

## Exhibit R-071

SENARA, “Application of hydrogeochemical and isotopic tools in validating the hydrogeological model of the Huacas-Tamarindo aquifer, in the North Pacific of Costa Rica (IAEA – Project RLA-8-041)”

# **Aplicación de herramientas hidrogeoquímicas e isotópicas en la validación del modelo hidrogeológico del acuífero Huacas-Tamarindo, en el Pacífico Norte de Costa Rica (IAEA – Proyecto RLA-8-041)<sup>1</sup>**

**Agudelo-Arango C.L.**

lagudelo@senara.go.cr

Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento.

SENARA, San José, Costa Rica

**Resumen:** El estudio combinado de la hidrología, hidroquímica e isótopos ambientales (deuterio y oxígeno-18) se llevó a cabo por SENARA en el acuífero Huacas-Tamarindo, Pacífico Norte, Costa Rica, en el marco del Proyecto de Cooperación Técnica RLA / 8 / 041 de la OIEA. Esta área ha experimentado una gran demanda de agua subterránea debido al rápido crecimiento del desarrollo turístico no planificado, que ha puesto en riesgo el acuífero a la sobreexplotación. El uso de deuterio y oxígeno-18, en conjunto con los iones mayoritarios, han permitido identificar el funcionamiento general de la cuenca, incluyendo las relaciones entre las masas de agua presentes. Los resultados indican que el agua subterránea es reciente, el acuífero tiene variaciones cíclicas en respuesta a la alternancia entre períodos lluviosos y secos, y hay una conexión hidráulica entre los cursos de agua superficial y el acuífero. Esta información ha sido incorporada en el mapa de vulnerabilidad del acuífero, que está siendo utilizado como una herramienta de gestión de las tierras por las autoridades de la región.

**Abstract:** A combined study of hydrology, hydrochemistry and environmental isotopes (deuterium and oxygen-18) has been carried out by SENARA in Huacas-Tamarindo Aquifer, North Pacific, Costa Rica, under the Technical Cooperation Project RLA / 8 / 041 of the IAEA. This area has experienced a high demand for groundwater due to rapid unplanned tourism development, which has put the aquifer at risk of overexploitation. Deuterium and oxygen-18, in conjunction with the major ions, have identified the overall functioning of the basin, including the relationships between the water bodies present there. Results indicate that groundwater is recent, the aquifer has cyclical variations in response to alternating between rainy and dry periods, and there is a hydraulic connection between surface water courses and the aquifer. This information has been incorporated into the aquifer vulnerability map, which is being used as a land management tool by the authorities of the region.

## **1. Introducción**

El acuífero de Huacas Tamarindo, se ubica en la zona costera del cantón de Santa Cruz de Guanacaste, en el Pacífico Norte de Costa Rica. Esta zona se encuentra sujeta a un creciente desarrollo turístico y habitacional y enfrenta una crisis importante con respecto al desarrollo y al manejo integral y sostenible del recurso hídrico. La ocupación no planificada del territorio, ha ocasionado la impermeabilización de los suelos con aptitud para la recarga, el deterioro de las cuencas por la deforestación, la contaminación de sus suelos y aguas y una alta explotación del acuífero, que están atentando con la disponibilidad del recurso hídrico ya sea por calidad o por cantidad. Esta situación ha desencadenado en conflictos por el acceso al agua de los mantos acuíferos entre las comunidades con algunos representantes del sector turístico local.

El acuífero Huacas-Tamarindo es considerado como de alto grado de explotación y alto grado de intervención. Las valoraciones hidrogeológicas preliminares muestran un estado de estrés en el acuífero, donde la recarga potencial al acuífero es similar a las extracciones de agua por medio de pozos. Debido a esto el acuífero se encuentra con restricción a la extracción de agua por pozos desde el 2003.

La investigación se llevó a cabo en el marco del Proyecto Regional RLA/8/041 “Aplicación de herramientas isotópicas para el manejo de acuíferos costeros” del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA). Otros participantes fueron la Escuela Centroamericana de Geología (ECG) y el Centro de

---

<sup>1</sup> Cooperación técnica (ARCAL XCII) - Proyecto RLA / 8 / 041 del IAEA – Aplicación de herramientas isotópicas para el manejo integrado de acuíferos costeros.

Investigación de Contaminación Ambiental (CICA) de la Universidad de Costa Rica (UCR) y la Municipalidad de Santa Cruz.

Con la investigación se busca profundizar el nivel de conocimiento en hidrogeología del acuífero Huacas Tamarindo, por medio de la aplicación de herramientas hidrogeoquímicas (iones mayoritarios) e isotópicas (deuterio y oxígeno-18), como un mecanismo para validar del modelo hidrogeológico elaborado con herramientas hidrogeológicas convencionales (geología, geofísica, muestreos de suelos, litológicas, propiedades hidráulicas, etc), específicamente en determinar las conexiones hidráulicas entre los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, y evaluar el dinamismo del sistema hidrogeológico.

## 2. Generalidades

El área de estudio (fig. 1) corresponde la cuenca de los ríos Lajas y San Andrés, con un área de 84 km<sup>2</sup>, localizada en el Pacífico Norte de Costa Rica en el cantón de Santa Cruz, provincia de Guanacaste entre las coordenadas 10°17'35"N - 10°24'07"N y 85°44'54"W - 85°51'32" W. Ambos ríos son de carácter intermitente y descargan sus aguas al estero Matapalo, el cual a su vez se descarga al Océano Pacífico. La precipitación media anual en la cuenca<sup>2</sup> es de 2120 mm.

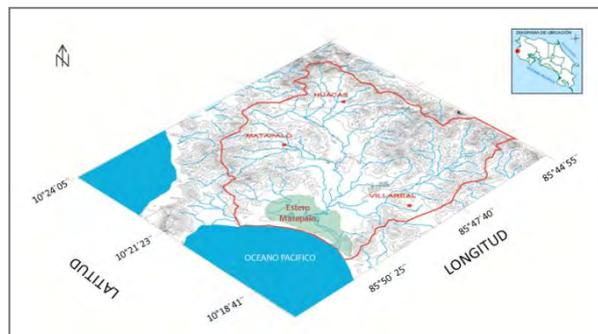


Fig 1. Localización del área de estudio.

El estero de Tamarindo obtuvo en 1993 la declaratoria de Humedal de importancia Mundial por la Convención RAMSAR, forma parte del Parque Nacional Las Baulas y del Refugio Natural de Vida Silvestre de Tamarindo, constituye un gran estuario, manglar y bosque tropical seco y es sitio de anidación de la tortuga Baula que se encuentra en peligro de extinción.

## 2. Modelo hidrogeológico

Las unidades litológicas (figura 2) presentes en la zona de estudio corresponden a sedimentos coluvio aluviales y basaltos, radiolaritas e intrusivos del Complejo de Nicoya [1]. Hidrogeológicamente las rocas del Complejo de Nicoya conforman el basamento del acuífero coluvio aluvial, los basaltos desarrollan acuíferos libres de bajo potencial dependiendo del grado de fracturación de la roca con caudales que varían entre 1 a 4 lps, mientras que, las unidades de radiolaritas e intrusivos se consideran de bajo a nulo potencial acuífero.

El acuífero aluvial de Huacas Tamarindo presenta una extensión de 48 Km<sup>2</sup>, se comporta como un acuífero no confinado, con variación local de acuífero no confinado cubierto a semiconfinado debido a la fluctuación de los niveles de agua subterránea. El máximo espesor y la máxima capacidad producción del acuífero es de 20 m y 30 lps respectivamente (figura 3).

<sup>2</sup> Estación Pluviométrica La Garita, período de registro 2002 – 2008, ubicada en la planicie alta de la cuenca del río Lajas, coordenadas 10°21'N - 85°47'.

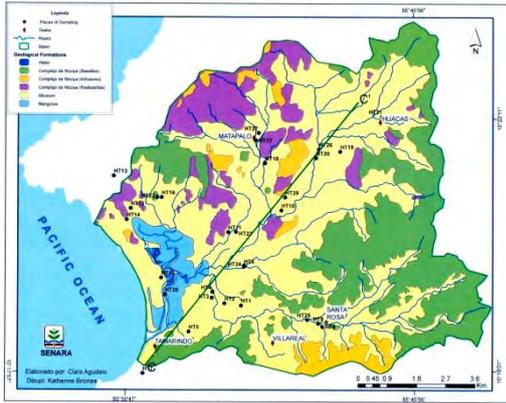


Fig 2. Mapa Geológico.

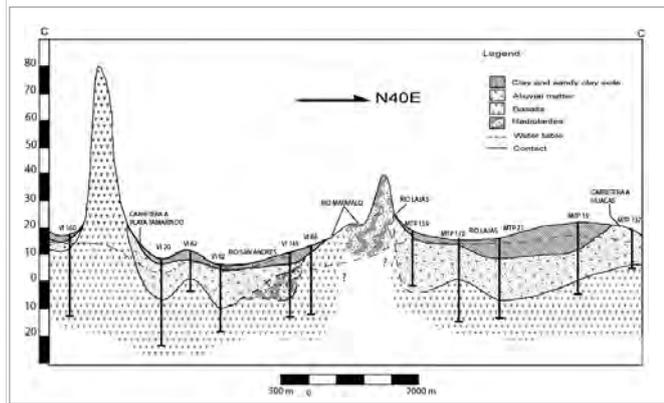


Fig 3. Perfil hidrogeológico esquemático.

Los materiales que conforman el acuífero corresponden a sedimentos de granulometría variable desde arenas gruesas a gravas arenosas, aunque localmente pueden presentarse pequeños lentes de materiales finos. La mayor parte del acuífero se encuentra cubierto por arenas y suelos areno arcillosos y localmente presenta sectores con coberturas de arcillas y limos, el espesor de la capa que recubre el acuífero varía entre 1 y 10m, registrándose los mayores espesores en los alrededores del poblado de Huacas.

En la cuenca se registran transmisividades con valores altos del orden de 1000 m<sup>2</sup>/día en en el sector baja del acuífero aluvional, medios de 200 a 450 m<sup>2</sup>/día en el sector medio y alto donde los espesores del acuífero son bajos o los pozos captan tanto materiales aluvionales como basaltos fracturados, y valores bajos menores de 100 m<sup>2</sup>/día para el acuífero desarrollado en los basaltos fracturados del Complejo de Nicoya. El coeficiente de almacenamiento del acuífero varía entre 0.2 a 0.02 correspondiente a acuíferos libres, aunque localmente se registran valores de 0.003 en sectores donde el acuífero se encuentra semiconfinado.

En el área se inventariaron 186 pozos, 156 perforados y 30 excavados. La extracción de agua en la cuenca de estudio es de 471lps, teniéndose las mayor extracción en la planicie alta del río Lajas (223 lps) y en la planicie baja del río San Andrés (114 l/s). En el sector costero de Playa Grande los pozos existentes se salinizaron y fueron abandonados. El principal uso en la zona es de abastecimiento público con 32 pozos que extraen 224 lps, seguido por el uso turístico con 14 pozos que extraen 124 lps y riego con 27 pozos que extraen 65 lps. Otros usos registrados son domestico, industrial, urbanístico y abrevadero, 29 pozos en desuso.

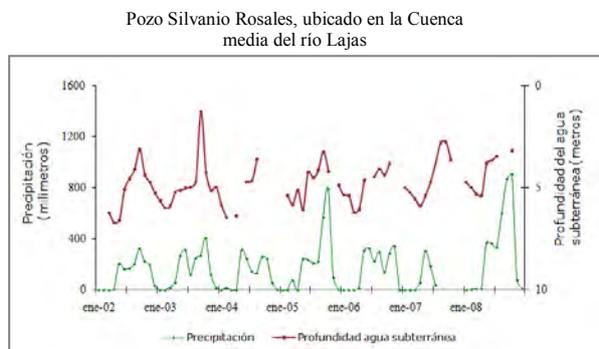


Fig. 4. Hidrográfico de precipitación vs profundidad del agua subterránea

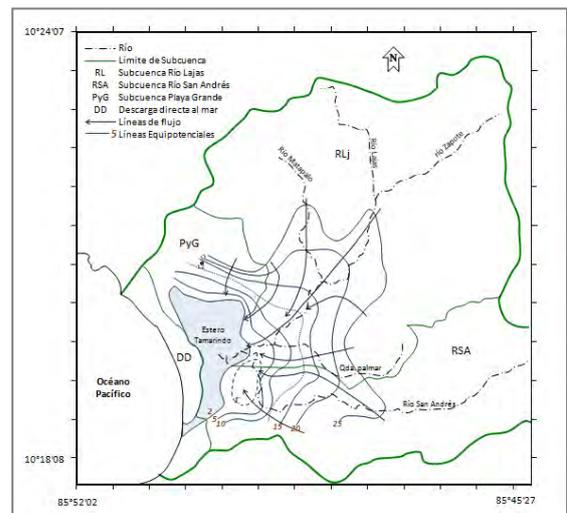
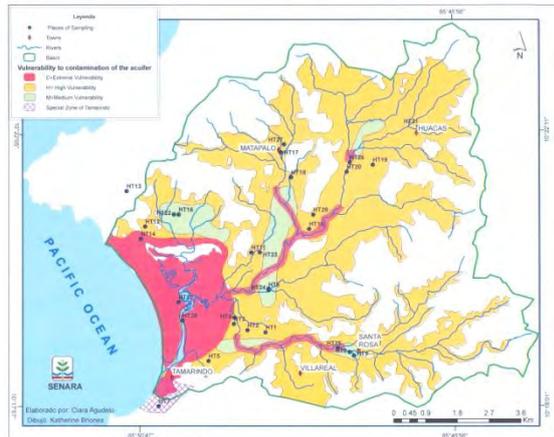


Fig 5. Curvas equipotenciales y líneas de flujo de la estación seca (abril, mayo y junio)

En la figura 4 se muestra el comportamiento típico de las aguas subterráneas en el acuífero, en el cual se observa una relación directa de las aguas subterráneas y la precipitación, lo que indica una recarga rápida del agua del acuífero. Este comportamiento se observa en toda la zona en los 25 pozos que conforman la red de monitoreo de niveles, la variación estacional media de los niveles de aguas subterráneas es de 3.5 m. La dirección predominante del flujo subterráneo es hacia el oeste descargando al estero Matapalo y al Océano Pacífico (Figura 5).

Las áreas de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero fueron identificadas usando la metodología de GOD [2] en el escenario más crítico correspondiente al final de la época seca e inicio de la época lluviosa. Se identificaron tres categorías. Extrema, Alta y Media (Figura 6).



**Extrema:** corresponde a la parte baja del acuífero en las inmediaciones del estero Tamarindo, caracterizado por acuífero libre no cubierto, sedimentos no consolidados, niveles de agua menores a 5 m,  
**Alta:** acuífero libre no cubierto a libre cubierto, sedimentos suprayacentes de arenas a suelos arenos arcillosos y niveles de agua subterránea entre 5 y 10 m, y  
**Media:** donde el acuífero es libre cubierto, con material suprayacente de arcillas y limos de poco espesor y niveles de agua subterránea menores a 5m.

Fig 6. Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero Huacas-Tamarindo.

### 3. Métodos utilizados

Para estudiar las características de flujo, determinar las conexiones hidráulicas entre los cuerpos de agua superficiales y subterráneos y evaluar el dinamismo del sistema hidrogeológico, se efectuaron cuatro campañas de muestreo de agua subterránea, agua superficial, estero y precipitación, dos de los cuales se realizaron durante la estación seca (abril - 2008 y marzo -2009) y los otros dos durante la estación lluviosa (septiembre y noviembre del 2008), en las que se levantó en 29 sitios de muestreo, 99 muestras para análisis químicos y 72 muestras para análisis isotópicos (tabla 1).

Tabla I: Tipo de análisis y números de muestras por sitio y campaña de muestreo

Muestreo	Físicoquímico					Isotópico				
	PP	PE	AS	ES	LL	PP	PE	AS	ES	LL
1	19	3	1	0	0	12	2	1	0	0
2	16	3	5	1	0	11	3	4	1	1
3	15	3	5	1	1	11	3	4	1	0
4	17	3	4	1	1	11	3	3	1	0
Total	67	12	15	3	2	45	11	12	3	1

Tipo de muestra: PP: Pozos perforados; PE: Pozos excavados; AS: Agua superficial; ES = Estero; LL = Agua lluvia

El muestreo y los análisis para los parámetros físico-químicos fueron realizados en el Centro de Investigación en Contaminación Ambiental (CICA) de la UCR. Los análisis isotópicos fueron realizados en el Laboratorio de Espectrometría de Masas de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), con el apoyo financiero del Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA, por sus siglas en inglés).

#### 4. Modelo hidrogeoquímico e isotópico

Los resultados hidrogeoquímicos de las muestras se presentan en la tabla 2. De las 99 muestras de agua analizadas se descartaron, por inconsistencia en los resultados de los iones de magnesio y sodio en relación a los contenidos típicos de la zona 4 muestras de la primera campaña y por una mala toma de las muestras en pozos clorados una muestra de las campañas segunda y tercera y dos muestras de la cuarta campaña.

Tabla 2. Resultados de los análisis hidrogeoquímicos e isotópicos del acuífero Huacas-Tamarindo.

Sitio de muestreo	Tipo de muestreo	Fecha de muestreo	Ca mgL <sup>-1</sup>	Mg mgL <sup>-1</sup>	K mgL <sup>-1</sup>	Na mgL <sup>-1</sup>	SiO <sub>2</sub> mgL <sup>-1</sup>	Cl mgL <sup>-1</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mgL <sup>-1</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mgL <sup>-1</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> mgL <sup>-1</sup>	Fe tot mgL <sup>-1</sup>	pH	Temperatura °C	Conductividad µS/cm	H2 %∞	O18 %∞	Balance Iónico (%)
HT1	Sub	2008/04/30	40.5	19.0	0.40	12.0		4.7	236.5	0.1	3.5	0.05	8.0	29.0	371	-48.5	-6.78	0.4
HT1	Sub	2008/09/24	40.6	16.6	0.40	13.1		4.6	235.1	0.1	3.7	0.05	7.2	27.5	371	-50.1	-7.34	-1.2
HT1	Sub	2008/11/18	38.2	18.9	0.40	11.9		3.6	223.7	0.1	3.0	0.05	7.3	26.0	345	-51.1	-7.19	1.9
HT1	Sub	2009/03/05	40.1	18.9	0.40	11.2		5.1	224.9	0.1	4.1	0.05	7.2	32.0	333	-52.9	-7.49	1.7
HT2	Sub	2008/04/29	28.2	14.2	0.40	10.2*	29.5	5.9	212.4	0.1	6.1	0.05	7.8	29.0	348	-47.0	-6.63	-11.0
HT2	Sub	2008/09/24	32.3	13.0	0.40	13.9		4.9	186.0	6.4	4.2	0.05	7.3	27.0	315	-46.5	-6.83	-1.2
HT2	Sub	2008/11/18	32.3	16.9	0.40	13.9		4.9	193.3	9.8	3.8	0.05	7.1	26.0	318	-46.8	-6.70	1.0
HT2	Sub	2009/03/05	49.2	18.4	0.40	11.5		4.0	241.3	1.2	2.9	0.05	7.9	25.5	356	-50.3	-7.18	3.8
HT3	Sub	2008/04/30	20.2	67.2*	2.70	4.2	34.5	8.1	314.8	1.3	8.9	0.05	8.0	29.0	502	-48.9	-6.75	9.7
HT4	Sub	2008/04/30	38.5	6.5	1.69	13.4	32.8	5.5	247.4	0.1	1.4	0.05	7.0	28.0	389	-44.0	-6.43	-15.8
HT4	Sub	2009/03/05	39.3	18.9	0.40	10.9		5.4	222.2	0.1	5.2	0.05	7.1	32.0	335	-48.7	-7.01	1.2
HT5	Sub	2008/04/29	56.4	65.5*	0.40	17.8	20.2	13.1	338.9	0.1	4.5	0.05	8.3	29.0	526	-46.4	-6.64	19.7
HT5	Sub	2008/09/23	55.0	27.2	0.40	18.8		12.8	264.4	25.6	20.8	0.05	6.9	29.0	520	-46.7	-6.88	2.4
HT5	Sub	2008/11/20	46.0	24.1	0.40	11.9		3.8	255.3	3.7	19.6	0.05	7.1	32.0	421	-48.6	-6.90	0.5
HT5	Sub	2009/03/05	45.3	22.2	0.40	14.3		4.5	261.0	2.0	14.8	0.05	7.9	27.0	431	-48.5	-6.93	-0.3
HT6	Sub	2008/04/29	49.6	37.8*	0.40	21.7	32.1	14.4	298.3	0.1	7.9	0.05	8.2	28.0	500	-45.6	-6.64	9.0
HT6	Sub	2008/09/23	41.0	19.4	0.40	18.3		8.2	250.3	0.1	8.5	0.05	7.3	25.0	410	-50.3	-7.29	-0.7
HT6	Sub	2008/11/20	40.1	21.2	0.40	17.3		6.8	249.5	0.1	6.4	0.05	7.4	27.0	401	-49.1	-6.96	1.1
HT6	Sub	2009/03/05	49.3	17.3	0.40	23.8		12.7	261.0	1.5	8.0	0.05	8.3	29.0	460	-49.3	-6.94	1.0
HT7	Sub	2008/04/30	71.1*	42.9*	0.40	19.0	40.9	36.9	361.5	14.8	27.7	0.05	8.2	29.0	683	-47.0	-6.83	1.7
HT7	Sub	2008/09/23	61.6	32.9	0.40	19.0		20.9	327.0	7.9	22.0	0.05	7.2	27.0	610	-47.7	-6.94	-0.2
HT7	Sub	2008/11/20	55.9	34.4	0.40	17.8		16.4	337.3	8.4	22.1	0.05	7.2	29.0	550	-48.2	-6.79	-1.44
HT7	Sub	2009/03/05	63.6	28.4	0.40	18.2		15.5	309.6	6.5	21.1	0.05	8.3	26.0	574	-48.4	-6.90	2.05
HT8	Sub	2008/04/30	42.9	21.2	0.40	12.3	37.7	6.0	247.4	2.6	4.2	0.05	8.0	28.0	398	-47.0	-6.46	0.82
HT8	Sub	2008/09/24	48.4	21.5	0.40	227.0*		295.0*	237.7	3.3	6.4	0.05	7.3	27.5	1450	-48.7	-7.22	6.28
HT8	Sub	2008/11/18	44.1	22.4	0.40	748.0*		1022.0*	262.4	3.0	4.9	0.05	7.3	27.0	3728			4.74
HT8	Sub	2009/03/05	36.9	18.6	0.40	107.5*		149.9*	213.8	2.3	3.9	0.05	8.0	27.5	654			1.28
HT9	Sub	2008/04/30	41.3	22.2	0.40	12.7	33.3	6.1	250.2	4.9	4.8	0.05	7.9	29.0	408			-0.07
HT9	Sub	2008/09/24	39.8	19.6	0.40	13.1		5.7	242.2	1.9	2.2	0.05	7.2	27.5	381			-0.3
HT9	Sub	2008/11/18	39.7	20.5	0.40	12.3		5.2	236.6	1.9	2.0	0.05	7.1	28.0	361	-50.8	-7.12	1.43
HT9	Sub	2009/03/05	42.1	21.2	0.40	96.9*		144.0*	238.8	7.2	23.8	0.05	8.1	27.5	424			-3.11
HT10	Sub	2008/04/30	65.5	33.5	0.40	18.7	27.7	4.3	389.7	0.1	6.0	0.05	8.2	28.5	587			1.56
HT10	Sub	2008/09/24	63.3	30.3	0.40	17.5		4.7	191.3*	0.1	7.0	0.05	8.0	27.5	537			30.61
HT10	Sub	2008/11/18	64.5	30.5	0.40	17.2		4.0	372.2	0.1	5.7	0.05	7.0	28.0	541			0.59
HT10	Sub	2009/03/05	66.3	29.9	3.35	24.7		14.1	372.1	0.1	7.9	0.05	7.3	28.0	568			1.92
HT11	Sub	2008/04/30	48.8	24.6	0.40	13.8	24.3	5.3	281.1	3.6	4.7	0.05	8.0	32.0	447	-47.0	-6.73	1.55
HT11	Sub	2008/09/23	45.3	20.5	0.40	13.7		3.9	259.7	6.6	3.8	0.05	7.2	28.0	399	-50.1	-6.93	0.0
HT11	Sub	2008/11/19	45.3	22.4	0.40	12.9		4.7	281.1	4.1	4.5	0.05	7.0	28.0	407	-49.4	-6.92	-2.4
HT11	Sub	2009/03/05	58.2	29.8	10.33	15.2		6.7	341.6	1.2	5.6	0.05	8.1	26.5	493	-46.4	-6.53	2.9
HT12	Sub	2008/04/29	41.3	24.6	0.40	14.2	23.5	11.2	248.8	8.8	2.1	0.05	7.8	29.0	427	-46.0	-6.82	1.40
HT12	Sub	2008/09/23	37.4	21.5	0.40	15.3		9.6	240.4	6.4	2.9	0.05	7.0	27.5	397	-46.3	-6.89	-0.66
HT12	Sub	2008/11/19	38.2	20.8	0.40	14.0		15.8	246.0	5.3	3.5	0.05	6.9	28.0	381	-47.3	-6.74	-4.59
HT12	Sub	2009/03/04	35.8	20.8	0.40	3.5		8.5	216.6	3.9	2.4	0.05	7.8	29.5	380	-46.4	-6.67	-3.21
HT13	Sub	2008/04/29	43.3	20.2	0.40	13.6	40.4	11.1	247.1	8.8	2.1	0.05	8.0	30.0	403	-48.6	-7.04	-1.39
HT13	Sub	2008/09/23	42.5	17.9	0.40	14.5		7.8	238.6	2.8	2.2	0.05	7.4	29.0	390	-49.2	-7.03	0.2
HT13	Sub	2008/11/19	65.9	20.0	0.40	13.9		13.0	269.4	3.0	3.5	0.05	7.3	29.0	378	-48.6	-6.80	6.2
HT13	Sub	2009/03/04	45.5	20.1	0.40	13.3		7.7	247.2	2.5	3.1	0.05	7.6	30.0	354	-48.1	-6.86	1.6
HT14	Sub	2008/04/29	32.6	24.6	1.49	121.9	27.8	93.1	336.8	2.5	35.5	0.05	7.7	29.0	818			0.3
HT14	Sub	2008/09/23	43.3	34.3	0.40	197.0		132.3	485.5	0.1	62.8	0.05	7.1	27.5	1235	-51.5	-7.54	2.1
HT14	Sub	2008/11/19	38.2	26.0	2.07	164.8		83.4	428.7	0.1	43.4	0.05	7.1	29.0	917	-54.3	-7.62	4.5
HT14	Sub	2009/03/04	32.8	23.9	0.40	100.0		83.4	347.1	3.1	30.0	0.05	7.0	29.5	719	-49.6	-7.03	-4.6
HT15	Sub	2008/04/29	59.9	10.4	1.19	11.0	29.4	5.9	245.4	2.7	5.0	0.05	8.0	29.0	399	-43.3	-6.42	0.1
HT15	Sub	2008/09/23	81.1	16.5	10.65	27.5		26.5	349.8	13.5	12.1	0.05	7.7	27.0	629	-50.0	-7.39	-0.6
HT15	Sub	2008/11/19	68.9	16.9	3.78	14.4		1.8	330.3	2.5	3.2	0.05	7.7	27.0	463	-67.0*	-9.21*	-0.19
HT15	Sub	2009/03/04	63.9	12.4	1.80	13.4		9.8	259.6	3.9	5.1	0.05	7.7	27.0	384	-57.1	-8.18	1.45
HT16	Sub	2008/04/29	33.3	19.0	0.40	12.4	37.0	4.1	211.7	0.1	1.9	0.05	7.9	30.0	332			2.0
HT16	Sub	2008/09/23	31.9	17.2	0.40	9.9		5.2	198.9	0.1	1.7	0.05	7.1	28.0	306			0.0
HT16	Sub	2008/11/19	31.1	19.0	0.40	9.3		3.7	204.4	4.1	1.6	0.05	6.8	29.0	274			-0.3
HT16	Sub	2009/03/04	34.2	17.5	0.40	10.0		3.9	194.4	1.1	2.3	0.05	7.0	30.0	326			3.3
HT17	Sub	2008/04/29	31.4	17.1	0.40	11.9	37.1	5.3	187.0	5.6	2.7	0.05	8.0	29.0	318	-46.6	-6.59	2.0
HT17	Sub	2008/09/23	35.0	18.4	0.40	12.7		6.7	215.2	8.1	3.8	0.05	7.2	28.5	340	-47.9	-7.07	-1.3
HT17	Sub	2008/11/18	32.7	17.1	0.40	11.8		2.6	227.2	2.2	2.2	0.05	7.2	30.0	281	-50.7	-7.27	-4.3
HT17	Sub	2009/03/04	29.5	16.2	0.40	10.1		0.3	177.7	0.1	0.2	0.05	7.4	27.5	357	-47.2	-6.88	5.2
HT18	Sub	2008/04/29	32.6	18.1	0.40	10.9	33.3	2.6	207.6	0.1	1.5	0.05	8.0	29.0	327			-1.2
HT18	Sub	2008/09/23	26.4	13.8	0.40	9.2		2.7	166.1	2.8	1.5	0.05	7.4	27.0	253			4.02
HT18	Sub	2008/11/18	27.9	14.8	0.40	9.1		2.4	172.2	1.6	1.3	0.05	7.1	28.5	271			1.3
HT18	Sub	2009/03/05	30.3	16.6	0.40	8.9		2.2	188.8	1.1	1.9	0.05	7.2	28.5	265			1.0
HT19	Sub	2008/04/29	40.9	20.5	0.40	10.6	33.4	4.0	235.8	6.5	2.6	0.05	7.6	29.0	384			0.7
HT20	Sub	2008/04/30	46.8	22.4	0.40	13.2	34.9	5.9	263.9	5.8	4.8	0.05	8.1	29.0	426			0.8
HT20	Sub	2008/09/24	50.7	22.9	0.40	13.3		7.1	271.4	5.8	6.6	0.05	7.6	29.0	456			13.3
HT20	Sub	2009/03/05	47.3	23.4	0.40	13.7		8.6	262.4	7.3	6.8							

Los valores de conductividad varían de 250 a 680  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , el pH varía entre 6.8 y 8.3. Las concentraciones de  $\text{CO}_3$  y Fe para todas las muestras analizadas se encontraron por debajo del límite de detección de  $1.6 \text{ mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$  y  $0.093 \text{ mg Fe}\cdot\text{L}^{-1}$ .

En el diagrama de Schoeller y en la grafica de Piper (figuras 7 y 8) [3], se observa que las aguas superficiales y subterráneas de pozos profundos y excavados presentan un mismo comportamiento, se clasifican como bicarbonatadas cálcicas que se relaciona con aguas jóvenes o de corta residencia en el acuífero, no se observa influencia del agua del estero del tipo sódica clorurada.

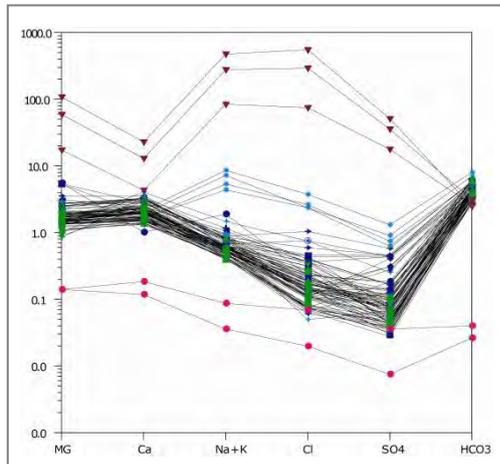


Fig 7. Diagrama Schoeller

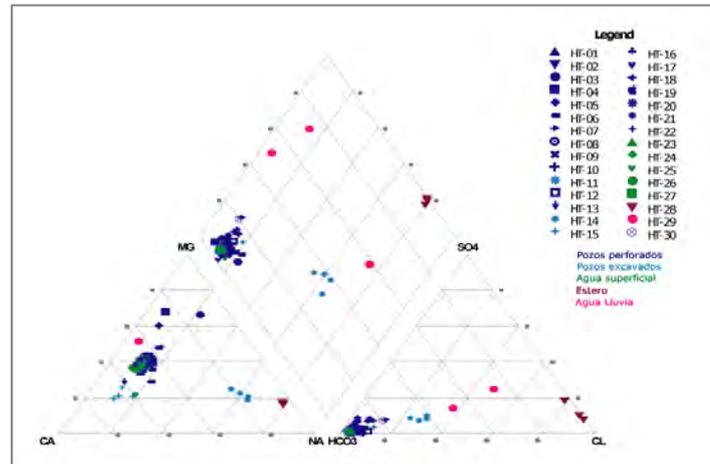


Fig 8. Gráfico Piper

En la zona no se evidencian cambios espaciales importantes en el comportamiento hidrogeoquímico de las aguas subterráneas y superficiales. Solo las cuatro muestras del pozo excavado HT15 - Casa amarilla se salen del comportamiento típico de bicarbonatadas cálcicas, presentando concentraciones más altas de Na y Cl. Estos pozos se ubican en la barra arenosa de Playa Grande en la zona donde se cerraron los pozos perforados existentes por problemas de salinidad.

Los diagramas de Stiff (figura 9a) muestran el comportamiento típico del agua subterránea y el agua superficial en la zona de estudio, en los cuales cuatro muestreos no se observa cambios estacionales importantes, sin embargo, al observar en detalle en el diagrama de Piper (figura 9b) las aguas subterráneas muestran una variación estacional, teniéndose que la muestra del mes más seco (abril) presenta menor contenido de Na, Cl y  $\text{SO}_4$  que la muestra de la estación más lluviosa (septiembre), las otras dos muestras (marzo mediados de la época seca y noviembre final de la época lluviosa) se ubican entre las dos muestras de los dos meses extremos.

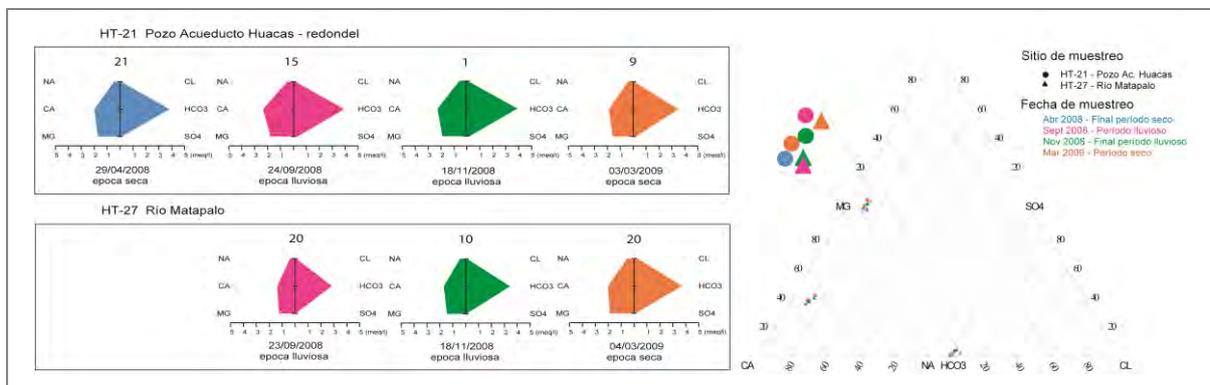


Fig. 9. Diagramas Stiff y Piper para las estaciones HT-21 y HT-27.

Los resultados isotópicos de los cuatro muestreos se presentan en la tabla 2. De las 72 muestras de agua analizadas se descartó por inconsistencia en los resultados las muestras del pozo excavado HT15

– Casa amarilla de la tercera y cuarta campaña de muestreo, cuyo comportamiento podría estar influenciado por agua lluvia.

En la grafica de la figura 10 se observa el comportamiento isotópico de las aguas subterráneas, las aguas superficiales, del estero y de la única muestra de lluvia analizada. Para efectos del análisis se presenta en el gráfico la recta meteórica mundial (RMM) definida por Craig en 1961 y la recta meteórica del Valle del río Tempisque (RMT) determinada por Gómez y Arredondo en 1990 [4] a partir de las lluvias mensuales de las estaciones ubicadas en la provincia de Guanacaste en el Pacífico Norte de Costa Rica.

Se observa que todas las muestras se encuentran desplazadas de las RMM y RMT, ubicadas entre ambas rectas, a excepción de las muestras de estero de la tercera y cuarta campaña de muestreo tomadas al final de la época lluviosa y a mediados de la época seca respectivamente y la muestra del río Lajas de la cuarta campaña de muestreo. Estas muestras se encuentran desplazadas de la RMT y por debajo de la misma, indicando un efecto de evaporación en la zona y temporalidad, donde las muestras de los meses secos se encuentran más enriquecidas isotópicamente que las muestras de la época de lluvia.

Se puede observar en la figura 11 una relación directa en el comportamiento estacional de las aguas superficiales y subterráneas con relación a los períodos de lluvia y sequia teniéndose una tendencia similar de las aguas superficiales y las aguas subterráneas tanto en la época seca (abril 2008 y marzo del 2009) como en la lluviosa (septiembre y noviembre del 2008), con un empobrecimiento en el mes más lluvioso (septiembre) y mayor enriquecimiento isotópico en el mes más seco (abril). Los resultados isotópicos de las muestras en los meses de noviembre y marzo se ubican entre los muestreos de los dos meses extremos.

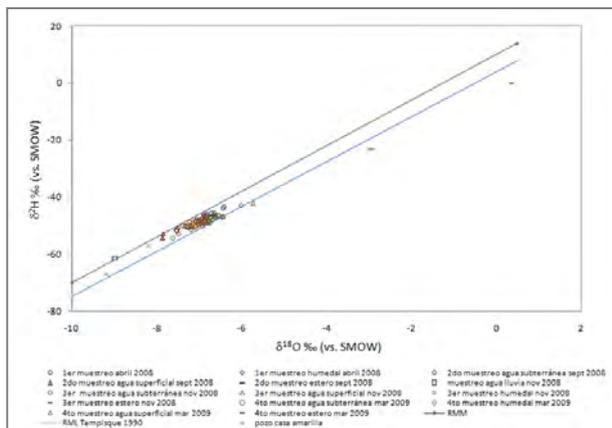


Figura 10. Comportamiento isotópico del agua en el acuífero Huacas Tamarindo.

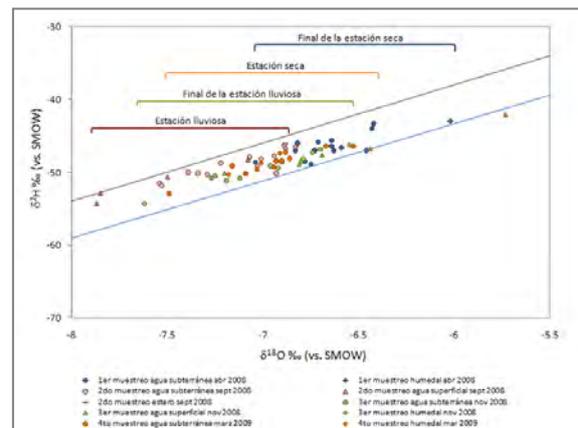


Fig 11. Comportamiento estacional isotópico de las aguas superficiales y subterráneas.

Las muestras del mes de septiembre se ubican más cerca de la RMM con relación al resto de las muestras, indicando posiblemente que estas se encuentran afectadas por un proceso de evaporación mayor. Este comportamiento temporal de las aguas subterráneas claramente marcado indica una rápida respuesta a la lluvia, con un corto tiempo de residencia de las aguas en el acuífero, lo cual concuerda con los resultados del monitoreo de niveles y reafirma la condición dinámica y vulnerable del acuífero.

En relación al comportamiento espacial de las aguas en el acuífero, se observan dos zonas bien diferenciadas (Figura 12). La primera zona corresponde a las cuencas de los ríos Lajas y San Andrés y la segunda zona corresponde a la cuenca de Playa Grande. En los gráficos de O18 versus fecha de muestreo se observa que para las cuencas de Lajas y San Andrés las aguas más enriquecidas se dan a final de la época seca en el mes de abril, mientras que para la zona de Playa Grande las aguas se encuentran más enriquecidas en el mes de marzo a mediados de la época seca que en el mes de abril.

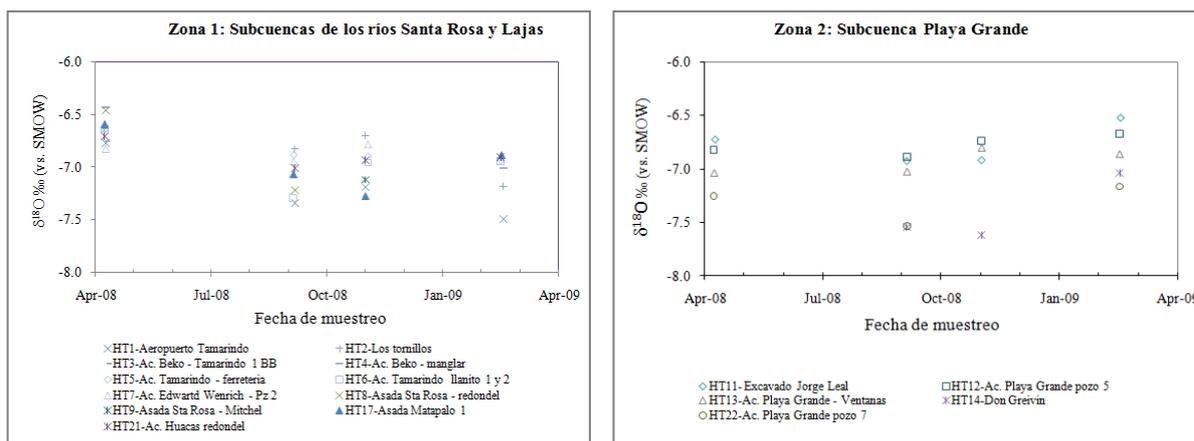


Fig 12. Gráfico de  $\delta^{18}\text{O}$  vs fecha de muestreo muestra el comportamiento temporal de las aguas subterráneas, para las cuencas Santa Rosa y Lajas y la cuenca de Playa Grande.

## 5. Discusión y Conclusiones

La química de las aguas no evidencia contaminación por intrusión salina en el acuífero. Con base en los valores de  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$ , las aguas subterráneas y superficiales se agrupan entre la recta Meteorica Mundial y la Recta meteorica del Tempisque, esto indica un mismo origen para las aguas superficiales y las subterráneas.

Los resultados isotópicos y fisicoquímicos validan el modelo conceptual del acuífero, el cual muestra una rápida respuesta estacionaria a los periodos de lluvia y sequía, una inmediata recarga, la presencia de aguas recientes en el acuífero indicando tiempos de residencia cortos de las aguas, una relación hidráulica del acuífero con los ríos, y una alta vulnerabilidad a la contaminación del sistema acuífero.

La incorporación de herramientas isotópicas en las investigaciones de acuíferos permite al SENARA incrementar la certeza científica que sustenta herramientas para el ordenamiento territorial como son los mapas de vulnerabilidad a la contaminación y la zonificación de zonas de recarga, con el fin de regular el manejo y aprovechamiento de los acuíferos.

## 6. Referencias

- [1] SENARA, Geología, suelos y geofísica de las cuencas Matapalo, San Andrés y el estero Ventanas, Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica (2009).
- [2] FOSTER, S.: Fundamental concepts in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy. Proceedings and Information of International Conference: Vulnerability of Soil and Ground Water to Pollutants, 38 69-86 (1987).
- [3] CUSTODIO, E. & LLAMAS, M.R., Hidrología subterránea. Editorial Omega, Barcelona, España, (2001).
- [4] GOMEZ CRUZ, A & ARREDONDO, S. Hidrología isotópica del Valle del Río Tempisque, Provincia de Guanacaste, Costa Rica. OIEA, Estudios de hidrología isotópica en América Latina 1994. 119-138 (1994).