

14 de marzo de 2020
UNA-EQ-UNASIL-OFIC-024-2020

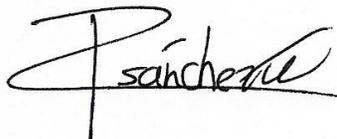
Sr. Gerardo Quirós
Coordinador
Proyecto Fortalecimiento de ASADAS
Edificio de las Naciones Unidas
Oficentro La Virgen #2
Pavas, San José
Apartado postal: 4540-1000
Teléfono: 2103-3000

Estimado señor Quirós:

Reciba un cordial saludo. En atención a lo establecido en el contrato CONT-2020-002 ATLAS 258, adjuntamos el tercer y último entregable para el servicio SDP/2019-024/ISOTOPOSESTABLES. Todos los resultados pueden ser accedados en Google Drive mediante el siguiente enlace:

https://drive.google.com/open?id=1WyNIF7q_2rPZET4KZzHSyIX01HCcpMzV.

Agradeciendo su confianza para la realización de este trabajo y sin otro particular se despide atentamente,



Dr. Ricardo Sánchez-Murillo
Coordinador
Grupo de Investigación en Isótopos Estables &
Laboratorio de Manejo de Recurso Hídrico
Maestría en Gestión y Estudios Ambientales
Escuela de Química
Universidad Nacional, Costa Rica
<https://isotopes-tropics.com/>

1. Productos entregables

A. Fechas de muestreo (Entregable 1): El Plan de trabajo con las rutas determinadas de muestreo fue entregado el 27 de enero, 2020.

Cuadro 1: Descripción de ASADAS, ubicación y fechas de muestreo.

ASADA	Cantón	Fuentes		Fecha de muestreo
		Pozos	Nacientes	
Huacas y Pita Rayada	Hojancha	3	3	7/2/2020
Santa Marta	Hojancha	2	2	7/2/2020
Estrada Rávago	Hojancha	2	-	7/2/2020
Puerto Carrillo	Hojancha	1	-	7/2/2020
Maravilla	Hojancha	1	2	7/2/2020
Monte Romo	Hojancha	4	-	7/2/2020
Pilangosta	Hojancha	1	3	7/2/2020
San Isidro	Hojancha	-	4	7/2/2020
Altos del Socorro	Hojancha	-	1	7/2/2020
Playa Sámara	Nicoya	2	-	6/2/2020
Cangrejal de Sámara	Nicoya	2	-	6/2/2020
San Fernando de Sámara	Nicoya	4	-	6/2/2020
Santo Domingo de Sámara	Nicoya	1	1	6/2/2020
Torito de Sámara	Nicoya	2	-	6/2/2020
Las Brisas y Esterones de Sámara	Nicoya	1	-	6/2/2020
La Esperanza Sur de Nosara	Nicoya	1	-	6/2/2020
Santa Marta de Nosara	Nicoya	1	-	6/2/2020
Belén de Nosarita	Nicoya	1	-	6/2/2020
Dulce Nombre de Nicoya	Nicoya	2	-	6/2/2020
La Virginia de Gamalotal	Nicoya	2	-	6/2/2020
Varillal	Nicoya	1	-	6/2/2020
Curime	Nicoya	1	-	6/2/2020
Tortuguero de Quebrada Honda	Nicoya	1	-	5/2/2020
Copal	Nicoya	1	1	5/2/2020
Quebrada Honda y Tres Esquinas	Nicoya	3	-	5/2/2020
Corralillo de San Antonio	Nicoya	7	1	5/2/2020
Moracia de San Antonio	Nicoya	3	-	5/2/2020
Puerto Humo	Nicoya	1	-	5/2/2020
Rosario de San Antonio	Nicoya	1	-	5/2/2020
Juan Díaz	Nicoya	1	-	5/2/2020
San Vicente	Nicoya	3	-	5/2/2020
Matambuguito	Nicoya	1	-	5/2/2020
Guaitil	Santa Cruz	1	-	5/2/2020
Arado	Santa Cruz	2	-	5/2/2020
Palestina de Belén	Carrillo	1	-	5/2/2020
Artola de Sardinal	Carrillo	1	-	5/2/2020
San Blas	Carrillo	2	-	5/2/2020
Nuevo Colón	Carrillo	1	-	5/2/2020
Santa Rita	Carrillo	1	-	5/2/2020
Paso Tempisque	Carrillo	1	-	5/2/2020
Total		67	18	

B. Análisis isotópico (Entregable 2):

Los resultados de los análisis isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ y exceso de deuterio) se presentan en el Cuadro 2 (producto entregado el 11 de febrero, 2020).

Cuadro 2: Base de datos isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ y exceso de deuterio).

Sitio	Tipo	Elev. (msnm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	Des. Est.	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Des. Est.	d-excess (‰)	±	Asada	Cantón
Nuevo Colon	Pozo	73	-6.90	0.06	-48.91	0.29	6.28	0.15	Nuevo Colón	Carrillo
Artola	Pozo	79	-6.90	0.06	-48.57	0.23	6.66	0.11	Artola	Carrillo
Santa Rita	Pozo	44	-6.97	0.04	-49.42	0.44	6.33	0.24	Santa Rita	Carrillo
San Blas 1	Pozo	55	-7.10	0.08	-48.69	0.21	8.10	0.12	San Blas	Carrillo
San Blas 2	Pozo	53	-7.04	0.06	-48.44	0.28	7.91	0.14	San Blas	Carrillo
Arado 1	Pozo	102	-7.37	0.05	-49.57	0.28	9.41	0.13	Arado	Carrillo
Arado 2	Pozo	70	-7.43	0.08	-49.69	0.31	9.76	0.18	Arado	Carrillo
Paso Tempisque 1	Pozo	32	-7.53	0.04	-50.40	0.37	9.82	0.18	Paso Tempisque	Carrillo
Paso Tempisque 2	Pozo	29	-7.62	0.06	-50.35	0.37	10.62	0.20	Paso Tempisque	Carrillo
Río Las Palmas	Agua Sup.	32	-6.71	0.04	-44.76	0.13	8.96	0.05	Paso Tempisque	Carrillo
Palestina de Belén	Pozo	37	-7.50	0.08	-49.34	0.30	10.64	0.17	Palestina de Belén	Carrillo
Guatíl 1 Margarita	Pozo	37	-7.72	0.03	-49.66	0.27	12.13	0.10	Guatíl	Santa Cruz
Guatíl 2 Ojochal	Pozo	26	-7.50	0.07	-49.90	0.60	10.06	0.43	Guatíl	Santa Cruz
Juan Díaz	Pozo	648	-7.93	0.03	-50.28	0.21	13.16	0.07	Juan Díaz	Nicoya
San Vicente 1	Pozo	37	-7.46	0.10	-49.61	0.44	10.08	0.29	San Vicente	Nicoya
San Vicente 2	Pozo	35	-7.32	0.11	-47.39	0.31	11.19	0.21	San Vicente	Nicoya
Moracia 1	Pozo	29	-7.36	0.06	-49.71	0.24	9.14	0.11	Moracia	Nicoya
Moracia 2	Pozo	29	-7.25	0.08	-50.42	0.18	7.55	0.11	Moracia	Nicoya
Naciente Boquete	Naciente	94	-7.54	0.06	-52.15	0.31	8.18	0.16	Corralillo	Nicoya
San Andres	Pozo	35	-6.85	0.06	-48.92	0.16	5.89	0.09	Corralillo	Nicoya
Los Angeles	Pozo	41	-7.26	0.06	-51.61	0.27	6.50	0.14	Corralillo	Nicoya
El Garzal	Pozo	37	-7.28	0.12	-51.57	0.31	6.65	0.22	Corralillo	Nicoya
Guanacaste	Pozo	41	-7.37	0.05	-52.73	0.08	6.23	0.06	Corralillo	Nicoya
Sag. Familia	Pozo	63	-7.21	0.07	-51.62	0.39	6.04	0.22	Corralillo	Nicoya
Boquete	Pozo	39	-6.95	0.12	-51.26	0.50	4.33	0.36	Corralillo	Nicoya
Nac. Santo Domingo	Naciente	209	-6.65	0.07	-46.43	0.32	6.79	0.18	Sto. Domingo de Samara	Nicoya
Pozo Santo Domingo	Pozo	191	-7.01	0.02	-49.62	0.25	6.43	0.09	Sto. Domingo de Samara	Nicoya
Bosque del Lago	Pozo	37	-6.38	0.05	-46.84	0.23	4.20	0.10	Puerto Carrillo	Hojancha
Playa El Roble	Pozo	17	-6.31	0.07	-45.89	0.39	4.60	0.22	Puerto Carrillo	Hojancha
Pozo Pto. Carrillo	Pozo	14	-6.48	0.02	-47.75	0.42	4.11	0.20	Puerto Carrillo	Hojancha

Río Lajas	Agua Sup.	37	-5.67	0.06	-44.27	0.35	1.10	0.19	Santa Marta	Hojancha
Estrada	Pozo	37	-6.79	0.06	-45.61	0.52	8.73	0.33	Estrada Rávago	Hojancha
Santa Marta Pozo Ceiba	Pozo	37	-7.05	0.06	-47.49	0.36	8.91	0.19	Santa Marta	Hojancha
Santa Marta Naciente	Naciente	155	-7.32	0.10	-48.75	0.45	9.79	0.30	Santa Marta	Hojancha
Santa Marta Naciente 2	Naciente	155	-7.24	0.08	-48.10	0.40	9.82	0.23	Santa Marta	Hojancha
Rosario	Pozo	13	-7.18	0.03	-49.58	0.18	7.85	0.06	Rosario de San Antonio	Nicoya
Río Tempisque	Agua Superficial	3	-4.16	0.10	-27.31	0.37	5.94	0.23	Rosario de San Antonio	Nicoya
Puerto Humo	Pozo	13	-6.95	0.09	-49.81	0.44	5.80	0.29	Puerto Humo	Nicoya
Matambuguito	Pozo	227	-6.69	0.15	-48.43	0.24	5.11	0.21	Matambuguito	Nicoya
Copal Q. Honda	Pozo	11	-7.25	0.05	-50.73	0.50	7.27	0.29	Copal	Nicoya
Tortuguero Q. Honda	Pozo	45	-7.18	0.05	-51.65	0.26	5.79	0.12	Tortuguero Q. Honda	Nicoya
Q. Honda 1	Pozo	35	-6.75	0.10	-51.44	0.39	2.56	0.25	Quebrada Honda y Tres Esquinas	Nicoya
Q. Honda 2	Pozo	39	-7.04	0.03	-51.77	0.50	4.55	0.28	Quebrada Honda y Tres Esquinas	Nicoya
Q. Honda 4	Pozo	47	-7.12	0.05	-52.27	0.30	4.67	0.14	Quebrada Honda y Tres Esquinas	Nicoya
Curime	Pozo	141	-6.67	0.08	-49.23	0.45	4.14	0.28	Curime	Nicoya
Dulce Nombre 1	Pozo	164	-6.51	0.15	-48.76	0.30	3.36	0.24	Dulce Nombre	Nicoya
Dulce Nombre 2	Pozo	164	-6.51	0.04	-48.49	0.49	3.62	0.28	Dulce Nombre	Nicoya
Varillal	Pozo	172	-6.82	0.04	-48.34	0.19	6.19	0.08	Varillal	Nicoya
Virginia de Gamalotal	Pozo	128	-7.01	0.08	-49.36	0.11	6.70	0.10	Virginia de Gamalotal	Nicoya
Belén de Nosarita	Pozo	153	-6.68	0.08	-46.38	0.20	7.02	0.12	Belén de Nosarita	Nicoya
Nac. Las Minas	Naciente	159	-7.17	0.06	-48.65	0.52	8.73	0.32	Belén de Nosarita	Nicoya
Nac. Baltodano	Naciente	159	-7.09	0.05	-45.86	0.39	10.86	0.21	Belén de Nosarita	Nicoya
Torito	Pozo	19	-6.85	0.10	-45.61	0.36	9.23	0.24	Torito de Samara	Nicoya
Cangrejal 1	Pozo	12	-7.01	0.07	-45.18	0.18	10.91	0.10	Cangrejal de Samara	Nicoya
Cangrejal 2	Pozo	12	-7.12	0.07	-46.81	0.29	10.17	0.15	Cangrejal de Samara	Nicoya
Cangrejal 3	Pozo	13	-7.13	0.11	-46.07	0.41	10.95	0.28	Cangrejal de Samara	Nicoya
Samara 1	Pozo	11	-7.16	0.06	-45.25	0.40	11.99	0.22	Playa Samara	Nicoya
Samara 2	Pozo	11	-7.19	0.06	-45.37	0.31	12.19	0.16	Playa Samara	Nicoya
Sn. Fernando Tarantas	Pozo	16	-7.77	0.08	-49.73	0.24	12.41	0.14	San Fernando de Samara	Nicoya
Sn. Fernando Buena Vista	Pozo	38	-7.38	0.07	-47.07	0.48	12.00	0.29	San Fernando de Samara	Nicoya
Sn. Fernando 1	Pozo	22	-7.00	0.05	-43.94	0.44	12.02	0.25	San Fernando de Samara	Nicoya
Río Buena Vista Sn. Fernando	Agua Superficial	38	-7.05	0.04	-43.44	0.27	13.00	0.11	San Fernando de Samara	Nicoya
Río Ora	Agua Superficial	4	-6.41	0.05	-42.85	0.21	8.46	0.09	Puerto Carrillo	Hojancha
Esterones	Pozo	16	-6.95	0.04	-44.24	0.14	11.34	0.06	Las Brisas y Esterones de Samara	Nicoya

Jade Azul Sta. Marta	Pozo	21	-6.78	0.05	-43.24	0.23	11.00	0.10	Santa Marta de Nosara	Nicoya
Plaza Sta Marta	Pozo	11	-6.86	0.03	-43.94	0.21	10.97	0.08	Santa Marta de Nosara	Nicoya
Esperanza Sur	Pozo	14	-6.82	0.03	-42.16	0.15	12.41	0.06	Esperanza Sur de Nosara	Nicoya
Maravilla	Pozo	625	-7.73	0.04	-49.05	0.20	12.80	0.08	Maravilla	Hojancha
San Isidro 3 nacientes	Naciente	586	-8.12	0.06	-51.75	0.29	13.20	0.14	San Isidro	Hojancha
Nac. San Isidro	Naciente	660	-7.65	0.03	-48.39	0.21	12.83	0.07	San Isidro	Hojancha
Nac. Abajo Sn Isidro	Naciente	575	-7.96	0.04	-50.54	0.35	13.14	0.16	San Isidro	Hojancha
Altos del Socorro	Naciente	706	-7.95	0.03	-51.05	0.14	12.59	0.05	Altos del Socorro	Hojancha
Nac. Montealto	Naciente	740	-8.08	0.08	-51.33	0.38	13.32	0.22	Monte Romo	Hojancha
Nac. Eliecer Araya	Naciente	667	-8.03	0.03	-51.80	0.09	12.46	0.04	Monte Romo	Hojancha
Nac. Los Cruz	Naciente	715	-8.04	0.04	-51.93	0.12	12.42	0.05	Monte Romo	Hojancha
Pilangosta Los Pacheco	Naciente	489	-8.02	0.05	-51.74	0.22	12.43	0.10	Pilangosta	Hojancha
Pilangosta Vicente Muñoz	Pozo	356	-7.98	0.02	-51.55	0.19	12.32	0.06	Pilangosta	Hojancha
Huacas Tanque Nacientes	Naciente	603	-7.89	0.05	-50.54	0.23	12.60	0.11	Huacas y Pita Rayada	Hojancha
Huacas Pozo Grande	Pozo	528	-7.45	0.06	-48.63	0.11	10.97	0.07	Huacas y Pita Rayada	Hojancha
Huacas Pozo Nuevo	Pozo	527	-7.93	0.04	-52.91	0.33	10.53	0.15	Huacas y Pita Rayada	Hojancha
Huacas Pozo Pequeño	Pozo	544	-7.76	0.03	-50.58	0.15	11.53	0.05	Huacas y Pita Rayada	Hojancha

C. Informe Final (Entregable 3):

Los productos SIG en formato jpg, shape file y kmz fueron entregados junto al catálogo de los datos el 31 de marzo, 2020 mediante enlace de Google Drive.

Cuadro 3: Catálogo de tipo de archivos (SIG) generados.

Sitio muestreado	Tipo de muestra	Tipo de archivo Generado		
		Shapefile .shp	.KML	.KMZ
Nuevo Colon	Pozo	X	X	X
Artola	Pozo	X	X	X
Santa Rita	Pozo	X	X	X
San Blas 1	Pozo	X	X	X
San Blas 2	Pozo	X	X	X
Arado 1	Pozo	X	X	X
Arado 2	Pozo	X	X	X
Paso Tempisque 1	Pozo	X	X	X
Paso Tempisque 2	Pozo	X	X	X
Río Las Palmas	Agua Sup.	X	X	X
Palestina de Belén	Pozo	X	X	X
Guatil 1 Margarita	Pozo	X	X	X

Guatil 2 Ojochal	Pozo	X	X	X
Juan Díaz	Pozo	X	X	X
San Vicente 1	Pozo	X	X	X
San Vicente 2	Pozo	X	X	X
Moracia 1	Pozo	X	X	X
Moracia 2	Pozo	X	X	X
Naciente Boquete Corralillo	Naciente	X	X	X
San Andres Corralillo	Pozo	X	X	X
Los Angeles Corralillo	Pozo	X	X	X
El Garzal Corralillo	Pozo	X	X	X
Guanacaste Corralillo	Pozo	X	X	X
Sag. Familia Corralillo	Pozo	X	X	X
Boquete Corralillo	Pozo	X	X	X
Nac. Santo Domingo	Naciente	X	X	X
Pozo Santo Domingo	Pozo	X	X	X
Bosque del Lago Pto. Carrillo	Pozo	X	X	X
Playa El Roble Pto. Carrillo	Pozo	X	X	X
Pozo Pto. Carrillo	Pozo	X	X	X
Río Lajas	Agua Sup.	X	X	X
Estrada	Pozo	X	X	X
Santa Marta Pozo Ceiba	Pozo	X	X	X
Santa Marta Naciente	Naciente	X	X	X
Santa Marta Naciente 2	Naciente	X	X	X
Rosario	Pozo	X	X	X
Río Tempisque	Agua Sup.	X	X	X
Puerto Humo	Pozo	X	X	X
Matambuguito	Pozo	X	X	X
Copal Q. Honda	Pozo	X	X	X
Tortuguero Q. Honda	Pozo	X	X	X
Q. Honda 1	Pozo	X	X	X
Q. Honda 2	Pozo	X	X	X
Q. Honda 4	Pozo	X	X	X
Curime	Pozo	X	X	X
Dulce Nombre 1	Pozo	X	X	X
Dulce Nombre 2	Pozo	X	X	X
Varillal	Pozo	X	X	X
Virginia de Gamalotal	Pozo	X	X	X
Belén de Nosarita	Pozo	X	X	X
Nac. Las Minas	Naciente	X	X	X
Nac. Baltodano	Naciente	X	X	X
Torito	Pozo	X	X	X
Cangrejal 1	Pozo	X	X	X
Cangrejal 2	Pozo	X	X	X

Cangrejal 3	Pozo	X	X	X
Samara 1	Pozo	X	X	X
Samara 2	Pozo	X	X	X
Sn. Fernando Tarantas	Pozo	X	X	X
Sn. Fernando Buena Vista	Pozo	X	X	X
Sn. Fernando 1	Pozo	X	X	X
Río Buena Vista Sn. Fernando	Agua Sup.	X	X	X
Río Ora	Agua Sup.	X	X	X
Esterones	Pozo	X	X	X
Jade Azul Sta. Marta	Pozo	X	X	X
Plaza Sta Marta	Pozo	X	X	X
Esperanza Sur	Pozo	X	X	X
Maravilla	Pozo	X	X	X
San Isidro 3 nacientes	Naciente	X	X	X
Nac. San Isidro	Naciente	X	X	X
Nac. Abajo Sn Isidro	Naciente	X	X	X
Altos del Socorro	Naciente	X	X	X
Nac. Montealto	Naciente	X	X	X
Nac. Eliecer Araya	Naciente	X	X	X
Nac. Los Cruz	Naciente	X	X	X
Pilangosta Los Pacheco	Naciente	X	X	X
Pilangosta Vicente Muñoz	Pozo	X	X	X
Huacas Tanque Nacientes	Naciente	X	X	X
Huacas Pozo Grande	Pozo	X	X	X
Huacas Pozo Nuevo	Pozo	X	X	X
Huacas Pozo Pequeño	Pozo	X	X	X

Cuadro 4: Información adicional generada para el informe final.

Archivo generado	Descripción	Tipo de archivo Generado			
		.shp	.KML	.KMZ	Ráster.tiff
Cuencas Hidrográficas	Archivo de tipo vectorial (polígono) el cual contiene la información de las cuencas hidrográficas donde se encuentran ubicados los puntos de muestreo (pozos, nacientes y agua superficial).	X	X	X	
Altitudes de recarga acuífera	Archivo de tipo vectorial (líneas) el cual contiene curvas de nivel (msnm) que corresponden a altitudes de recarga acuífera (mínima y máxima) para cada cuenca hidrográfica.	X	X	X	
DEM estudio	Archivo de tipo ráster (.tiff), corresponde a un modelo digital de elevación para todo el área de estudio.				X

C.1. Área de estudio y sitios de muestreo

El muestreo (5-7 de febrero, 2020; cercano a 1,000 km de recorrido) contempló un total de 81 muestras: 5 ríos o quebradas, 15 nacientes y 61 pozos perforados (Figuras 1). La Figura 1 muestra la distribución espacial por tipo de muestra y cuenca hidrográfica, en proyección CRTM05. La altura de muestreo varió entre los 3 (zona costera) y 740 msnm (zona montañosa de Nicoya y Hojancha), con un promedio de 159 ± 221 msnm (Figuras 2).

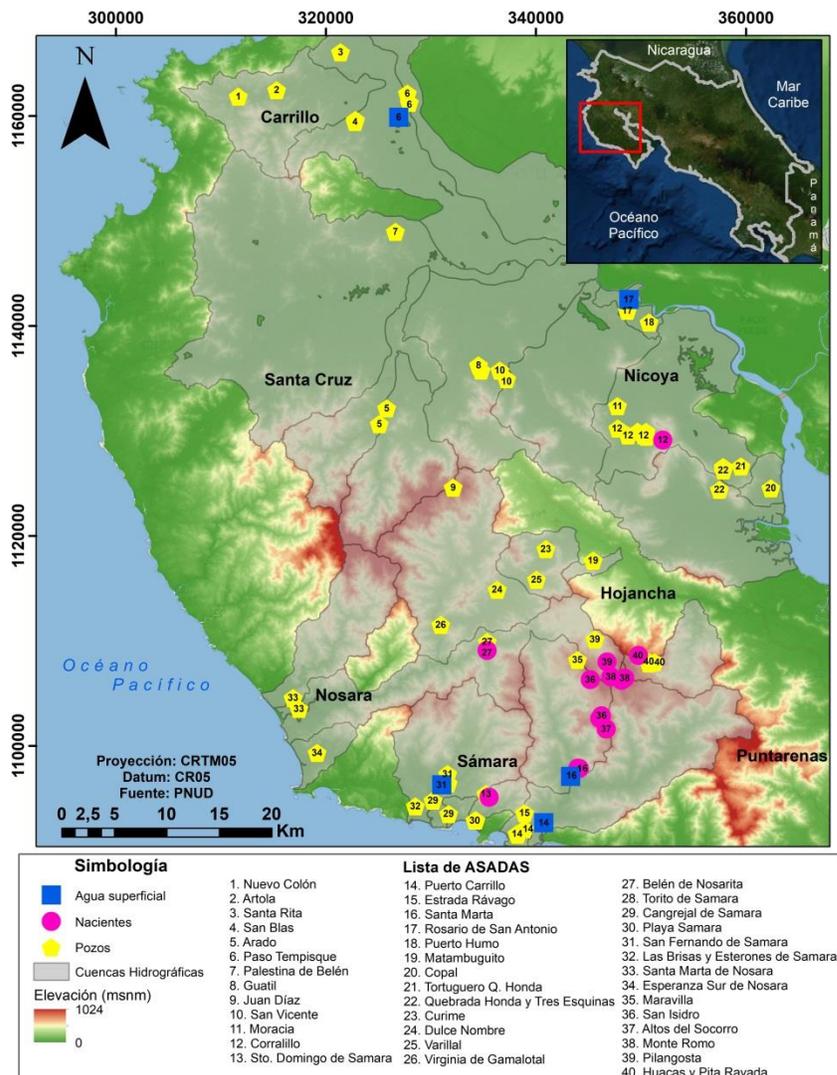


Figura 1: Ubicación de sitios de muestreos, clasificados por tipo de fuente y con la numeración respectiva de la ASADA. Los polígonos en gris representan los límites de las cuencas hidrográficas. La elevación en el área de estudio corresponde a un gradiente entre los 0 y 1,024 msnm.

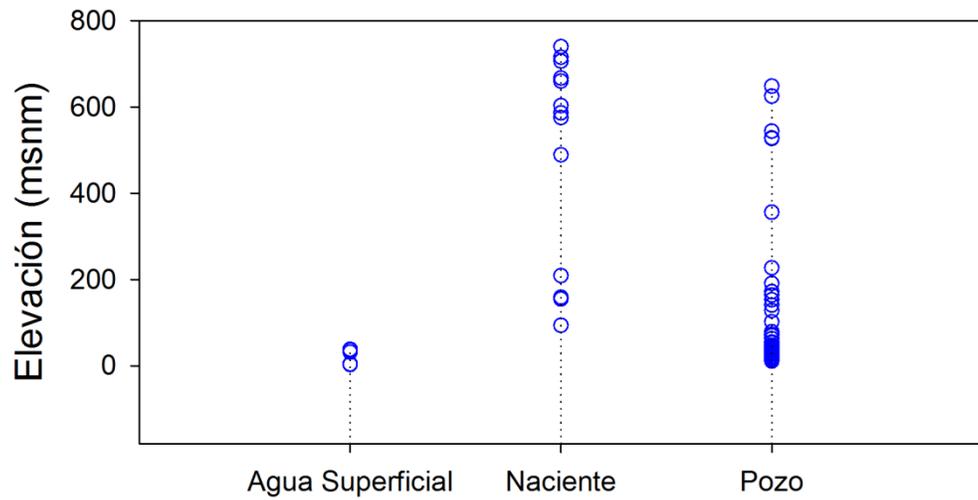


Figura 2: Distribución de elevaciones de muestreo por tipo de fuente.



Figura 3: Representación de muestreos: A) Pozo perforado (San Blas, Carrillo); b) Río Tempisque (Rosario, Nicoya); C) Naciente captada (Altos del Socorro, Hojancha); D) Naciente natural (Monte Romo, Hojancha). Fotografías: Rolando Sánchez-Gutiérrez.

C.2. Técnicas de muestreo

Las muestras fueron colectadas en botellas de **50 mL** (HDPE) sin espacio aéreo para evitar la interacción con humedad atmosférica (Figura 3) y almacenadas a 5°C hasta el análisis. En los pozos perforados y activos (i.e., bombeo > 2 horas; previa encuesta con el operador), la muestra fue tomada de inmediato. Mientras que en los pozos perforados apagados o inactivos, la muestra fue colectada luego de purgar 3 veces el volumen del pozo o al alcanzar temperatura constante. Lo anterior es importante para evitar agua fraccionada o enriquecida (i.e., aumento preferencial de uno isótopo de mayor masa), por presencia de agua 'estancada' en las tuberías. Las muestras de las nacientes fueron colectadas en la fuente o antes de ingresar a tanques de almacenamiento. En el caso de las aguas superficiales (N=5), su muestreo se realizó en zonas del río o la quebrada sin presencia de remolinos o agua 'estancada'. Su muestreo se realizó debido a la proximidad con pozo perforado y como medio de verificación de la relación acuífero-sistema superficial.

C.3. Análisis isotópico y gradiente isotópico de elevación

El análisis de los isótopos estables fue realizado en las instalaciones del Grupo de Investigación en Isótopos Estables de la Universidad Nacional (Heredia, Costa Rica), usando un analizador de isótopos en agua LWIA-45P (Los Gatos Research Inc., USA) por medio de espectroscopia de láser. Los estándares secundarios usados fueron: MTW ($\delta^2\text{H} = -131.2\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -16.6\text{‰}$), USGS45 ($\delta^2\text{H} = -10.30\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -2.24\text{‰}$) y CAS ($\delta^2\text{H} = -64.3\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -8.3\text{‰}$). Los estándares de MTW y DOW fueron usados para normalizar los resultados a la escala VSMOW2-SLAP2, mientras que el CAS fue usado como control de calidad en los análisis. La incertidumbre analítica fue: ± 0.5 (‰) (1σ) para $\delta^2\text{H}$, ± 0.1 (‰) (1σ) para $\delta^{18}\text{O}$. Las composiciones de los isótopos estables son presentadas en notación delta δ (‰, por mil), relacionando las proporciones (R) de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ y $^2\text{H}/^1\text{H}$ con la escala Viena Standard Mean Ocean Water (V-SMOW). El exceso de deuterio (*d-excess*) fue calculado para cada muestra de acuerdo con la Ecuación 1.

$$d - excess = \delta^2\text{H} - 8 \cdot \delta^{18}\text{O} \text{ (Ecuación 1)}$$

El método de determinación de alturas potenciales de recarga, está fundamentado en las siguientes condiciones:

- La composición de la muestra de agua subterránea (pozo o naciente) representa el promedio anual de la composición en la lluvia.
- El muestreo durante la recesión de caudal base no está afectado por lluvia reciente en la cuenca y por ende representa condiciones promedio anuales.
- Existen gradientes isotópicos de elevación en la región en estudio.
- La pendiente del gradiente isotópico de elevación representa la variación de $\delta^{18}\text{O}$ por km de elevación orográfica, lo que permite determinar la elevación de recarga a partir del valor isotópico de cada muestra.
- No es aplicable a cuerpos de agua que han tenido alteración significativa bajo condiciones abiertas de evaporación (i.e., ríos o quebradas).

C.4. Diagrama dual $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ y variaciones en d -excess

La Figura 4 presenta la relación $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ para las muestras de agua superficial, pozos y nacientes respecto a la línea meteórica local más representativa (Liberia, muestras diarias de lluvia entre 2014-2019; N=327) y la composición promedio del río Tempisque en Guardia, Liberia (muestras semanales entre 2018-2020; N=89). En general, todo el conjunto de muestras denota un claro origen meteórico reciente. La muestra del río Tempisque colectada en Rosario de Nicoya, muestra un claro enriquecimiento producto del fraccionamiento isotópico a lo largo del recorrido sinuoso de este cuerpo de agua, proceso que favorece la pérdida de isótopos más ligeros por evaporación. Interacción entre el acuífero y el cuerpo de agua superficial es significativa en las siguientes ASADAS: a) Puerto Carrillo (Río Ora) y b) San Fernando de Samara (Río Buena Vista) y c) Paso Tempisque (Río Tempisque).

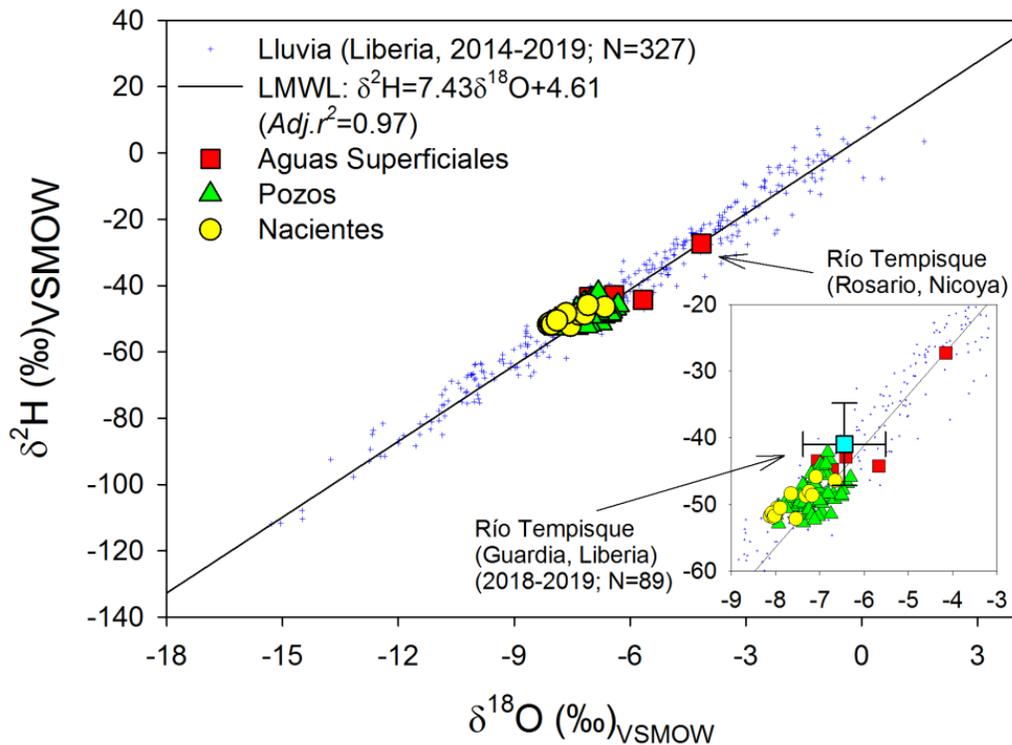


Figura 4: Diagrama dual $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ mostrando la composición isotópica de agua superficial, pozos y nacientes respecto a la línea meteórica local más representativa (Liberia, muestras diarias de lluvia entre 2014-2019; N=327) y la composición promedio del río Tempisque en Guardia, Liberia (muestras semanales entre 2018-2020; N=89).

El exceso de deuterio (*d*-excess, en inglés) es un parámetro que permite analizar la desviación isotópica de una fuente o muestra en particular de su origen meteórico. En el presente estudio se identificaron tres distintos grupos: a) muestras de pozos y nacientes por encima de los 350 msnm cuyo exceso de deuterio se encuentra entre 10.60‰ y 14.32‰, b) un segundo grupo a bajas elevaciones pero igualmente con altos valores de exceso de deuterio y c) un grupo de fuentes a baja elevación que muestran un claro efecto de evaporación secundaria. En general, valores altos de exceso de deuterio indican procesos de reciclaje de humedad y recarga en zonas de mayor altitud, mientras que valores menores a 10‰ son un indicador de fuertes procesos de evaporación en la lluvia o en la infiltración durante el proceso de recarga (Figura 7).

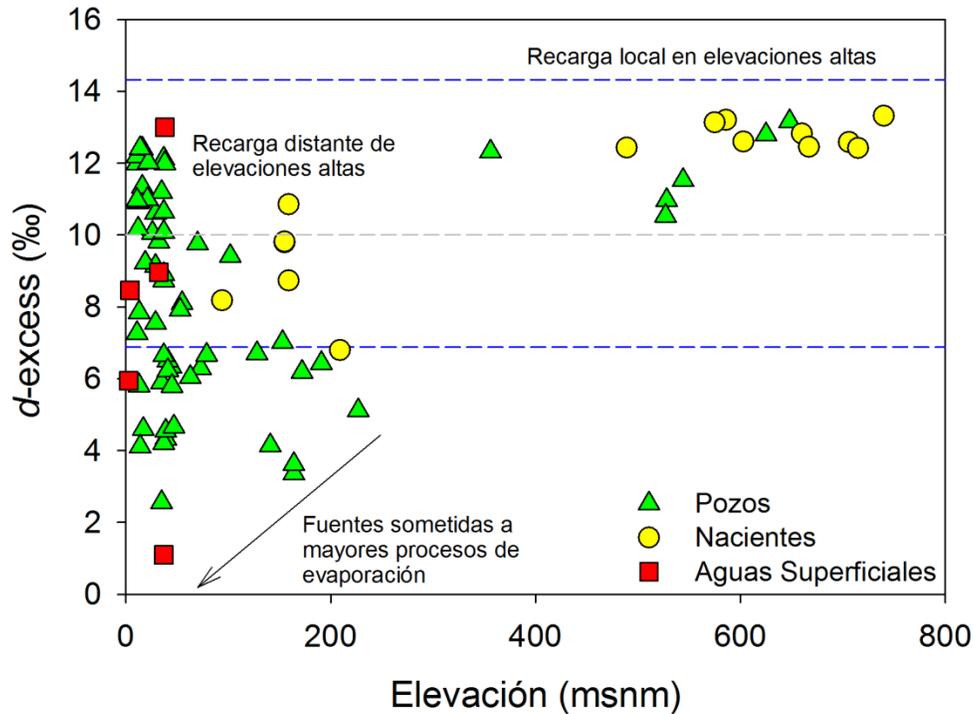


Figura 5: Relación entre la elevación de muestreo y el d -excess (‰) por tipo de fuente. Las líneas gris y azul representan el promedio (10.60‰) y ± 3.72 (1σ) en d -excess (‰) para la lluvia representativa de la ciudad de Liberia.

Las Figuras 6 y 7 muestran la distribución espacial de la composición de $\delta^{18}\text{O}$ y d -excess. Las zonas de baja elevación cercanas a la costa, la región entre Nicoya y Samara y las cercanías al río Tempisque en la zona de Barra Honda, presentaron valores más enriquecidos, en comparación con las zonas altas de Hojancha y la zona media del área de estudio entre Santa Cruz y Carrillo. Es importante recalcar que lentos procesos de recarga en condiciones de baja humedad relativa y altas temperaturas pueden enriquecer sustancialmente el agua de la recarga. Asimismo, acuíferos someros (<30 m de profundidad el nivel freático), pueden experimentar evaporación secundaria, resultando en menores valores de d -excess. Los valores de d -excess presentan la misma tendencia con la excepción que las fuentes en Nosara y Samara muestran sistemáticamente valores alto de d -excess, indicando recarga en las zonas más altas, con posterior enriquecimiento en las planicies de los acuíferos cercanos a la costa.

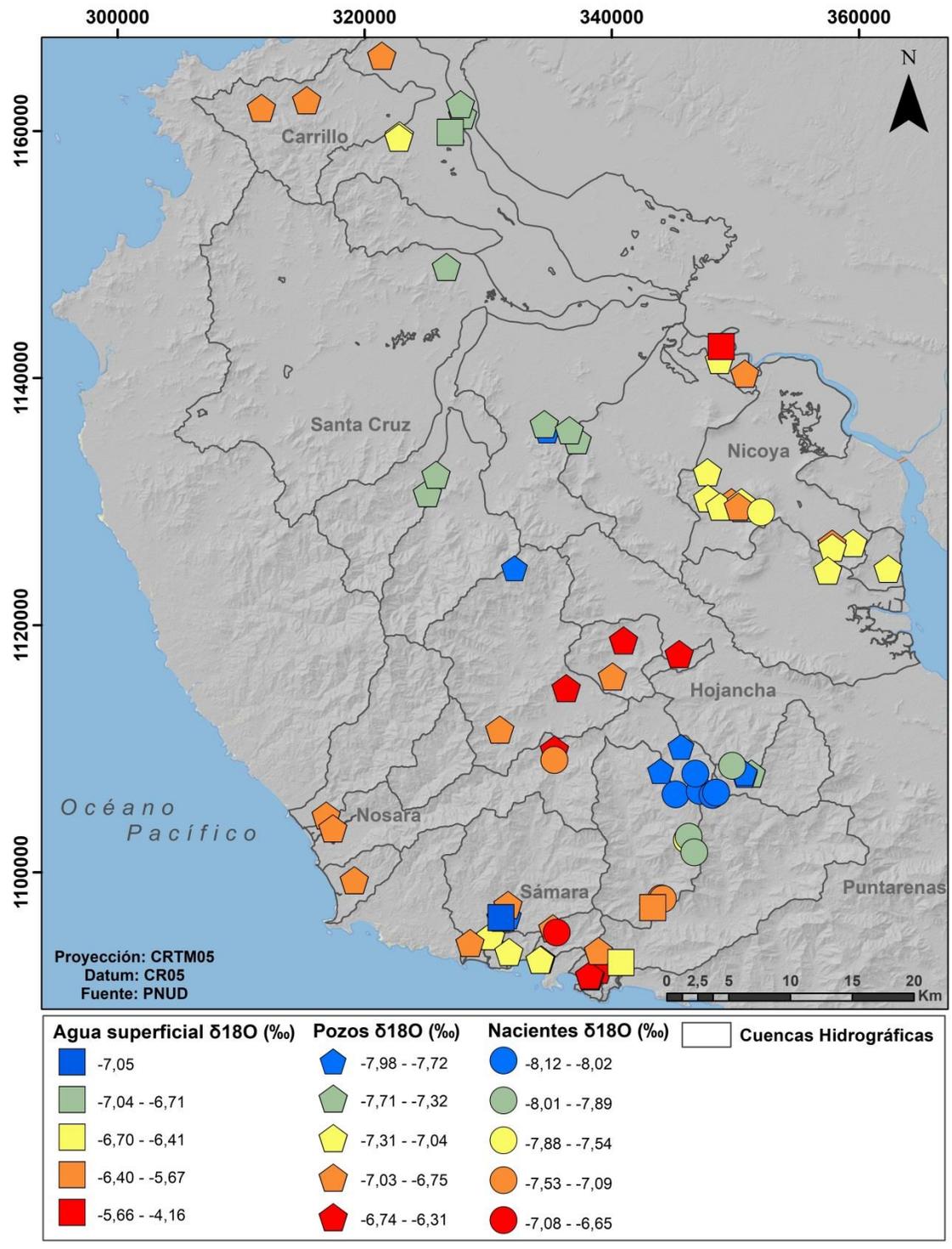


Figura 6: Variación espacial de la composición de $\delta^{18}\text{O}$ por tipo de fuente.

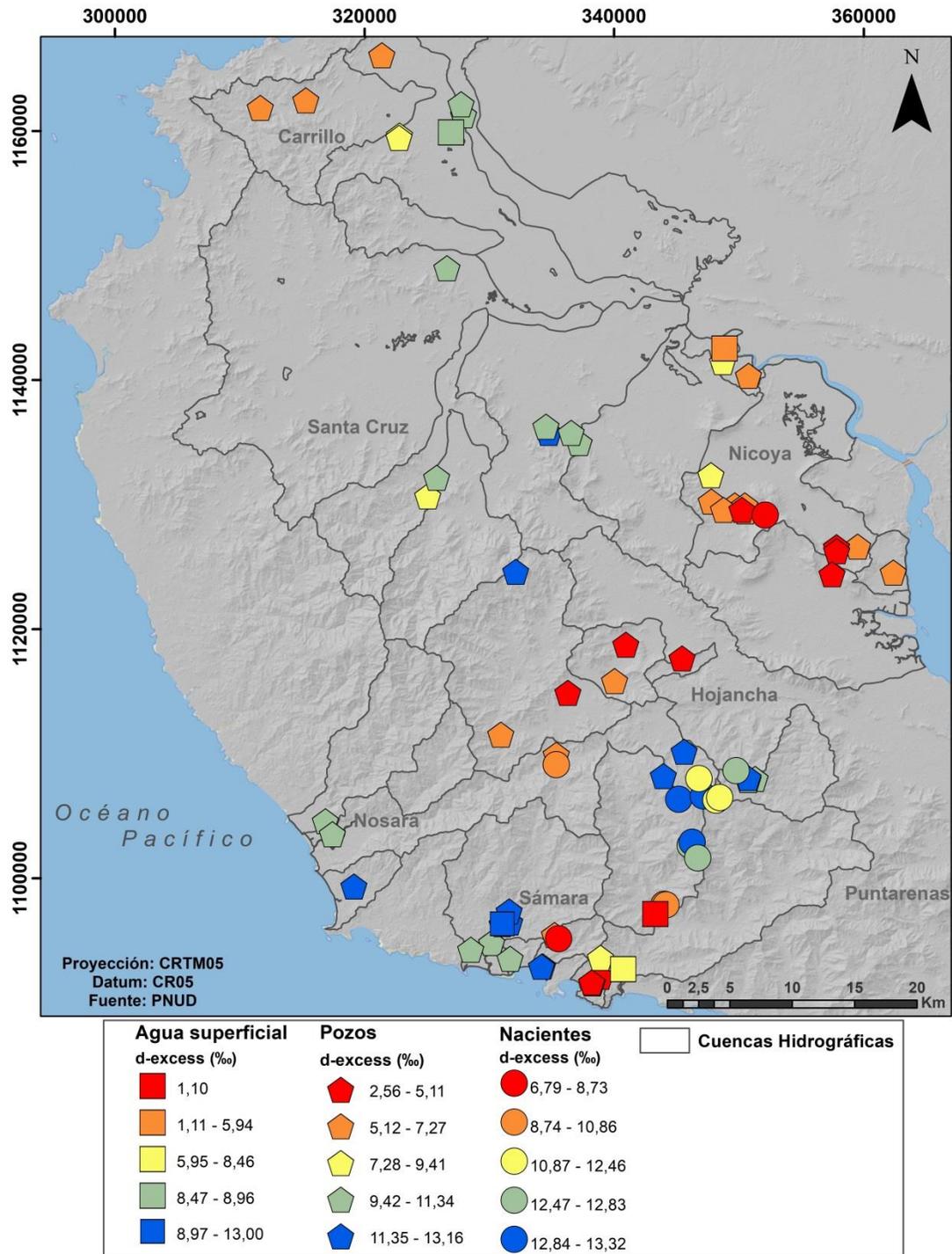


Figura 7: Variación espacial de la composición de d -excess (‰) por tipo de fuente.

La altura potencial de recarga es una medida que no debe analizarse de manera discreta por muestra o por ASADA, siendo lo correcto el análisis por cuenca hidrográfica lo que potencialmente involucra uno o más acueductos. La altura promedio potencial de la recarga en toda la zona de estudio fue de 498 ± 189 msnm, con una altura máxima y mínima de 880 y 105 msnm, respectivamente (Figura 8 y 9). La Figura 8 muestra para cada cuenca hidrográfica la altura máxima (isolinea de elevación roja) y mínima de la recarga (isolinea de elevación amarilla). Es decir, la zona de mayor recarga está concentrada entre ambas isoclinas. Es importante indicar que en cada cuenca se tomaron en consideración los resultados discretos de cada fuente para contextualizar la recarga de cada unidad hidrográfica. De igual manera, la Figura 9 muestra la correspondencia entre el sitio de muestreo (pozo o nacimiento) y su altura potencial de recarga basado en un modelo digital de elevación.

El Cuadro 5 presenta los rangos de elevaciones de recarga por ASADA. Es importante recalcar que estas alturas representan elevaciones a partir de las cuales los procesos de recarga son mayores en la cuenca, pero puede existir recarga en otras zonas de la cuenca hidrográfica por debajo de estas elevaciones. Los casos NA (No aplica) representan muestras en las cuales el método no convergió con una altura positiva, y por tanto, la muestra isotópica no puede asociarse a una tendencia orográfica natural o son fuentes de agua afectadas por cuerpos de agua superficial.

Cuadro 5: Rango de elevaciones potenciales de recarga (EPR) por ASADA.

ASADA	Rango EPR (msnm)	ASADA	Rango EPR (msnm)
Altos del Socorro	799.0	Palestina de Belén	550.0
Arado	655.3 - 688.5	Paso Tempisque	NA
Arado	688.5	Pilangosta	677.3
Artola	395.8	Pilangosta	689.3 - 689.3
Belén de Nosarita	268.2 - 544.6	Playa Samara	399.6 - 422.3
Cangrejal de Samara	455.5 - 518.8	Puerto Carrillo	104.6 - 161.5
Copal	310.2	Puerto Humo	NA
Corralillo	355.4 - 564.2	Quebrada Honda y Tres Esquinas	309.5 - 513.9
Curime	266.0	Rosario de San Antonio	NA
Dulce Nombre	178.7	San Blas	473.1 - 503.9
Esperanza Sur de Nosara	349.9	San Fernando de Samara	446.0 - 665.7

Estrada Rávago	333.6	San Isidro	801.2 - 880.2
Guatil	610.8 - 615.1	San Vicente	628.0 - 705.0
Huacas y Pita Rayada	554.0 - 700.1	Santa Marta	476.3 - 625.0
Juan Díaz	850.0	Santa Marta de Nosara	326.5 - 373.2
Las Brisas y Esterones de Samara	419.6	Santa Rita	431.1
Maravilla	854.5	Santo Domingo de Samara	256.0 - 452.1
Matambuguito	277.9	Torito de Samara	368.1
Monte Romo	801.3 - 820.3	Tortuguero Q. Honda	333.9
Moracia	367.0 - 499.0	Varillal	346.6
Nuevo Colón	393.0	Virginia de Gamalotal	453.4

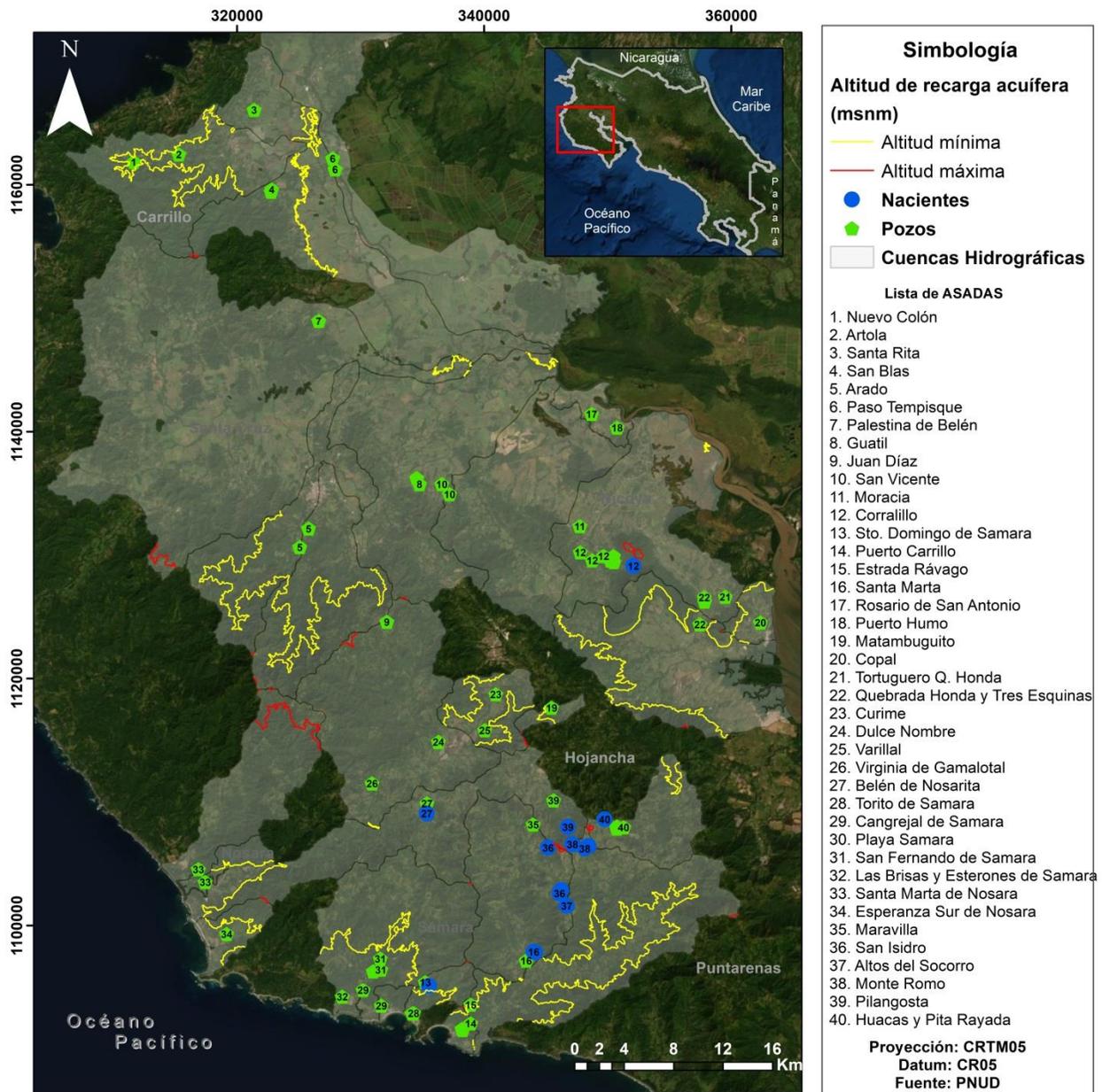


Figura 8: Isolines de elevación máxima (en rojo) y mínima (en amarillo) por cuenca hidrográfica (de acuerdo a los puntos de muestro en cada cuenca) representando las alturas potenciales de recarga determinadas mediante el análisis isotópico.

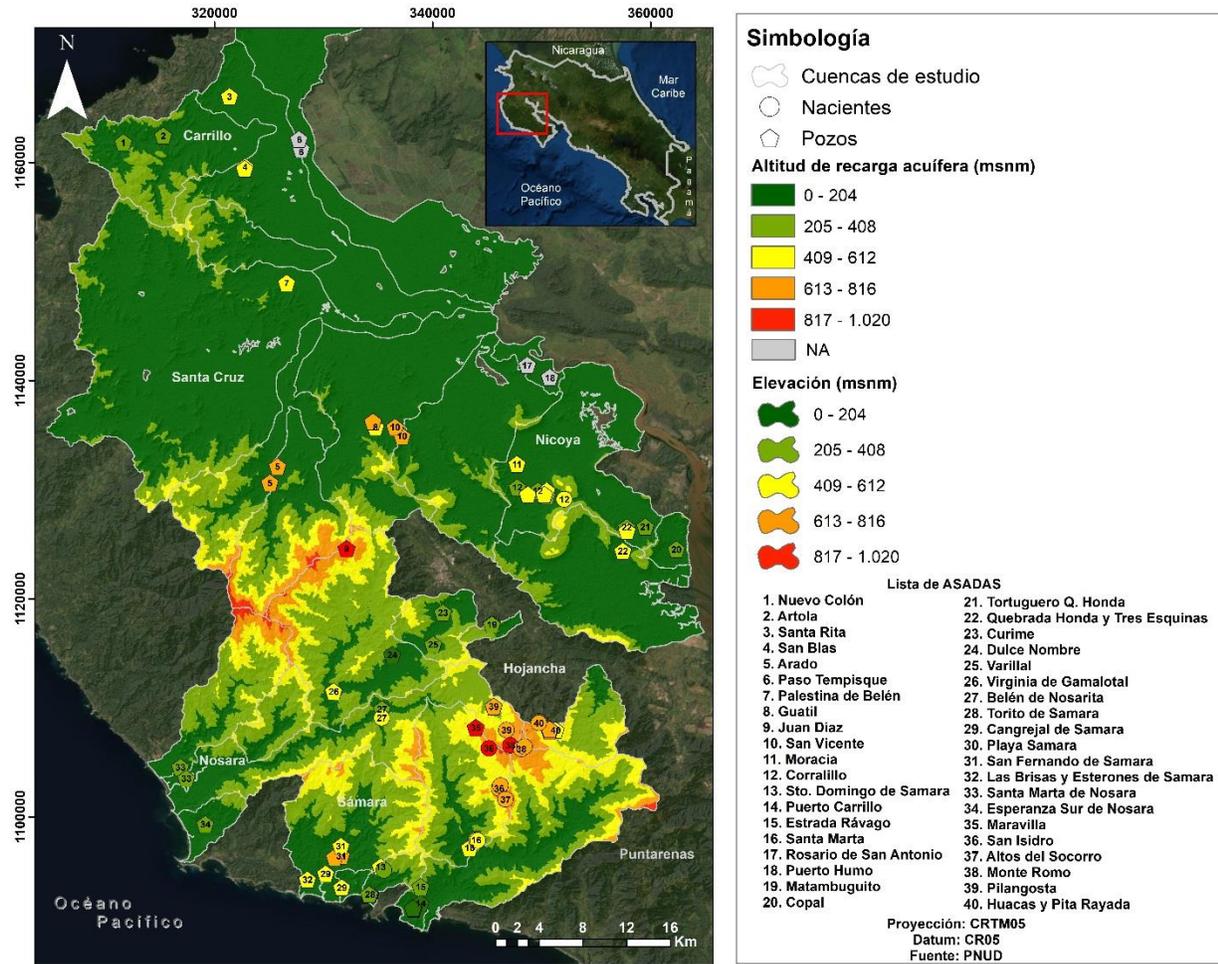
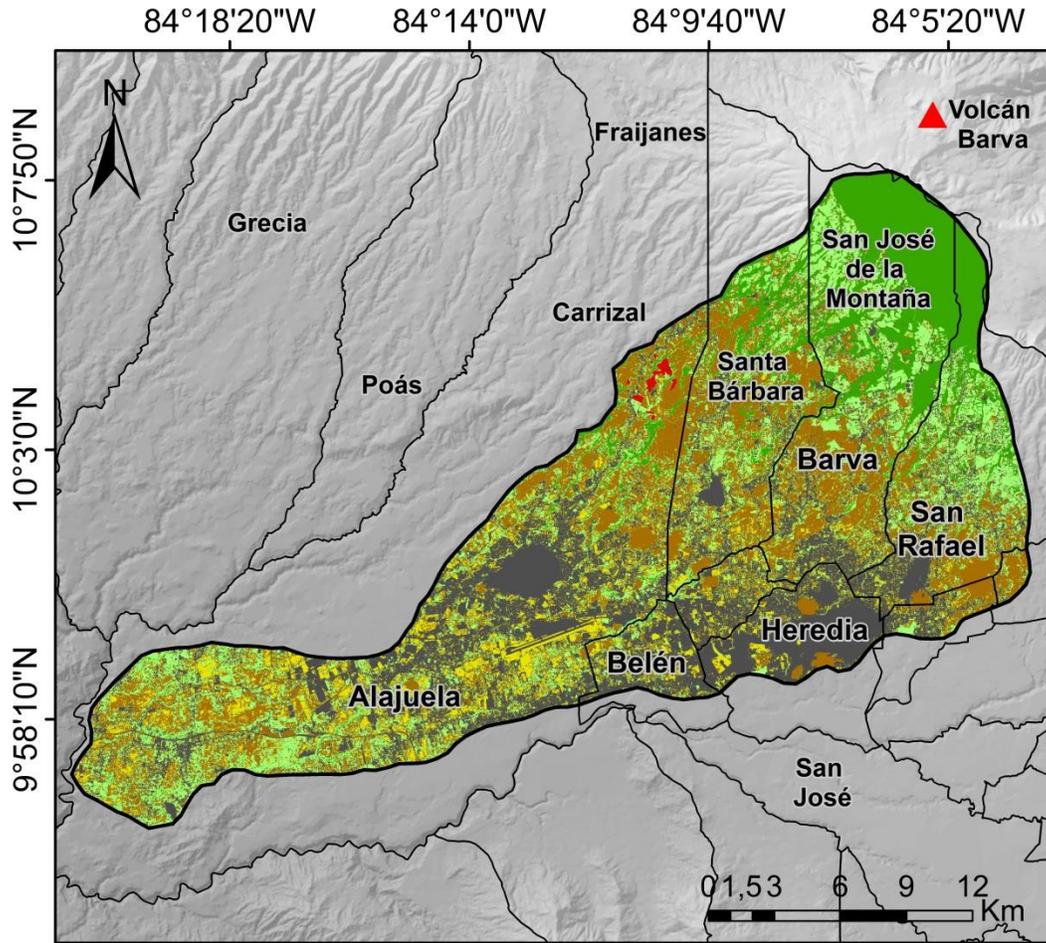


Figura 9: Elevación del área de estudio en m.s.n.m y alturas potenciales de recarga determinadas mediante el análisis isotópico. El color de los símbolos de cada fuente de agua (pozos o nacientes) corresponde con el código de colores de la elevación del terreno.

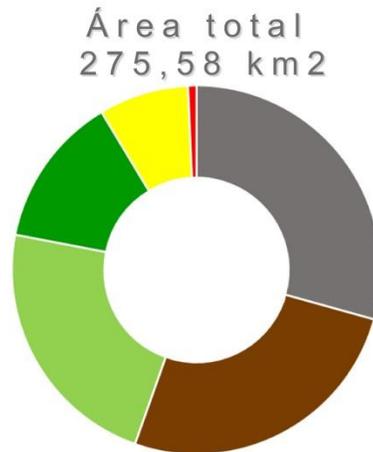
2. Recomendaciones finales

- Con base en las elevaciones y productos en SIG generados, realizar un levantamiento detallado del tipo de uso de suelo de las cuencas y la zona de recarga como se muestra en el Anexo 1 y 2, tomando como ejemplo el acuífero Barva en la zona central del país. El análisis puede realizarse mediante imágenes satelitales Sentinel con herramientas no supervisadas o supervisadas con verificación de campo.
- Es necesario propiciar el establecimiento de gradientes isotópicos de monitoreo en las estribaciones orográficas de la Península de Nicoya. Lo anterior para contar con gradientes isotópicos para futuros trabajos en otras ASADAS de la región que no fueron incluidas en este análisis.
- En futuros trabajos realizar muestreos de todas las ASADAS o fuentes por cuenca hidrográfica, en aras de mejorar el análisis espacial. Los autores de este trabajo desconocen cómo se realizó la selección de las 40 ASADAS estudiadas, pero es evidente que algunas zonas contaron con una mayor densidad de puntos de muestreo.
- Buscar financiamiento para realizar espacialmente un análisis de edad del agua subterránea utilizando mediciones de tritio (200 euros por muestra). Una vez conocidas las alturas de recarga, es necesario conocer la edad de los flujos subterráneos para conocer la resiliencia de los sistemas a los cambios interanuales del régimen de precipitación.
- Establecer sistemas de monitoreo continuo de niveles en nacientes y pozos como parte del fortalecimiento técnico-científico de las ASADAS, ver ejemplo en Anexo 3.
- Generar un taller para la divulgación y correcta interpretación de los resultados contemplando todas las ASADAS del estudio.

ANEXO 1



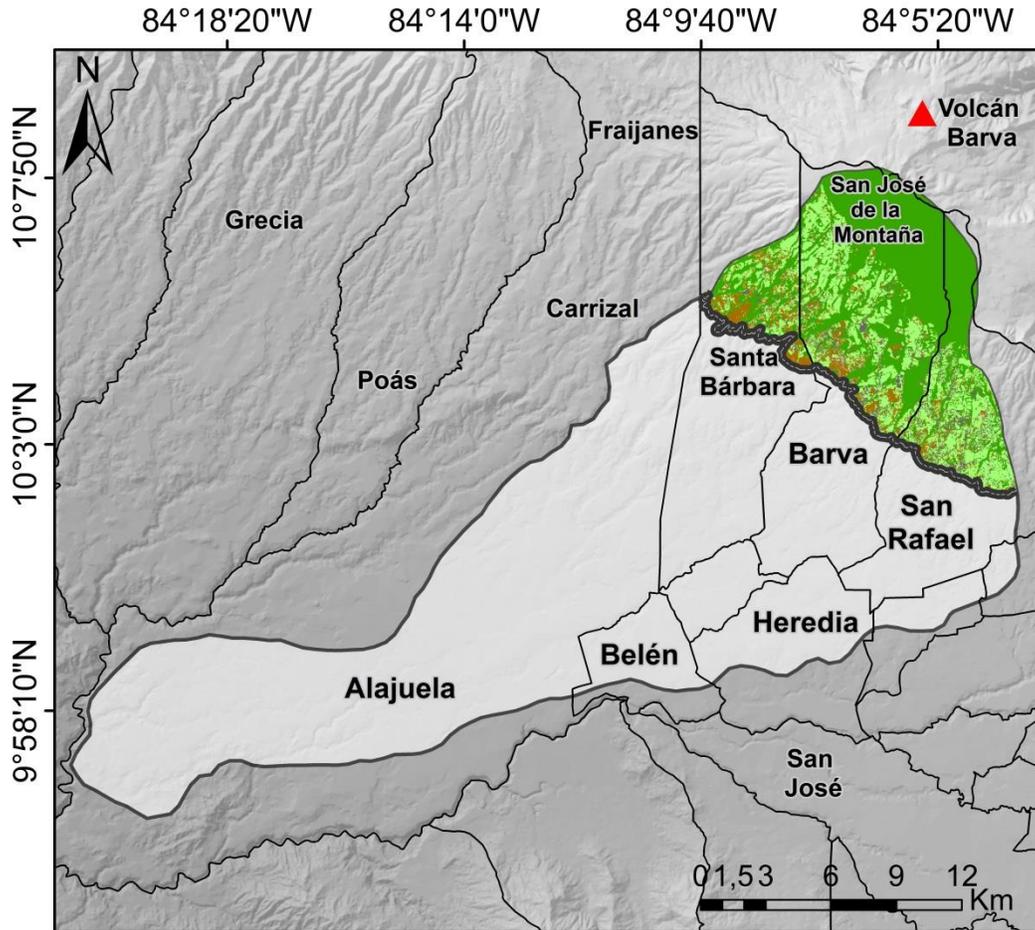
Cobertura y Uso	%
Bosque	13,39
Pastos	22,80
Cultivos	26,24
Áreas Urbanas	29,45
Suelo Desnudo	7,95
Viveros	0,16
Volcanes	
Acuífero Barva	
División Administrativa	



Proyección: WGS84
Datum: WGS84
Fuente:
CENIGA, Atlas TEC 2014, Sentinel Junio 2019

Figura A1: Uso del suelo en el acuífero Barva, Junio 2019.

ANEXO 2



Cobertura y Uso	%
 Bosque	50,21
 Pastos	28,78
 Cultivos	15,12
 Áreas Urbanas	5,90

AMPR (msnm)

 1550

Proyección: WGS84
 Datum: WGS84
 Fuente:
 CENIGA, Atlas TEC 2014, Sentinel Junio 2019

Área total
 63,38 km²

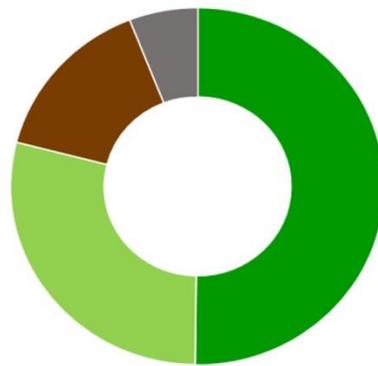


Figura A2: Uso del suelo en la zona de recarga del acuífero Barva, Junio 2019.

ANEXO 3

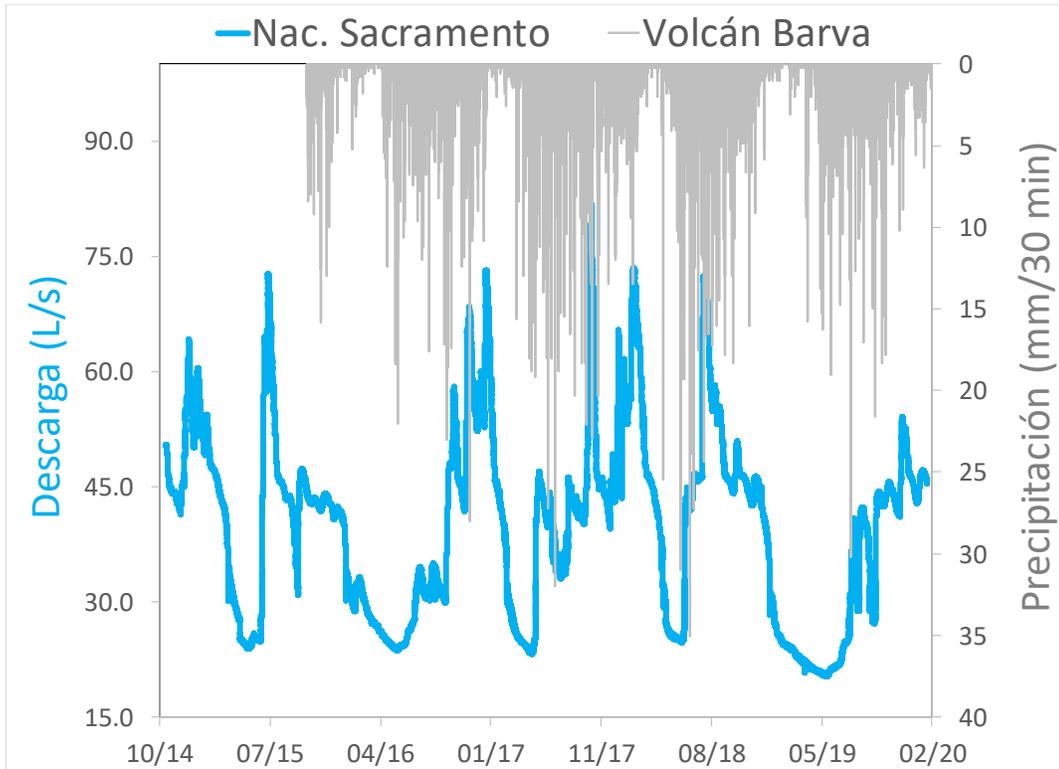


Figura A3: Descarga en L/s (caudal natural) (2014-2020) de la naciente Sacramento (línea celeste) y precipitación en mm/30 minutos en el Volcán Barva. Estos dos sistemas son representativos de la dinámica hidrometeorológica en la zona (noroeste) de recarga.