sales disueltas en el agua (iones disueltos). El agua pura es un buen conductor de la electricidad, sin embargo el agua subterránea está bastante influenciada por los cationes y aniones que el medio circundante aporta en ella. Los valores aceptados de conductividad eléctrica para el agua subterránea comprenden un rango entre los 50 a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En la FIGURA 5 se aprecian cuatro rangos de valores de conductividad hallados en las muestras de agua.

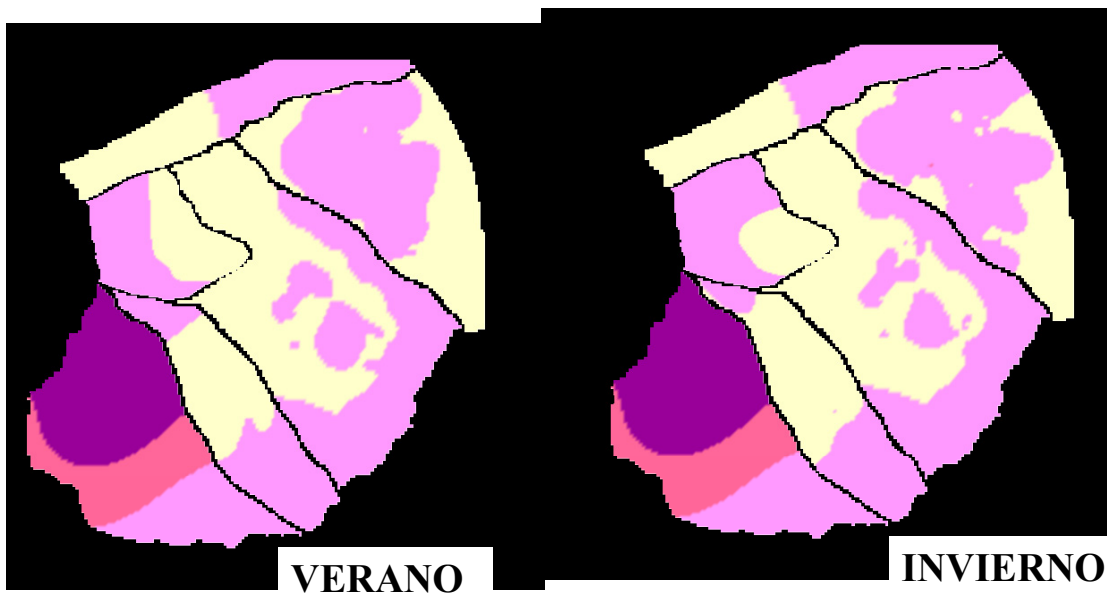


Figura 5. Distribución espacial de Conductividades eléctricas en invierno y verano.

Sólidos Disueltos Totales o SDT

Los Sólidos Disueltos Totales o SDT, es la medida del peso de todas las sustancias disueltas en el agua, incluyendo volátiles; los valores aceptables de SDT deben ser menores a 500 ppm. En las zonas áridas

o semi-áridas como en el sector Oeste de la Mesa de Los Santos este valor tiende a ser elevado debido principalmente a la descompensación entre las precipitaciones y la evapotranspiración, siendo esta última mayor. La FIGURA 6 presenta la distribución espacial de los SDT obtenidos durante la comisión de verano e invierno

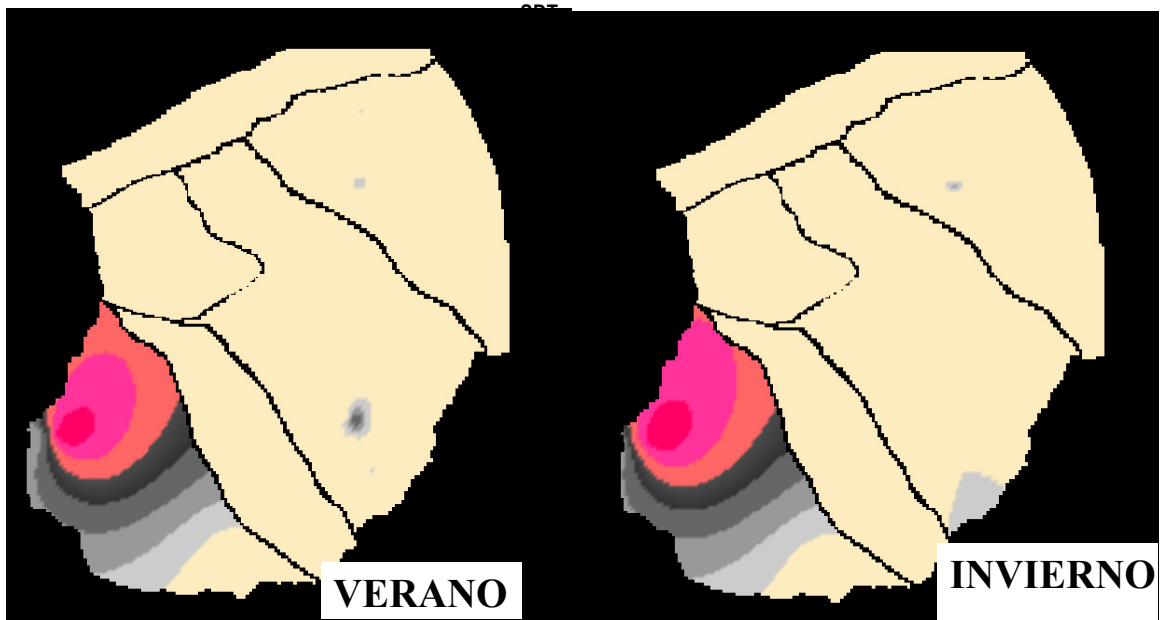


Figura 6. Distribución espacial de SDT en invierno y verano.

Temperaturas

Las aguas subterráneas son poco variables en la temperatura (Custodio y Llamas, 1983); generalmente la temperatura de las aguas subterráneas aumenta 33°C por cada Km. de profundidad. En las aguas que permanecen en capas con porosidad primaria (conocidas como aguas de capa), las temperaturas varían mucho con la extensión y penetración de la capa en el suelo. En las llamadas aguas de capas es decir las presentes en la porosidad primaria, presentan variación de

temperaturas con la extensión y con la penetración de la capa en el suelo, generalmente agua de capa que circule muy lentamente por un estrato impermeable situado a 100 m de profundidad poseerá una temperatura superior en dos o tres grados a otra que se encuentre en un terreno compacto situado solamente a 30 m abajo de la superficie, según la ley del gradiente geotérmico. Al distribuir de forma espacial la temperatura obtenida de los pozos y aljibes en la comisión de verano e invierno (FIGURA 7) se aprecia que en verano, las temperaturas tienen un rango entre 18 a 28 °C.

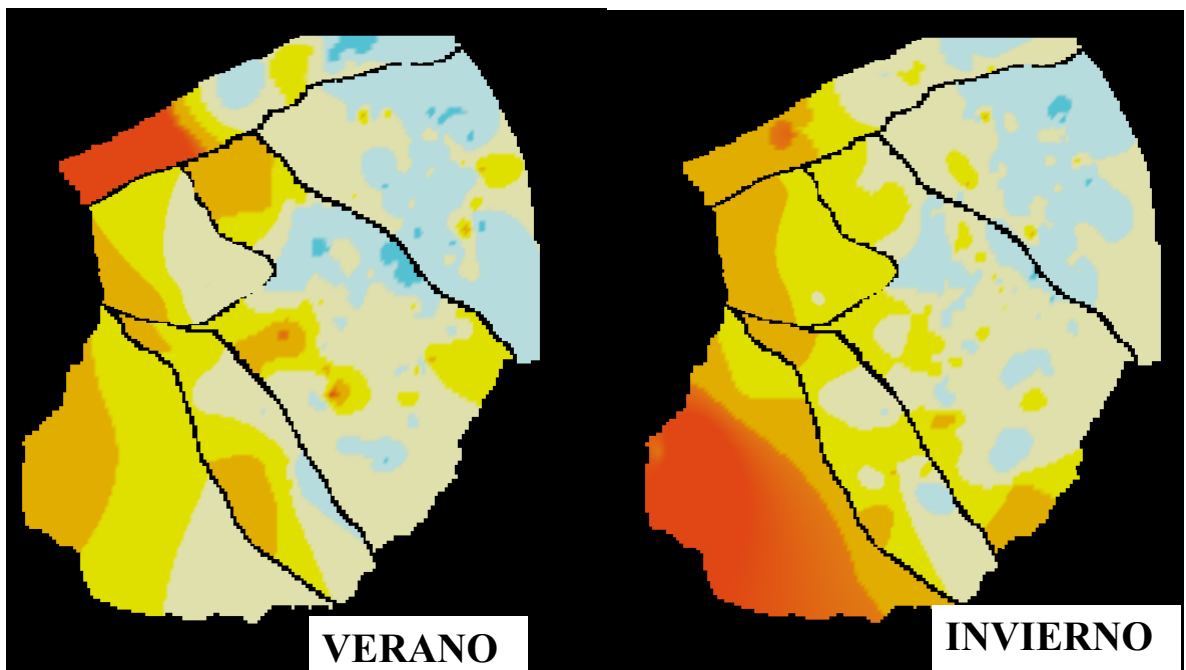


Figura 7. Distribución espacial de Temperaturas en verano e invierno.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El agua extraída en la zona tiene valores de pH entre 4 y 8, siendo dominante un comportamiento ácido. En el sector Sureste, así como en los escarpes del oeste, el agua es básica, lo cual podría tener diversas causas, entre las cuales sobresale la litología dominante pues allí se encuentra principalmente material calcáreo, y es probable que se produzca una disminución de la concentración de calcio, debido a precipitación de calcita e intercambio catiónico, aumentando el contenido en sodio y así el pH se hace más alcalino. Cabe agregar, que ésta es la zona más distal al flujo principal, por lo que allí las aguas tienden a ser hidrogeno-carbonatadas, donde el dióxido de carbono se ha reducido considerablemente elevando también el valor del pH. A su vez, en el sector Noreste, se encuentran los valores más bajos, posiblemente por la actividad agrícola y avícola presente, así como la mayor recarga de la zona.

Las conductividades se pueden agrupar según la valoración medida obteniendo un rango alto (1000 a 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) presente en la zona Suroeste, cerca donde se encuentran las minas, las cuales puede estar afectando las aguas del lugar; el segundo rango reúne las conductividades permitidas (50 a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) localizadas hacia los escarpes en el Este, una pequeña franja al Oeste, así como un sector en el Norte de la Mesa de Los Santos; y el tercer rango, las conductividades bajas (0 a 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$), domina el centro Oeste y la zona escarpada del Noreste. En la región central de la Mesa de Los Santos se observan los valores más bajos de los aceptados en las aguas subterráneas, esto puede deberse a que en dichas zonas, el agua se

hace más superficial, lo que implica que sea menor el recorrido y el tiempo de permanencia del agua en el acuífero, indicando una baja concentración de sólidos y sales disueltas.

En la zona Sur de la Mesa de Los Santos se encuentran la mayor concentración de SDT, con valores que van de 250 a 2000 ppm lo cual indica una fuerte presencia de partículas y/o gases en el agua de este sector. De manera casi homogénea las concentraciones menores a 250 ppm se encuentran por todo el resto de la Mesa de Los Santos con algunos datos puntuales altos hacia el centro de la zona.

Se aprecia claramente cómo el valor dominante comprende el rango de 0 a 250 ppm, debido a diferentes factores donde por ejemplo podríamos decir que los esquistos y filitas están compuestos por aluminosilicatos, micas, cuarzo y óxidos de hierro, todos ellos de baja solubilidad (Delgado et al, 2006), su meteorización suele aportar pocos solutos de agua; lo anterior no se aplica a rocas con minerales más solubles – por ejemplo rocas carbonatadas como las calizas; ellas son solubles, lo cual permite el incremento de sustancias disueltas en el agua. Es en las calizas donde se aprecian los rangos más altos inventariados, que pasan de 1250 ppm.

Las temperaturas más bajas tienen un rango entre 18 a 22 °C; se encuentran al Noreste de la zona (Piedecuesta) con un aumento gradual hacia el Noroeste (Girón) donde se presentan las temperaturas mayores a 28°C.

6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

En esta sección se presenta un análisis estadístico de los resultados generados por el software Surfer al realizar cada uno de los análisis espaciales mencionados en este artículo. Más específicamente el análisis estará concentrado en ciertos cálculos incluidos en el “Gridding Report”, para análisis espacial de la variable pH medida en verano. La manera de interpretar estos resultados será fácilmente extensible a las demás variables del estudio.

Los datos de coordenadas geográficas X, Y así como el pH, tanto para la zona completa (zona) como para cada uno de los bloques (bloque 1, bloque 2, bloque 3, bloque 4, bloque 5 y bloque 6) por separado, fueron procesados por el software. Vale aclarar que los análisis estadísticos son válidos en la medida en que se recolecte una suficiente cantidad de datos que sean representativos del área que se está estudiando. Tal no es el caso de los bloques 1 y 5, y en menor grado el del bloque 6; en estos bloques el número de observaciones es demasiado bajo. Los resultados estadísticos a analizar, son mostrados en la TABLA 2, y su análisis se presenta a continuación.

Tabla 2. Resultados del análisis estadístico

	ZONA	BL-1	BL-2	BL-3	BL-4	BL-5	BL-6
ESTADÍSTICAS UNIVARIADAS							
Número de datos de PH	216	3	19	88	96	4	6
Promedio del PH	6.02	7.51	6.364	6.154	5.725	6.29	6.742
Desviación estándar del PH	0.914	0.362	0.902	0.845	0.909	0.21	0.189
Coefficiente de variación del PH	0.152	0.048	0.142	0.137	0.159	0.033	0.028
CORRELACIÓN ENTRE VARIABLES							
Correlación del PH con la coordenada X	-0.195	0.342	-0.404	0.227	0.345	0.263	-0.242
Correlación del PH con la coordenada Y	0.071	0.125	0.151	-0.476	0.105	0.234	0.522
COVARIANZA ENTRE VARIABLES							
Covarianza del PH con la coordenada X	-625.376	78.98	-562.7	312.42	528.317	203.9925	-35.104
Covarianza del PH con la coordenada Y	4949.235	5.46	231.66	-1124.86	10986.092	55.735	60.308
Covarianza de la coordenada X con la coordenada Y	7296983.87	75132	-1756415.46	7839977.34	26981308.3	4168179.13	269170.42
<i>Planar Regression: Z = AX+BY+C</i>							
CORRELACIÓN ENTRE PARÁMETROS							
Correlación entre A y B	0.027		-0.668	-0.369	0.14	0.999	0.576
Correlación entre A y C	-0.999		-0.912	-0.898	-1	0.999	-0.154
Correlación entre B y C	0.024		0.915	0.74	-0.124	1	0.719
TABLA DE ANOVA							
Valor del estadístico F	4.8885		1.8611	12.637	6.4772	2.7716	3.73
Significancia del estadístico F	0.008		0.188	0	0.002	0.388	0.154
Coefficiente de determinación múltiple	0.044		0.189	0.229	0.122	0.847	0.713

Estadísticas univariadas

Aquí se muestran estadísticas básicas – como el mínimo, el máximo, el rango, la media, la desviación estándar, etc. – para cada una de las tres variables involucradas en el estudio: el pH y las coordenadas X e Y. La variable de mayor interés es el pH; más exactamente nos interesa analizar su valor representativo y su variabilidad. Este análisis puede ser realizado a través del coeficiente de variación de dicha variable.

Los coeficientes de variación de todos los conjuntos están alrededor o por debajo de 15% - valor que puede considerarse como aceptable (Gil, 2008), es decir, que el valor promedio de 6.02 como pH representativo de toda la zona, es válido. Lo mismo pasa con el valor de pH de 7.51 para el bloque 1 y así sucesivamente.

Correlación entre variables

La correlación entre dos variables mide el grado de dependencia lineal de una variable con respecto a la otra. La correlación es positiva cuando ambas variables crecen o decrecen simultáneamente; es negativa cuando una variable crece mientras la otra decrece; y es igual a cero cuando no existe ninguna relación lineal entre las dos variables. La correlación puede ser calculada mediante la siguiente fórmula (Golden Software, 2004) – Para la definición de la covarianza, ver la siguiente sección:

$$\text{Correlación}(X, Y) = \frac{\text{covarianza}(X, Y)}{(\text{standard deviation}(X))(\text{standard deviation}(Y))}$$

Para plantear un modelo lineal con una variable dependiente (pH) y dos variables independientes (coordenadas X, Y) como el incluido en este reporte, se esperaría que existiera correlaciones significativas pH – X y pH – Y. En la columna de la zona (Toda la zona), el valor de correlación de pH con X es -0,195 y el de pH con Y es 0,071, valores que son realmente bajos; esto da una idea de que no se puede plantear un modelo que represente una dependencia lineal de pH con respecto a las coordenadas X e Y para toda la zona. Los valores de correlación son más altos para los bloques individuales, lo que lleva a concluir que es más razonable plantear modelos a nivel de bloque.

Covarianza entre variables

La covarianza entre dos variables es una manera de generalizar el comportamiento de la varianza de una variable con respecto a la otra. La covarianza es otra medida más para analizar la dependencia entre dos variables. Si es positiva hay dependencia directa, es decir, a grandes valores de una variable corresponden grandes valores de la

otra. Una covarianza 0 se interpreta como la no existencia de una relación lineal entre las dos variables estudiadas. Si es negativa hay dependencia inversa, es decir, a grandes valores de una variable corresponden pequeños valores de la otra. La covarianza se puede calcular mediante la siguiente fórmula (Golden Software, 2004):

$$\text{Covariance}(X, Y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \text{mean}(X))(Y_i - \text{mean}(Y))$$

La covarianza es afectada por las magnitudes en que se miden las variables estudiadas; para anular el efecto de tales magnitudes se recurre al coeficiente de correlación, el cual – como se puede ver en su fórmula (ver sección anterior) – depende directamente de la covarianza.

Correlación entre parámetros

La correlación entre parámetros se utiliza para estudiar la multicolinealidad entre variables; en un modelo lineal se espera que las variables independientes sean verdaderamente independientes entre sí y presenten así una baja multicolinealidad. La correlación entre parámetros cercana a uno indica una alta multicolinealidad. Cuando existe una alta multicolinealidad, los coeficientes de regresión estimados tienden a no ser significativos, por tanto hay variables que ocultan su influencia. Pequeñas variaciones muestrales indican alta variación en los coeficientes, lo que implica que unos datos pueden dar estimadores muy distintos de otros datos que son casi iguales, existiendo falta de robustez en la estimación.

El hecho de que la correlación entre A y B sea alta, pero baja entre A y C, conduce a pensar que sería más apropiado plantear un modelo $Z = AX + C$ ó $Z = BX + C$. Para el bloque 2 y 3 se estimaría un modelo $Z = AX + BX$; en el bloque 4 los modelos $Z = AX + BX$ ó $Z = BX + C$; para el

bloque 5 el modelo sería $Z = AX$ ó BX ; el bloque 6, $Z = AX + C$ y en el caso de toda la zona $Z = BX + C$.

ANOVA

En la generación de modelos lineales como el presentado en el reporte, se utiliza el análisis de la varianza para probar la hipótesis de que los parámetros de un modelo son significativos. El modelo lineal aquí planteado es referido como el modelo de regresión planar cuya forma es $Z = AX + BY + C$. Este es un modelo lineal donde los parámetros son A, B y C; la variable dependiente es Z y las variables independientes son las coordenadas X e Y. La hipótesis que se desea plantear con el análisis de varianza es que los parámetros A y B no son significativos, es decir que el modelo planteado no es válido ni para hacer estimaciones ni para interpretar las contribuciones de cada parámetro.

El factor clave para determinar la validez de esta hipótesis es el estadístico de Fisher, F, el cual aparece en la tabla de ANOVA del reporte. Este valor conlleva un valor de significancia que deberá ser menor de 0,05 para poder aceptar la hipótesis con nivel de confianza del 95%. Si se usa el umbral de 0,10 el nivel de confianza cambiará al 90%, y así análogamente con las demás cifras.

Se puede observar que los valores de significancia para los bloques 3, 4 y zona completa, están por debajo de 0.01; por tanto se puede concluir que la hipótesis de que el modelo es válido para hacer estimaciones o interpretar las contribuciones de cada parámetro, dentro del bloque correspondiente, puede ser aceptada con un nivel de confianza del 95% (el "Gridding Report" solo muestra el valor de F; los valores de significancia para cada valor de F fueron calculados con el

software estadístico SPSS (SPSS Inc., 2006). Para los bloques 2 y 6 tal aseveración puede ser hecha con un nivel de confianza, máximo del 80%, el cual es bajo. Usualmente, en estadística se toma un nivel de confianza mínimo del 90%.

Coefficiente de determinación múltiple

Este valor indica el porcentaje de la variación de la variable dependiente, pH, que explican las variables independientes X e Y. Entre más alto sea el valor – que fluctúa entre 0 y 1 – podremos concluir que las variables independientes X e Y tienen una fuerte influencia en la variación de la variable pH. Es decir que el pH se comportará acordeamente con la ubicación geográfica del punto que se está midiendo. El coeficiente de determinación múltiple se puede calcular mediante la siguiente fórmula (Golden Software 2004):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Z_i - AX_i - BY_i - C)^2}{\sum(Z_i - \bar{Z})^2}$$

En la TABLA 2 se puede observar que los coeficientes de determinación son bajos en general – con excepción de los bloques 5 y 6, sin embargo, para estos dos bloques no es conveniente sacar conclusiones en este respecto, debido a su bajo número de datos. En orden de magnitud, seguiría el bloque 3, donde el coeficiente de determinación es 0.229, significando que las variables independientes X e Y explican solamente el 22.9% del total de la variación que tiene el pH en dicho bloque; el 77.1% restante debería ser explicado por otras variables diferentes.

7. CONCLUSIONES

A partir de lo obtenido se concluye que la mayor parte de la Mesa de Los Santos tiene un pH aceptable, con pH levemente ácidos, neutro y levemente alcalinos; y además existe un sector menor con pH alcalinos y ácidos. Las diferencias entre las dos campañas inventariadas no son marcadas, en general estas diferencias significaron una mayor liberación de iones de hidrógeno que se traduce como reducción en la escala de pH por toda la Mesa de Los Santos.

La mayoría de puntos de agua en la campaña de invierno presentan una reducción en sus valores de conductividad eléctrica, lo cual concuerda con una mayor disolución en época de altas precipitaciones.

La estimación de temperaturas en el sector sur de la Mesa de Los Santos se incrementó en la época de Invierno debido a los cambios climáticos generados por el fenómeno de la Niña, concluyéndose que durante el invierno, las temperaturas al Noreste se mantienen estables, pero hacia el Noroeste, que fue el sector más caluroso en el verano, se reduce 2 °C en promedio, y contrario a esto la tendencia al Suroeste es de incremento 2 °C convirtiéndose en la zona más calurosa de la campaña de invierno.

Sumado lo anterior con la escasez del suministro del agua en gran parte de la Mesa de Los Santos muestra una indudablemente la necesidad de dar continuidad al proceso extenso de identificar aquellas variables mencionadas que estarían afectando el transporte, almacenamiento y composición del agua subterránea, mediante

procesos complejos de hidroquímica, geoquímica y tectónica donde la información detalle los cambios evolutivos del agua a profundidad, así como la caracterización dinámica de acuíferos y su relación lateral.

En la zona de estudio el uso que se da al suelo carece de control e indiscutiblemente está afectando la calidad del agua que se está infiltrando, por tanto se requiere monitoreo de los insumos y usos del suelo para un mejor control de los factores que influyen en la composición química del agua.

Referente el análisis estadístico, es importante recomendar la adquisición de más datos en los bloques 1, 5 y 6, con el fin de que los resultados de este análisis sobre dichos bloques, sean válidos. Para los bloques 2, 3 y 4, y toda la zona, se realizó el análisis del pH en función de las coordenadas geográficas X e Y solamente; en general se concluye que, aunque estas coordenadas contribuyen en un cierto grado a explicar la variabilidad del pH, existen otras variables que tienen una influencia estadística significativa sobre dicho parámetro.

Esto sirve para recomendar en últimas un seguimiento tanto temporal como espacial más minucioso donde se haga seguimiento de variables considerables como las zonas de recarga, fracturamiento de las rocas, composición química de las mismas, así como los diferentes niveles estratigráficos a profundidad. Y donde se tome en cuenta la densidad y veracidad de los datos que se suministren y puedan a portar en un modelo estadístico robusto.

8. REFERENCIAS

Cediel, F., 1968. El grupo Girón, una molasa mesozoica de la cordillera Oriental. Servicio Geológica Nacional. Boletín Geológico. Bogotá.

Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga-CDMB, 2005 a 2007. Informes de visitas técnicas para concesión de aguas. Material interno no publicado.

Custodio, E. y Llamas M. R. Editores. 1983. Hidrología Subterránea. (2 tomos). Omega, 2350 pp.

Delgado J., Juncosa R., Meijide R., Vásquez A., Barrientos V. Características termohidrogeoquímicas de las aguas subterráneas en Galicia. Instituto Superior de Ingeniería de Porto-ISEP. Actas del II Foro de aguas Envasadas y Balnearios.

Etayo, F. et al. 1989. Análisis facial del inicio del avance marino del cretácico en la región SW del Macizo de Santander. Quinto congreso Colombiano de Geología. Excursión Pre-congreso N°2.

Gil, E., Elementos claves en la uniformidad de distribución de abonos. Escuela Superior de Agricultura. Barcelona. http://e-md.upc.edu/diposit/acces_arxiu.php?id_obj=22459&id_arx=22459. Consultado el 5 de junio de 2008.

Golden Software, 2004. Manual del usuario del software Surfer versión 8. www.goldensoftware.com

González, P., Llenera, M., Suárez, M., Fagundo, J., Melian, C., Luna, B., Herrera, I., 2001. Sectorización de las aguas naturales y mineromedicinales de las montañas de la Sierra del Rosario y las Alturas del Mariel. Memorias del VII. Taller de la Cátedra de Medio Ambiente, ISCTN. La Habana.

INGEOMINAS–UIS, 2008. Investigación Geológica E Hidrogeológica En La Mesa De Los Santos, Sector Noreste De Curití Y Borde Occidental Del Macizo De Santander, Departamento De Santander. Documento en revisión.

Ministerio de Salud. Decreto 475 de 1998: Normas Técnicas de Calidad del Agua Potable. República de Colombia. http://e-md.upc.edu/diposit/acces_arxiu.php?id_obj=22459&id_arx=22459. Consultado el 18 de abril de 2008.

Toussant J.F., 1993. Evolución Geológica de Colombia - Precámbrico y Paleozoico. Ed: Universidad. Nacional. Medellín. Tomo 1: 229 p.

SPSS Inc., 2006. Manual del usuario del software SPSS versión 12. www.spss.com