

**DETERMINACIÓN DE REACCIONES QUÍMICAS EN INTERFAZ DE UN
ACUÍFERO COSTERO. CASO: GOLFO DE MORROSQUILLO. SUCRE-
COLOMBIA**

**DETERMINATION OF CHEMICAL REACTIONS IN A COASTAL AQUIFER
INTERFACE. CASE: MORROSQUILLO'S GULF. SUCRE-COLOMBIA**

Jhessenia Carrillo¹, Claudia Velazco¹ y Héctor Herrera²

¹Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales "Ezequiel Zamora". Núcleo Guanare, Estado Portuguesa. ²Corporación Autónoma Regional de Sucre "CARSUCRE". Departamento Sucre, Colombia.

Email: jhesseniacarrilloc@yahoo.com, elenavelazco@gmail.com, hectormarioherrera@gmail.com

Recibido: 15-02-2013 Aceptado: 16-04-2013

RESUMEN

El agua es un recurso natural frágil y limitado, sobre todo en las zonas costeras, donde la carga poblacional ha puesto en riesgo la calidad y cantidad del recurso, el cual en muchos casos se obtiene de la explotación de los acuíferos costeros. Esta actividad ha llevado a la sobrevaloración de las aguas, dando inicio a un proceso de contaminación por salinización, producido por el avance del mar tierra adentro. Este es el caso del acuífero de Morrosquillo, ubicado en la planicie costera de Morrosquillo, Departamento de Sucre, Colombia. Para determinar los tipos de aguas presentes y conocer el grado de contaminación por salinización en estas aguas, Martínez (2009), realizó un estudio hidrogeoquímico en el acuífero determinando las facies de estas aguas, demostrando que en algunas zonas las facies cloruradas estaban relacionadas al proceso de intrusión salina, pero no fue comprobado si el resultado arrojado estaba vinculado a un proceso de intrusión o a un proceso de agua mezcla con aguas fósiles. Por eso para estudio, se quiso conocer el tipo de reacción química presente en la interfaz entre el acuífero de Morrosquillo con el agua de mar y determinar a detalle si se trató de un proceso de contaminación salina por agua de mar. Los resultados obtenidos mostraron que los inicios del proceso de contaminación por intrusión marina está ubicado en la zona centro-sur de Tolú y norte de Coveñas, y que algunos puntos que en el 2009 se asumieron como evidencia de este proceso, estaban relacionados a aguas fósiles.

Palabras Clave: Intrusión Salina, Contaminación, Hidrogeoquímica, Reacción química.

SUMMARY

Water is a limited and fragile natural resource, especially in coastal areas where the population increase has risk the quality and quantity of the resource, which in many cases it's obtained from coastal aquifers exploitation. This activity has led to waters overexploitation, generated from a contamination process due to salinization, produced by the sea advance. This is the case of Morrosquillo's aquifer, located in the coastal plain of Morrosquillo, Sucre's Department, Colombia. To determine the types of water present and determine the degree of contamination in this water, Martínez (2009) conducted a study determining the aquifer hydrogeochemical facies of these waters, showing that in some areas the chlorinated facies were related to the process saline intrusion, but it was not the

result thrown checked whether it was linked to a process or a process intrusion of water mixed with fossil water. For this study, it wanted to know the type of chemical reaction on the interface between the Morrosquillo's aquifer with seawater and determine in detail whether it was a process of saline contamination by seawater. The results showed that the beginnings of the process of seawater intrusion contamination is located in the south-central of Tolú and northern Coveñas, and some points in 2009 study were assumed to be evidence of this process, were related to fossil waters .

Keywords: Saline Intrusion, Contamination, Hydrogeochemistry, Chemical reaction.

INTRODUCCIÓN

En el 2009, Martínez realizó el modelo hidrogeoquímico de las aguas del golfo de morrosquillo, mediante dos campañas de muestreo; a partir de diagramas de Piper y diagramas de Stiff logró caracterizar las facies de cada una de las secciones de flujo, y por medio de los diagramas de Schoeller obtuvo la variación iónica a lo largo de las líneas de flujo. Mediante este modelo se determinaron varios grupos de aguas; la primera facies eran aguas bicarbonatadas cálcicas a bicarbonatadas mixtas. La segunda facies se catalogó como mixta, la tercera como facies bicarbonatada sódica y por último una facies cloruradas sódicas. Esta última presentó la evidencia de una posible intrusión salina. La evolución química de estas aguas se dio principalmente debido a procesos iónicos de disolución de calcita y yeso y en menor proporción al aporte de iones provenientes de la halita y feldespatos. El proceso de intrusión salina no fue el proceso dominante en la evolución química de las aguas, pero si se afirmó que es posible que afecte a la calidad de las aguas. Por ser un acuífero multicapa se evidenció una intrusión diferencial, indicando que el avance de la cuña se ha dado mayormente en la capa superior del acuífero (op. cit).

Método de determinación de la reacción química de la interfaz en un acuífero costero

El método se realiza cuando es conocida la concentración de un componente conservativo, en este caso se refiere a los cloruros de las aguas presentes (Cl) en las dos (o más) aguas extremo que se están mezclando y también en cada una de las aguas mezcla. Es decir, las aguas consideradas como dulces (tierra adentro en el acuífero), aguas mezclas (zona de la costa), y por último el agua de mar (Manzano, 2011). Para todas las aguas mezcla fue necesario realizar el siguiente balance de masas:

$$Cl_m = xCl_s + (1 - x)Cl_d \quad (1)$$

Donde x sería el porcentaje de agua salada, y 1-x sería el agua dulce de las aguas mezclas.

Para calcular x y 1-x se empleó la siguiente ecuación:

$$x = \frac{Cl_m - Cl_s}{Cl_s + Cl_d} 100 \quad (2)$$

Donde: Cl: concentración de cloruro en las distintas aguas (mg/l), m: agua mezcla, d: agua dulce

s: agua salada (de mar), x = % de agua de mar en el agua mezcla, (1-x) = % de agua dulce en el agua mezcla. Una vez obtenido los porcentajes de mezcla de agua dulce y salada, se aplicó el balance de agua para cada agua mezcla usando la relación de calcio (Ca) y Sodio (Na):

$$Cam = xCas + (1 - x)Cad$$

Donde: Cam: Calcio del agua mezcla (mg/l), Cas: Calcio del agua de mar (mg/l), Cad: Calcio del agua dulce (mg/l), x = % de agua de mar en el agua mezcla, (1-x) = % de agua dulce en el agua mezcla. El valor resultado de esta ecuación fue comparado con el valor de calcio calculado en laboratorio en cada muestra, la cual fue considerada como calcio real.

La misma relación se realizó para el sodio (Na), mediante la siguiente fórmula:

$$Nam = xNas + (1 - x)Nad \quad (3)$$

Donde: Nam: Sodio del agua mezcla (mg/l), Nas: Sodio del agua de mar (mg/l), Nad: Sodio del agua dulce (mg/l). El valor obtenido de esta ecuación fue comparado con el valor de sodio calculado en laboratorio en cada muestra, la cual fue considerada como sodio real.

Una vez obtenido el valor de sodio y calcio mezcla, estos se compararon con los datos de calcio y sodio obtenidos del muestreo en laboratorio, haciéndose así la variación de calcio (ΔCa), es decir se obtiene la diferencia entre el valor de calcio real y el calcio teórico. Si, la diferencia es negativa, es indicativo de una disminución de calcio, y al dividir este valor entre el peso atómico del calcio se obtiene la variación de calcio equivalente. Se hace lo mismo para el sodio (ΔNa). La diferencia sea positiva o negativa es indicativa de dos tipos de intercambio iónico: ablandamiento o endurecimiento, ayudando así a descartar aguas que pudieran estar salinizadas, pero que no son verdaderamente aguas relacionadas a la

mezcla de agua de mar con agua dulce, sino se trata de aguas fósiles, y para el caso de este estudio, se necesita conocer cuáles de estas aguas mezclas son verdaderamente indicadoras del avance de la cuña salina producto de la extracción de agua dulce. Sí la variación de calcio termina siendo menor que la variación de sodio, indica que se está produciendo un ablandamiento, es decir, el calcio está presentando un intercambio iónico a sodio, demostrando así, que se trataría de un agua fósil. Ahora bien, si ocurre lo contrario, se produce un endurecimiento, lo que indica que el sodio está intercambiándose a calcio, y se estaría produciendo el avance de la cuña salina tierra adentro.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del Área de Estudio

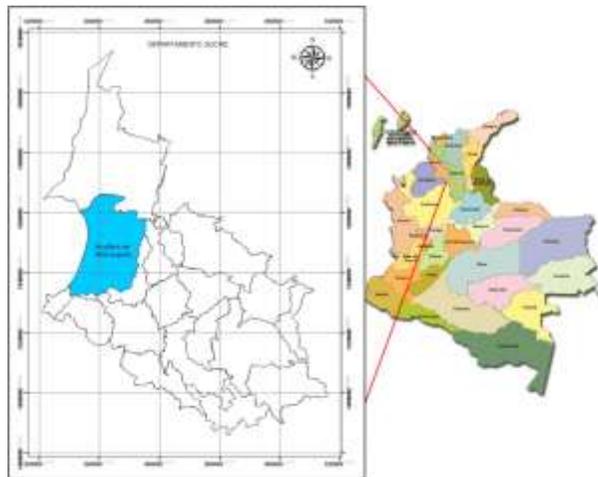


Figura 1.- Ubicación del área de estudio

El área de estudio corresponde a la planicie ubicada en la zona costera del Golfo de Morrosquillo, localizado en la parte nor-occidental de Colombia, en el Departamento de Sucre (CARSUCRE, 2010). El golfo cubre una extensión aproximada de 800 kilómetros cuadrados. Y está limitado al este por algunas elevaciones topográficas, que permitieron la sedimentación de suelos fluvio marinos que constituyen el material de depósito donde se encuentra actualmente el Acuífero de Morrosquillo (Figura 6). Éste, es la principal fuente de abastecimiento de agua de las poblaciones de urbanas y rurales de los Municipios de Santiago de Tolú, Coveñas, San Antonio de Palmito, San José de Toluviejo y San Onofre. (op.cit).

Fases de la Investigación

Para la geoquímica de la zona se usó información tomada de la modelación hidrogeoquímica realizada por Martínez (2009). Pero, para este estudio en particular, fueron extraídos datos de este proyecto y se presentaron de otra forma, usando la metodología empleada por Manzano (2011), de manera de determinar el origen de las aguas subterráneas en el caso de acuíferos costeros, conociendo el tipo de intercambio iónico presente en este. Esto se hizo posible calculando la cuantificación de mezclas de las aguas de la zona. Este método se aplicó con la finalidad de obtener el elemento conservativo de las aguas mezclas, es decir, el cloruro de las muestras, de manera de conocer la concentración de agua dulce y salada en cada una.

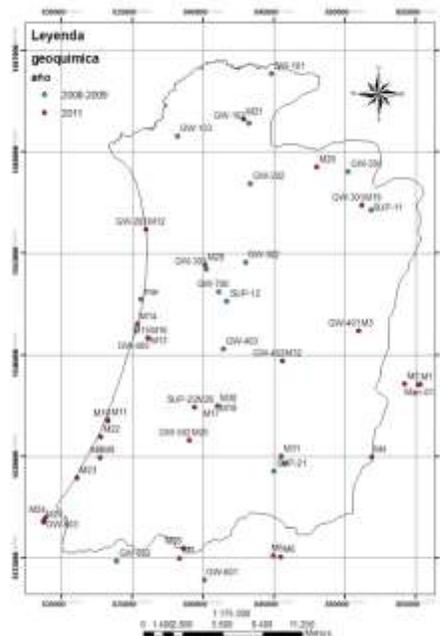


Figura 2 .- Ubicación de muestreos hidrogeoquímicos 2008-2009, 2011

Una vez obtenido los porcentajes de mezcla de agua dulce y salada, se aplicó el balance de agua para cada agua mezcla usando la relación de calcio (Ca) y Sodio (Na), para que de esta forma se compararan los valores del agua mezcla con los valores calculados en laboratorio y así obtener quienes eran aguas fósiles y quienes eran de producto de una intrusión salina

En este estudio se tuvieron tres campañas de toma de muestra de la química de las aguas del acuífero, dos de ellas tomadas por Martínez (2008-2009) y otra por CARSUCRE (2011). Para el caso del muestreo del 2008 y 2009, la muestra M1 fue catalogada como el dato de agua dulce, ya que se trató de un manantial. Y para el 2011 se trabajó con otra muestra denominada M3, la cual estaba presente en una parcela en la zona de recarga del acuífero. Los valores del agua de mar fueron tomados del muestreo realizado por Martínez (2009). Los datos de las tres campañas usados para determinar la mezcla de aguas están presentes en el marco teórico de esta investigación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del análisis de las reacciones químicas presentadas en la interfaz de la zona costera mostraron similitudes con los resultados expuestos en el estudio hidrogeoquímico realizado por Martínez en el 2009, y el monitoreo realizado por CARSUCRE en el 2011, pero con algunas excepciones.

En el caso de las muestras del 2008 (tabla 1), los resultados no evidenciaron la presencia de la cuña salina en la costa, pero si se tuvieron algunas muestras con porcentajes superiores al 1% de agua salada. Según la variación de calcio y sodio de las muestras, se trató de una reacción por ablandamiento, es decir, se trataba de aguas fósiles saladas atrapadas en el sedimento. Un caso de esto es la muestra GW-203 que es el mismo punto de muestreo M12 tomada en el 2011. Se trató de un pozo surgente clasificado como Bicarbonatado clorurado sódico. Según Martínez, este era uno de los puntos que demostraba la presencia de un proceso de contaminación por avance la cuña salina, pero a partir de los resultados obtenidos en esta investigación se descartó esta hipótesis.

De las muestras tomadas en el 2009 (tabla 1), el punto GW-404 se clasificó como aguas bicarbonatadas cloruradas sódicas, con más de 2% de agua salada, y según los resultados de variación de los cationes calcio y sodio, se atribuyó la mayor cantidad de calcio a una reacción química por endurecimiento, es decir, a un proceso de intrusión salina. Otra muestra que según Martínez mostraba evidencia del avance de la cuña salina era GW-800, que es la misma M14 tomada en el 2011, clasificada como clorurada sódica. Esta muestra presentó más de 8% de agua salada, pero en los resultados de variaciones de calcio y sodio demostró que no se trata del proceso de intrusión, sino de una reacción por

ablandamiento, relacionado al sedimento de la zona, el cual fue depositado por un ambiente costero de manglar y de acuerdo a la profundidad del pozo, el cual no es conocido, se presume que esté captando aguas de capas profundas, e incluso podrían tratarse de aguas acumuladas en las formaciones terciarias presentes en la zona de estudio y en el sedimento actual.

CODIGO	% agua salada	% agua dulce	agua salada	agua dulce	Ca mezcla	Ca real	Na mezcla	Na real	ΔCa	ΔNa	Reacción Química en Interfaz	tipo de agua
GW-203	1.25	98.74	0.013	0.987	106.41	47.5	152.86	337	-2.95	8.01	ablandamiento	bicarbonatada clorurada sódica
GW-303	0.48	99.52	0.005	0.995	104.28	60.5	63.15	212	-2.19	6.47	ablandamiento	bicarbonatada sódica
GW-404	2.72	97.28	0.027	0.973	110.34	25.4	318.54	808	-4.25	22.59	ablandamiento	bicarbonatada clorurada sódica
GW-405	0.94	99.06	0.009	0.991	105.54	112	116.19	254	0.32	6.43	ablandamiento	bicarbonatada sulfatada sódica-cálcica
GW-503	0.04	99.96	0.000	1.000	103.10	81.2	13.38	89.7	-1.10	2.01	ablandamiento	bicarbonatada cálcica
GW-504	0.23	99.77	0.002	0.998	103.82	113	34.39	86.8	0.47	2.25	ablandamiento	bicarbonatada cálcica
GW-603	0.24	99.76	0.002	0.998	103.64	77.5	36.17	64.7	-1.31	1.34	ablandamiento	bicarbonatada cálcica-sódica
GW-700	0.32	99.68	0.003	0.997	103.85	43.6	44.94	205	-3.01	6.96	ablandamiento	-
Man-01	muestra agua dulce											bicarbonatada cálcica
GW-203	1.663	98.317	0.017	0.983	111.48	21.20	201.13	262.00	-4.514	2.647	ablandamiento	bicarbonatada clorurada sódica
GW-303	0.481	99.519	0.005	0.995	108.28	46.90	64.26	226.00	-3.089	7.119	ablandamiento	bicarbonatada sódica
GW-404	2.719	97.281	0.027	0.973	114.23	60.50	319.00	212.00	-2.687	-4.652	endurecimiento	bicarbonatada clorurada sódica
GW-503	0.043	99.957	0.000	1.000	107.11	25.40	14.37	838.00	-4.086	35.810	ablandamiento	bicarbonatada cálcica
GW-504	0.219	99.781	0.002	0.998	107.58	112.00	34.47	264.00	0.221	9.980	ablandamiento	bicarbonatada cálcica
GW-603	0.271	99.729	0.003	0.997	107.72	125.00	40.36	61.30	0.864	0.910	ablandamiento	bicarbonatada cálcica-sódica
GW-800	8.519	91.481	0.085	0.915	129.66	149.00	979.07	1642.00	0.9670138	28.822887	ablandamiento	clorurada-sódica

Tabla 1.- Resultados de reacciones químicas en interfaz de estudio 2008, 2009

El muestreo realizado en el 2011 por CARSUCRE (tabla 2), mostró mayores resultados sobre los tipos de reacciones químicas presentes en la costa. Las muestras M8, M10, M11, mostraron claramente una reacción por endurecimiento. Pero, los valores de porcentaje de agua salada son menores al 1%. Sólo en M15 superó el 7%. Lo que demuestra que en la zona de Tolú se está iniciando un proceso de avance de la cuña salina. Aunque, la muestras M12, M13, M14 también están en la zona, no mostraron este tipo de reacción química, sino se obtuvo una reacción por ablandamiento. Según las profundidades de los pozos, se tratan de captaciones profundas. En el caso de la muestra M9, que se encuentra más al sur de esta área, se trata de un piezómetro que capta aguas del acuífero

intermedio a 21 metros de profundidad, también se dio que capta agua fósil. Todo esto, lo que evidencia es que la intrusión en la costa no se da en todas partes, ni en todas las capas del acuífero de la misma manera. Las muestras M15 y M16 se tratan de piezómetros, que captan la capa libre y la semiconfinada. En este punto, la evidencia de avance de cuña por capa fue evidente, ya que en la capa superior (M16) se produjo la reacción de ablandamiento, y en la capa media (M15) se presentó la intrusión (endurecimiento).

No. Muestra CARSUCRE	%agua salada	%agua dulce	agua salada	agua dulce	Ca mezcla	Ca real	Na mezcla	Na real	ΔCa	ΔNa	Reacción Química de la Interfaz	Especie (tipo de agua)
M8	0.16	99.84	0.002	0.998	48.13	69.6	56.64	73.2	1.074	0.720	endurecimiento	Bicarbonatada calcica sodica
M9	0.34	99.66	0.003	0.997	48.70	62.0	76.73	162.0	0.665	3.708	ablandamiento	Bicarbonatada sodica
M10	0.15	99.85	0.002	0.998	48.10	72.2	55.65	82.9	1.205	1.185	endurecimiento	Bicarbonatada calcica sodica
M11	0.31	99.69	0.003	0.997	48.61	110.0	73.43	136.0	3.070	2.720	endurecimiento	Bicarbonatada sodico-calcica
M12	1.84	98.16	0.018	0.982	53.57	43.6	246.64	438.0	-0.499	8.320	ablandamiento	Bicarbonatada clorurada sodica
M13	0.82	99.18	0.008	0.992	50.25	110.0	130.73	236.0	2.987	4.577	ablandamiento	Bicarbonatada Sulfatada sodica
M14	8.11	91.89	0.081	0.919	73.98	154.0	958.55	1414.0	4.001	19.802	ablandamiento	Clorurada sodica
M15	7.62	92.38	0.076	0.924	72.39	301.0	903.23	865.0	11.430	-1.662	endurecimiento	Clorurada sodica
M16	3.09	96.91	0.031	0.969	57.67	21.3	389.55	826.0	-1.819	18.976	ablandamiento	Clorurada Bicarbonatada sodica
M22	0.30	99.70	0.003	0.997	48.57	137.0	71.98	63.0	4.422	-0.391	endurecimiento	Bicarbonatada calcica
M23	0.22	99.78	0.002	0.998	48.31	67.5	62.83	84.1	0.960	0.925	endurecimiento	Bicarbonatada sodico-calcica
M24	1.73	98.27	0.017	0.983	53.23	89.1	234.78	247.0	1.793	0.531	endurecimiento	Clorurada Bicarbonatada sodica
M25	0.39	99.61	0.004	0.996	48.88	149.0	82.85	50.8	5.006	-1.394		Bicarbonatada calcica
M26	0.23	99.77	0.002	0.998	48.35	57.6	64.48	37.4	0.462	-1.177		Bicarbonatada Sulfatada calcica
M27	0.35	99.65	0.003	0.997	48.74	76.0	77.85	147.0	1.363	3.007	ablandamiento	Bicarbonatada sodica

Tabla 2.-Resultados de reacciones químicas en estudio de 2011

Probablemente esto pudiera estar relacionado con la variación litológica de la zona, la cual pudiera ser más permeable en la capa media, y menor en la superior, dando paso a la intrusión en la capa inferior y no en la libre. Más hacia el sur, en la zona de Coveñas, las muestras M22, M23, M24, evidenciaron la presencia de la cuña salina. Y en la zona de M27, se produce la reacción de ablandamiento, indicando la captación de agua fósil. Esto puede ser explicado debido a la profundidad de captación del pozo, el cual es superior a los 80 metros, muy cercano al basamento del acuífero.

Los resultados que presentaron la reacción química indicativa de intrusión salina se muestran en la figura 3. Esto evidenció claramente que los inicios del proceso gradual de intrusión salina se estén dando hacia la zona central y sur de Tolú y en la zona de Coveñas,

pero no se considera que sea un resultado alarmante que indique un grado de contaminación de las aguas que ponga en riesgo la calidad de estas aguas.

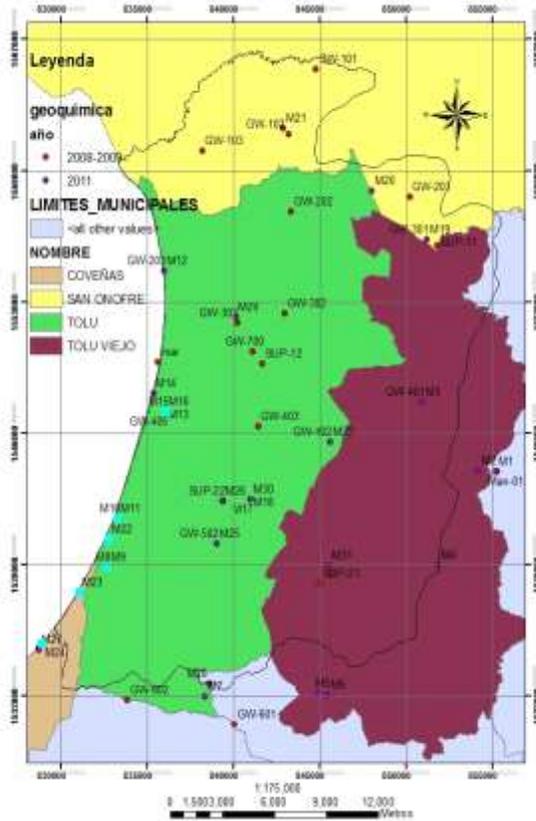


Figura 3.- Muestras con reacción química por endurecimiento. Intrusión Salina

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis de las reacciones químicas de la interfaz mediante de la metodología de Manzano, a partir del modelo hidrogeoquímico elaborado por Martínez en el 2009, y el monitoreo realizado por CARSUCRE en el 2011, demostró que las zonas que realmente están siendo sometidas a un proceso gradual de contaminación por el avance de la intrusión salina hacia el acuífero de Morrosquillo están ubicadas hacia el centro y sur de Tolú, así como hacia el norte de Coveñas. Hacia el norte de Tolú, a pesar de que se presenta un gran porcentaje de salinidad en algunos puntos, no son indicativos de la intrusión, sino de un proceso de mezcla con agua fósil atrapada en los sedimentos de manglar o porque los pozos

presentes están captando aguas de formaciones terciarias, las cuales por medio del cono de depresión generado por la extracción de agua dulce en la zona, pudiera estar impulsando el ascenso de estas aguas fósiles hacia el acuífero de Morrosquillo. Otros puntos que presentaron ciertas cantidades de salinidad están relacionados a procesos químicos originados por la interacción con el sedimento presente en la zona de captación, e incluso si el pozo tiene gran profundidad pudiera estar captando aguas de formaciones terciarias.

Se recomienda continuar los muestreos hidrogeoquímicos en la costa, ya que de esta forma podrán monitorear los aumentos graduales de agua salada en los pozos de la zona de interés.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anónimo, (s.f). Intrusión marina. Implicaciones hidrodinámicas. Determinación de la posición de la interfase. Proceso de mezcla de aguas. Procesos modificadores asociados. Métodos de estudio. Otros mecanismos de salinización. Algunos criterios para su diferenciación. [Documento en línea]. En www.agua.uji.es/pdf [Consultada: Junio 27, 2011,].

CARSUCRE (2010). I Taller sobre el proyecto de protección Integral de aguas subterráneas – ppias – Acuífero Morrosquillo. [Documento en línea]. Corporación autónoma de Sucre (CARSUCRE). En www.carsucre.gov.co. [2010, Noviembre 26].

Manzano, M (2011). Hidroquímica de aguas subterráneas naturales. VI Curso Hispanoamericano de hidrología subterránea (VICHHS). Salto, Uruguay.

Martínez, D (2009). Evaluación y modelación hidrogeoquímica de Acuífero de Morrosquillo (Sucre- Colombia). Tesis de Maestría. Universidad de Antioquía. Colombia. 104 pp.