

Caracterización hidrogeológica en el área urbana de Santo Domingo, Chontales, Nicaragua.

Hydrogeological characterization in the urban area of Santo Domingo, Chontales, Nicaragua.

Aldana González, Greicy¹ ✉; Sequeira Gómez, Lener¹

1. Instituto de Geología y Geofísica (IGG-CIGEO), Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, UNAN-Managua, Rotonda Universitaria Rigoberto López Pérez, 200 mts al Este. Apartado postal: A-131*

Recibido: 04/10/2018

Aceptado: 22/07/2019

© 2021-Revista Tierra (Earth Journal) IGG-CIGEO



Este trabajo está licenciado bajo una [Licencia Internacional Creative Commons 4.0 Atribución-NoComercial-CompartirIgual](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Resumen

La presente investigación se desarrolló en el marco de una caracterización hidrogeológica en la ciudad de Santo Domingo y sus alrededores, ubicada en la Cuenca Alta del Río Artiguas, utilizando técnicas hidrogeológicas e información climática, realizando inventario de fuentes de agua, muestreo de aguas superficiales y subterráneas para análisis de su calidad a través de mediciones físico-químicas en campo y en laboratorio, determinación de metales pesados, metaloides y bacteriológicos en muestras de agua recolectadas en diferentes puntos de la cuenca, estableciendo la correlación con el medio geológico, con el fin de analizar la interrelación de flujos de agua subterránea y superficial a través de estructuras geológicas como contactos entre formaciones, fallas y fracturas. En este sentido, se ha determinado que el agua que circula en la cuenca estudiada se canaliza tanto por los sistemas de drenaje superficial como por las estructuras mineras subterráneas antiguas, construidas desde 1870 para la extracción mineral. Las fallas y fracturas en el área facilitan la circulación del agua subterránea en cantidades apreciables. Por tanto, esta investigación genera información que permite evaluar la situación actual para prevenir eventuales afectaciones al recurso hídrico y por ende al sistema de abastecimiento de agua a la población.

Las pruebas de infiltración permitieron determinar la capacidad de infiltración de los suelos para evaluar la recarga a los acuíferos del área. Las pruebas de aforo se desarrollaron para determinar la cantidad de agua circulante en la cuenca y con los análisis químicos se determinó la calidad de las aguas en el área también se determinó la no conexión hidráulica agua superficial - agua subterránea a través de la secuencia arcillosa superficial de unos 50 metros de espesor.

Palabras clave: cuenca, Río Artiguas, aguas superficiales, aguas subterráneas, estructuras geológicas.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio contempla una caracterización hidrogeológica con enfoque de flujos de agua superficial y subterránea en la ciudad de Santo Domingo y sus alrededores, con la que se establecieron relaciones de interacción con los vertidos producidos por la actividad minera artesanal principalmente y propensos a contaminar las aguas subterráneas, especialmente las que se escurren y salen por el llamado Túnel Azul, una antigua galería minera que en la actualidad constituye la principal fuente de agua que abastece a la ciudad.

Las actividades mineras, a menudo, producen impactos ambientales negativos en suelos, aguas, cultivos, flora, fauna, aire, paisaje y sobre todo a la salud humana. Además, pueden impactar tanto positiva como negativamente a la economía local. Por ello es necesario, contribuir a un manejo adecuado de los recursos hídricos tomando en cuenta la actividad minera artesanal e industrial que en la última década se ha intensificado.

El Municipio de Santo Domingo (Figura 1), pertenece al Departamento de Chontales y fue fundado por mineros provenientes de Nueva Segovia que nombraron al asentamiento "El Mineral de Santo Domingo", localiza-

✉ galdana@igg.unan.edu.ni

Abstract

The present investigation was developed within the framework of a hydrogeological characterization in the city of Santo Domingo and its surroundings, located in the upper basin of the Artiguas River, using hydrogeological and climatic information techniques; carrying out an inventory of water sources, sampling of surface and groundwater for quality analysis through physical-chemical measurements in the field and in the laboratory, determination of heavy metals, metalloids and bacteriological samples of water collected in different points of the basin, establishing the correlation with the geological environment in order to analyze the interrelation of ground and surface water flows through geological structures such as contacts between formations, faults and fractures.

In this sense, it has been determined that the water circulating in the basin under consideration is channeled both by surface drainage systems and by ancient underground mining structures, built since 1870 for mineral extraction. Faults and fractures in the area facilitate the circulation of groundwater in appreciable quantities. Therefore, this research generates information that allows to evaluate the current situation to prevent eventual impacts that may have a negative impact on the water resource and therefore on the water supply system to the population.

The infiltration tests allowed to determine the infiltration capacity of the soils to evaluate the recharge to the aquifers of the area. The capacity tests were developed to determine the amount of water circulating in the basin and with the chemical analyzes the quality of the water in the area was determined, it was also determined the non-hydraulic connection of surface water - groundwater through the clayey sequence surface about 50 meters thick.

Keywords: basin, Artiguas River, surface water, groundwater, geological structures.

do al oriente de "El Pital", en las inmediaciones del Río Artiguas (Río Sucio) o Cuenca Alta del Río Artiguas, en la denominada Provincia Geológica Central de Nicaragua, 182 kilómetros al este de Managua, capital de Nicaragua.

La principal vía de acceso al área desde Managua es la carretera Panamericana Managua-San Benito, continuando por la carretera pavimentada San Benito-Juigalpa, siguiendo por carretera adoquinada Juigalpa-Santo Domingo. Internamente el área está comunicada por caminos generales, algunos de los cuales no son transitables en época de lluvia y en algunos se puede acceder con vehículo doble tracción.

En el área de estudio distintos autores han contribuido al conocimiento científico de la zona. Entre los trabajos más relevantes figuran estudios geológicos, geoquímicos, hidrogeológicos y de contaminación ambiental.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se recopiló para el estudio documentos, informes, estudios, artículos, tesis u otros trabajos en la zona, mapas (topográficos, geomorfológicos, geológicos, etc.) y fotografías aéreas que abarcan el área de estudio. De esta manera, se recopiló y analizó la información hidrogeológica existen-

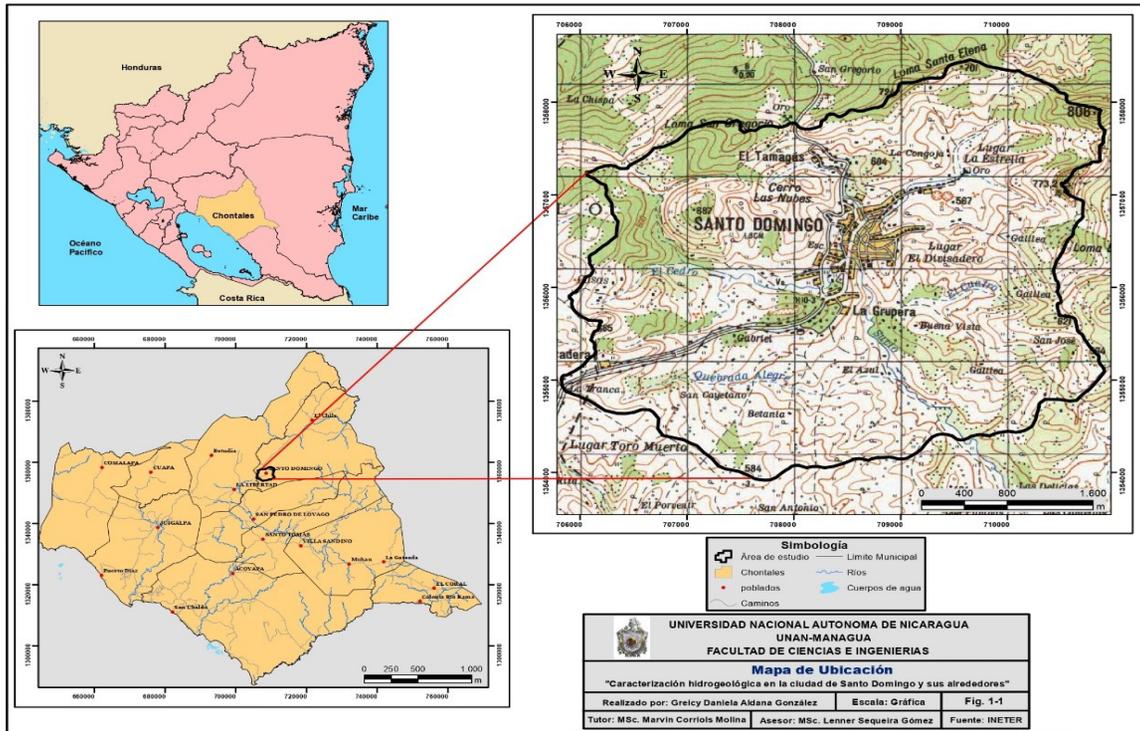


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio

te, la que posteriormente fue procesada, creándose una base de datos que facilitó la generación de distintos mapas. Para la obtención de estos mapas se utilizaron las herramientas que brindan el software ArcGIS 10.2, procesándose datos de un gran número de pozos.

Con el propósito de revelar nueva información hidrogeológica se efectuó trabajo de campo; se realizaron dos campañas de campo en el período abril-mayo y octubre-noviembre del 2014 para la recolección de datos; se desarrolló el trabajo de campo de las diferentes disciplinas y actividades siguientes (reconocimiento geológico a escala local, inventario de recursos hídricos, pruebas de infiltración, pruebas de aforo, medición de parámetros fisicoquímicos, muestreo de agua para análisis de calidad en laboratorio) (Figura 2).

Para las pruebas de infiltración se utilizó el método del infiltrómetro de doble anillo para lo cual se emplearon los siguientes materiales: dos anillos de metal, tubos Mariotte, bidones, regla graduada, cronómetro; las pruebas de aforo se realizaron utilizando el método del flotador con los siguientes materiales (flotador, cronómetro, cinta métrica, regla graduada), también se utilizó un molinete modelo FP111, Global Water. En la medición de parámetros fisicoquímicos se utilizaron los equipos EC HANNA DiST 19.99 mS/cm, HANNA SALINTEST, HANNA pHep, Thermo Scientific Orion 3 Star pH, a fin de medir temperatura, pH, salinidad y conductividad eléctrica en diferentes cuerpos de agua. Se tomaron 9 muestras que se conservaron en envases con 2 ml de ácido nítrico, se llevaron al laboratorio para la el análisis de los parámetros cloruros, sulfatos, bicarbonatos, nitratos, As, Hg, alcalinidad, STD, dureza total, entre otros. Se inventariaron 14 pozos y 99 manantiales en toda el área estudiada.

3. CARACTERIZACIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO

Clima. El Municipio se encuentra enmarcado en un clima de sabanotropical, con una temperatura media de 25 a 27° C; una precipitación anual entre los 1,100 a 2,000 mm, una humedad relativa del 71 al 80 %, con vientos predominantes del Noreste, a una velocidad de 2.2 a 3.6 m/s.

Uso de suelo. En el Municipio de Santo Domingo las consecuencias del avance de la frontera agrícola constituye uno de los procesos de degradación ambiental más importante, se manifiesta con más evidencia en la cabecera municipal donde la actividad minera ha sido la mayor fuente de trabajo para los habitantes y por ende de un mal aprovechamiento de las

riquezas naturales que ofrecen las microcuencas; la degradación agroecológica es fuerte y con ella aumentan los problemas de pérdida de los potenciales productivos, pérdida de fertilidad de los suelos, deforestación indiscriminada y desecación de cuerpos de agua. Esta degradación se debe a que la zona ha sido sometida a usos agropecuarios, forestales y mineros incompatibles con sus capacidades y potenciales.

Geología local. En el área de estudio se encuentran rocas del tipo lavas andesíticas, basálticas, ignimbéricas, aglomerados, entre otras. Las formaciones geológicas pertenecen al Grupo Coyo inferior, edad Mioceño-Plioceno (Sánchez, 2004 y Herrera, 2005). Pérez (2015) identificó dos unidades litológicas: Unidad Andesítica de Santo Domingo, dentro de la cual definió la Sub Unidad Andesita hidrotermalmente Alterada, y por último Unidad Coluvio-Aluvial.

Estructuralmente se caracteriza por el tipo de deformación frágil.



Figura 2. a) Prueba de infiltración, b) Aforo en el río Artiguas, c) Equipo utilizado para medición fisicoquímica y d) Toma de muestra de agua para calidad.

Además, es una zona donde actuó una intensa actividad hidrotermal que ha dado paso al desarrollo de zonas de deformación dúctil. Según Sánchez (2004) dentro de las principales estructuras que prevalecen en la zona de estudio se encuentran las vetas de cuarzo emplazadas en un sistema de fallas y fracturas con dirección NE que cortan las rocas andesitas de edad Terciaria (Oligoceno-Plioceno).

Otro rasgo estructural que predomina es el sistema de diaclasas que están dispuestas principalmente en el lecho rocoso del Río Sucio, Quebrada Alegre y otros tributarios, cuya dirección preferencial es NW, NE, SW y SE. Estas diaclasas son evidencias de esfuerzos tectónicos que han afectado el área de estudio (Sánchez, 2004).

Geomorfología local. La morfología de la Cuenca del Río Artiguas, se caracteriza por una combinación de planicies y mesetas interrumpidas por elevaciones escarpadas como parte de la Serranía de Amerrique y de la Cordillera Chontaleña.

En la parte baja de la cuenca las elevaciones andan por el rango de los 390 a 500 m.s.n.m. con pendientes moderadas, en la parte media la topografía es un poco más accidentada con elevaciones entre los 500 y 610 m s. n. m. y en la zona más elevada se localizan cerros alineados que tienen entre 610 y 760 m s. n. m. con pendientes abruptas y es en donde se localiza la mayor parte de vetas mineralizadas.

Las principales montañas son: Peñas Blancas, El Espejo, Banadí, El Escándalo, Las Nubes, La Chispa y Cerro El Consuelo, relacionados con focos volcánicos.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Climatología. El clima es un conjunto de variables meteorológicas que caracterizan el estado medio de la atmósfera en un punto determinado en la superficie terrestre.

En general se considera un periodo mínimo de 10 años de datos para obtener las variables climatológicas de un área determinada. Pero en realidad, el rango de años necesarios variará según el parámetro que se esté evaluando; así, la variación de la presión es inferior a la de la precipitación. Por esta razón, con unos pocos años bastaría para calcular valores medios de la presión atmosférica, pero no para los de la precipitación, que es mucho más variable. Los elementos climáticos que contribuyen directamente sobre los recursos de agua de un área dada son la precipitación y la evaporación, pero también existen otros factores como la temperatura, humedad relativa, brillo solar, radiación solar y velocidad del viento que intervienen sobre la evaporación y el uso consuntivo de las plantas; pero ellos no ejercen influencia directa sobre las disponibilidades del agua superficial o subterránea.

Precipitación. Uno de los componentes primarios del ciclo hidrológico es la precipitación, puede calificarse el factor esencial pues constituye la materia prima del referido ciclo.

Cuando el agua, en estado líquido o sólido, llega a la superficie de la tierra se dice que ha precipitado. El vapor de agua contenido en la masa de aire, a consecuencia de los cambios de presión y temperatura y del movimiento de estas masas, ayudado, en ocasiones, por minúsculos núcleos de condensación y material sólido en suspensión, se reúnen en gotas de agua o en cristales de hielo y cae venciendo las resistencias que se le oponen, hasta llegar a la superficie terrestre.

Para el estudio de los recursos hídricos de una región, se manejan datos de precipitaciones mensuales y anuales. En este caso se recurrió a los datos de precipitaciones de la estación ordinaria Santo Domingo (código 6107), utilizando el periodo de registro 1970 – 2011, es decir, 41 años. Como la serie pluviométrica de esta estación está incompleta, para

completarla se utilizó la estación Juigalpa (código 69034), cuya serie pluviométrica está completa para el periodo antes mencionado (Tabla 1). El periodo de menor lluvia es el comprendido de enero a abril, sin embargo, en este periodo el promedio es 71.46 mm que es un valor significativo en la recarga al sistema acuífero en la Cuenca Alta del Río Artiguas (Figura 3). El periodo de mayor lluvia (282.84 mm) es el comprendido entre mayo a diciembre, alcanzando la máxima media mensual del periodo de registro en julio.

El régimen de precipitación es unimodal puesto que, en el periodo de registro utilizado, no es apreciable lo que se conoce como canícula o veranillo de San Juan (déficit de precipitaciones), fenómeno que se presenta entre mediados de julio y mediados de agosto. Si es necesario hablar de este fenómeno en la Cuenca Alta del Río Artiguas, únicamente es posible decir que se caracteriza por una disminución de precipitaciones en septiembre en comparación con las precipitaciones de agosto y octubre que son mayores.

La temperatura. Respecto a la temperatura (Tabla 2 y Figura 4) se observa que aumenta de febrero a abril, teniendo su máximo en este último y disminuye de mayo a enero. Sin embargo, la media mínima histórica se registra en octubre.

Evapotranspiración. Es el cambio del estado líquido al estado gaseoso del agua. La transpiración esencialmente es el mismo fenómeno, pero se efectúa a través del sistema circulatorio de las plantas que a su vez toman agua de una parte del suelo edafológico, lo que se conoce como el proceso de la fotosíntesis.

Thorntwaite (1948) denominó Evapotranspiración Potencial (ETP) a la evapotranspiración que se produciría si la humedad del suelo y la cobertura vegetal estuvieran en condiciones óptimas. Por el contrario, la Evapotranspiración Real (ETR) es la que se produce realmente en las condiciones existentes en cada caso. Es evidente que $ETR < ETP$.

En este caso, el cálculo de la ETP se realizó mediante una hoja de cálculo Excel basada en la fórmula de Thorntwaite con los datos de entrada de las temperaturas medias mensuales medidas en la estación Juigalpa en Chontales y del número teórico de horas de sol para la latitud 12° Norte a la que se encuentra la ciudad Santo Domingo (Tabla 3, Tabla 4 y Figura 5).

Hidrología. Regionalmente, la cuenca del Río Artiguas se localiza dentro de la Cuenca Hidrográfica No.61-95198 de la Región Autónoma del Atlántico Sur (RAAS) (Metodología Pfafstetter, 2014), la que es controlada por el Río Escondido que capta las aguas de dos afluentes principales: Río Mico y Río Siquia.

Este estudio se realizó en la Cuenca Alta del Río Artiguas, la queha sido subdividida en trece (13) subcuencas: Quebrada Alegre, El Cedro, El Tamagás, El Paraíso, El Divisadero, Peña Blanca, El Cuatro, Buena Vista, Galilea 1, Galilea 2, Galilea 3, Quebrada Alegre 1 y Quebrada Alegre 2 (Figura 6).

Aforos en ríos (subcuencas). Es necesario medir la cantidad de agua de las fuentes (oferta) para saber la cantidad de población a abastecer (demanda). El aforo es la operación de medición del volumen de agua en un tiempo determinado; esto es el caudal que pasa por una sección de un curso de agua. El valor del caudal mínimo debe ser mayor que el consumo máximo diario con la finalidad de cubrir la demanda de agua de la población futura. En la Tabla 5 se muestra la información principal de aforos en las subcuencas.

En esta investigación, los caudales Q en la salida de ríos o quebradas en la Cuenca Alta del Río Artiguas, se midieron mediante aforos directos con un molinete Modelo FP111, Global Water que mide la velocidad del

Tabla 1. Precipitaciones mensuales medias en Santo Domingo, Chontales. Fuente: INETER

Estación: SANTO DOMINGO	UTM WGS84 1356603 N 709202 E											
Código: 6107	Latitud: 12° 15' 54" N											
Años: 1970-2011	Longitud: 85° 04' 36" W											
Parámetro: Precipitación (mm)	Elevación: 460 msnm											
	Tipo: Pluviométrica											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Media	120.86	53.97	35.47	47.75	172.42	255.03	560.09	336.51	219.18	249.32	187.30	99.26
Máxima	396.40	268.40	106.00	245.70	461.50	546.20	946.50	638.70	489.70	502.20	687.40	403.10
Mínima	13.50	6.00	1.00	0.80	28.50	104.50	170.90	70.20	16.40	28.90	16.50	10.70

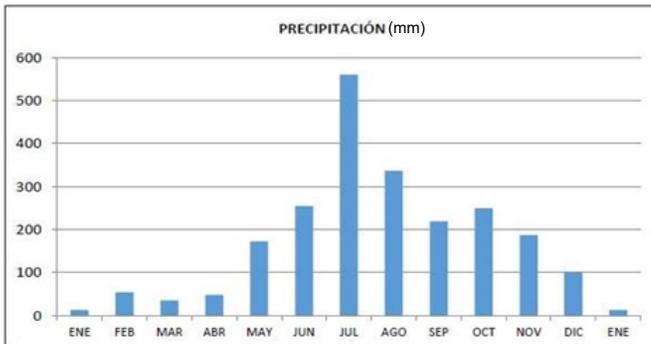


Figura 3. Precipitación media mensual para Santo Domingo, Chontales. Periodo 1970 – 2011.

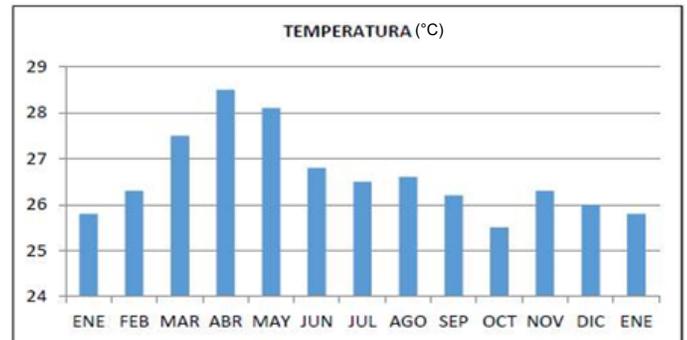


Figura 4. Temperatura media mensual para Santo Domingo, Chontales. Periodo 1970 – 2011.

flujo de agua. Esta información es muy importante para la estimación del balance hídrico y la disponibilidad del recurso para los diversos usos.

A la fecha de los aforos, el caudal medido en la salida de la Cuenca Alta del Río Artiguas es 1.50 m³/s. En la confluencia de las quebradas El Paraíso – Peña Blanca (Río Sucio inicio) el caudal medido es 0.275 m³/s, que prácticamente es el caudal que aportan las mencionadas subcuencas. En el tramo Río Sucio inicio – Río Sucio salida, el aporte subterráneo y superficial proveniente del resto de subcuencas es de 1.225 m³/s. Parte de este caudal proviene del agua subterránea medido en la salida del Túnel Azul (0.120 m³/s).

En orden de importancia, los mayores caudales superficiales medidos en la presente investigación corresponden a las subcuencas El Cedro, Quebrada Alegre y el Paraíso (Tabla 5). Por tanto, es posible considerar-

los como alternativas para proyectos de abastecimiento de agua a la población urbana y suburbana de Santo Domingo, Chontales.

5. PRUEBAS DE INFILTRACIÓN

La infiltración del agua juega un papel importante en los procesos de escorrentía como consecuencia de la precipitación dada en una cuenca; dependiendo de su magnitud e intensidad las lluvias pueden producir caudales diferentes. La infiltración depende de muchos factores, los principales son: tipo de suelo, intensidad de la precipitación y porosidad del suelo.

La velocidad de infiltración se obtuvo in situ mediante la denominada prueba de infiltración, empleando en este caso el infiltrómetro de doble

Tabla 2. Temperaturas medias mensuales en Juigalpa, Chontales. Fuente: INETER

Estación: JUIGALPA/JUIGALPA		Latitud: 12° 06' 00" N		UTM WGS84 1338143 N 677759 E											
Código: 69034		Longitud: 85° 22' 00" W													
Años: 1970-2011		Elevación: 90 msnm													
Parámetro: Temperatura media (°C)		Tipo: PV													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic			
Media	25.8	26.3	27.5	28.5	28.1	26.8	26.5	26.6	26.2	25.5	27.3	26.0			
Máxima	27.4	28.3	29.0	30.1	29.8	28.3	27.4	27.7	27.7	27.4	26.3	27.2			
Mínima	24.4	24.7	26.0	27.0	26.4	25.2	25.4	25.1	24.5	25.0	24.8	24.6			

Tabla 3. Número máximo de horas de sol a una latitud de 12° 15' 54" N.

Lat.N.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
14°	11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.8	12.5	12.1	11.7	11.3	11.2
12°	11.4	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.7	11.4	11.3
10°	11.5	11.7	11.9	12.2	12.5	12.6	12.5	12.3	12.1	11.8	11.5	11.4

Allen, R.G.; L. S. Pereira; D. Raes y Smith, M. (1998).- Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56 [http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm#Contents12° 15' 54" N](http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm#Contents12° 15' 54)

Tabla 4. Cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP)

Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Temp	25.8	26.3	27.5	28.5	28.1	26.8	26.5	26.6	26.2	25.5	26.3	26	
i	11.99	12.35	13.21	13.94	13.65	12.70	12.49	12.56	12.28	11.78	12.35	12.13	151.44
ETP sin corr.	120.0	129.1	152.8	174.9	165.8	138.6	132.8	134.7	127.2	114.8	129.1	123.6	
No. días mes	30	31	30	31	31	28.3	31	30	31	30	31	31	
No. horas luz	11.4	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.7	11.4	11.3	
ETP corr.	114.0	128.9	151.5	185.2	179.9	138.1	144.1	139.2	132.6	112.0	126.7	120.3	1672.5

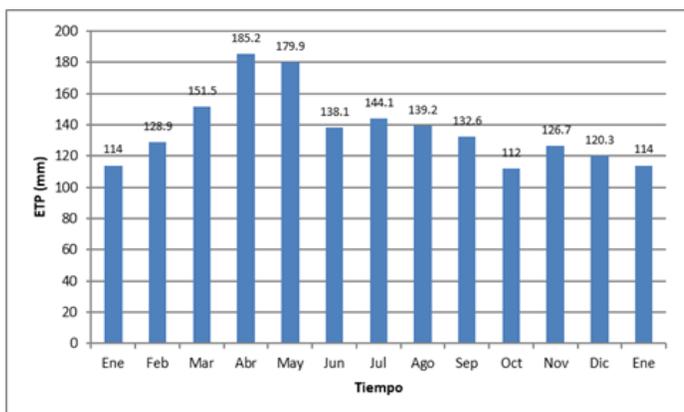


Figura 5. Evapotranspiración potencial media mensual para Santo Domingo. Periodo 1970 – 2011.

anillo, con el propósito principal de determinar la conductividad hidráulica a partir de la determinación de la velocidad de infiltración en el suelo, así como la variación de los caudales. En esta investigación se realizaron 14 pruebas de infiltración.

Los suelos en que fueron realizadas estas pruebas son en su mayoría suelos limosos o arcillo-arenosos. De acuerdo a los resultados de conductividad hidráulica, en general, las menores recargas se producen en la parte baja de las subcuencas y por tanto, las mayores recargas se producen en la parte media alta de dichas subcuencas (Tabla 6).

Cálculo de la recarga por lluvia en la Cuenca Alta del Río Artiguas.

Se utilizó el método de Gunther Schosinsky N., 2006, el que consiste en una metodología y un modelo que permite determinar la recarga potencial al acuífero (Rp) mediante un balance de suelos. Una de las ventajas de dicha metodología es que considera varias variables que influyen en la recarga de los acuíferos, tales como: la precipitación mensual (P), la retención pluvial (Ret), la capacidad de infiltración de los suelos (fc) y sus características, la cobertura vegetal (Kv), profundidad de raíces (PR), evapotranspiración real (ETR), uso del suelo y pendiente del terreno (Kp), entre otras variables.

Tabla 5. Características principales de afloros en la Cuenca Alta del Río Artiguas.

Quebrada	Código	Coordenadas UTM WGS 84		Altura [msnm]	V [m/s]	A [m ²]	Q [m ³ /s]	Tc [horas]
		Este [m]	Norte [m]					
*Río Sucio (Salida)	A-RSs	709630	1354277	388	0.53	2.83	1.500	0.94
**Río Sucio (Inicio)	A-RSi	709537	1357276	465	0.50	0.55	0.275	
Quebrada Alegre	A-QA	708937	1354987	440	0.40	0.71	0.280	0.50
Quebrada El Cedro	A-QEC	708451	1357178		1.00	0.32	0.320	0.70
Quebrada El Tamagás	A-ET	708621	1356684	456	0.60	0.15	0.090	0.32
Quebrada El Paraíso	A-EP	709534	1357280	464	0.50	0.35	0.175	0.25
Quebrada Peña Blanca	A-PB	709546	1357267	463	0.40	0.18	0.072	0.21
Quebrada El Cuatro	A-EC	708719	1355646	472	0.70	0.15	0.105	0.28
Quebrada Alegre 1	A-QA1	709027	1354683	444	1.00	0.03	0.030	0.24
Quebrada Alegre 2								0.14
Quebrada Buena Vista								0.11
Quebrada Galilea 1	A-GA1	709568	1354425	380	0.19	0.16	0.030	0.24
Quebrada Galilea 2	A-GA2	709521	1354511	380	0.20	0.04	0.076	0.15
Quebrada Galilea 3								0.16
El Divisadero	A-ED	709102	1357019	460	0.40	0.04	0.014	0.12
El Túnel Azul	A-TAZ	708862	1355202	441	0.50	0.24	0.120	

V: velocidad del flujo de agua.

A: área de la sección transversal o perímetro mojado donde se realiza el afloro.

Q: caudal estimado

Tc: tiempo de concentración

S: pendiente

*: La salida de Cuenca Alta del Río Artiguas

** : Inicio del Río Artiguas

$$Rp = Pi + HSi - HSf - ETR \tag{1}$$

Donde:

Rp: Recarga potencial

Pi: Precipitación que infiltra

HSi: Humedad de suelo inicial

HSf: Humedad de suelo final

ETR: Evapotranspiración real

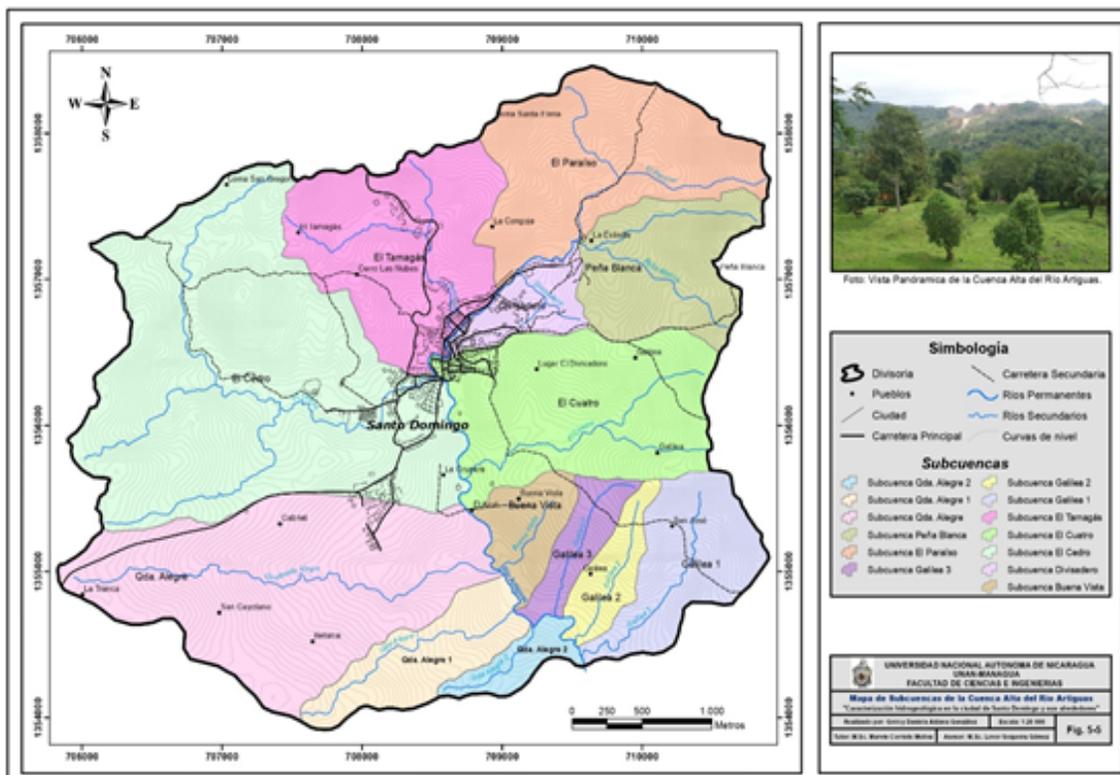


Figura 6. Mapa de subcuencas de la Cuenca Alta del Río Artiguas.

Tabla 6. Resultados de las pruebas de infiltración.

N°	ID	Coordenadas		Altura	Conductividad hidráulica (K)	Referencia
		UTM WGS 84				
		Este	Norte			
		m	m			
				msnm	cm/s	
1	PI-EC1	707356	1356189	511	0.0148	El Cedro 2
2	PI-EC2	708483	1355698	419	0.0001	El Cedro
3	PI-QA2	708206	1355064	486	0.000005	Quebrada Alegre
4	PI-QA3	708233	1354362	523	0.0001	Quebrada Alegre
5	PI-GA2	709319	1355019	460	0.00005	Quebrada Galilea
6	PI-GA1	710289	1355278	525	0.00042	Quebrada Galilea
7	PI-LC2	709247	1355843	427	0.0048	El Cuatro
8	PI-QA1	706718	1355196	624	0.0014	Quebrada Alegre
9	PI-EP	709699	1357589	557	0.0004	Quebrada El Paraíso
10	PI-PB	710590	1356735	708	0.0051	Peña Blanca
11	PI-LC1	710167	1356305	602	0.00038	Quebrada El Cuatro
12	PI-EC1	706863	1356496	556	0.00004	EL Cedro Javier Ocón
13	PI-ET1	708140	1357563	600	0.00035	El Tamagás (Marisol Guido)
14	PI-ET2	708352	1356732	547	0.00005	El Tamagás

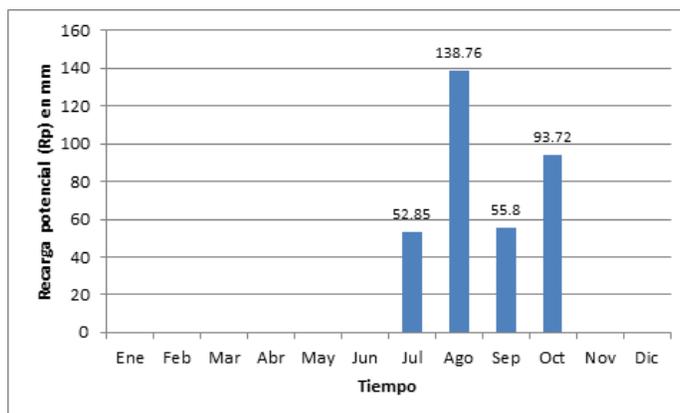


Figura 7. Recarga promedio mensual por lluvias en suelos de la Cuenca Alta del Río Artiguas.

Tabla 7. Resumen del balance hídrico de suelos en la Cuenca Alta del Río Artiguas.

Subcuenca	P [mm]	Ret [mm]	Pi [mm]	ESC [mm]	ETP [mm]	ETR [mm]	Rp [mm]	Qi [m³]
Qda. Alegre	2337.16	281.2	2044.66	11.3	1672.7	1111.45	626.71	1646367.2
Qda. Alegre 1	2337.16	281.2	1509.57	546.38	1672.7	820.44	173.38	120672
Qda. Alegre 2	2337.16	281.2	159.57	546.38	1672.7	820.44	173.38	42305
Qda. El Cedro	2337.16	281.2	1427.34	628.62	1672.7	661.51	40.83	174671
Qda. El Tamagás	2337.16	281.2	1943.84	112.12	1672.7	810.19	408.65	669368.7
Qda. El Paraíso	2337.16	281.2	1921.73	134.22	1672.7	677.05	310.44	441135
Qda. Peña Blanca	2337.16	281.2	2055.75	0.2	1672.7	839.97	490.78	500595.6
Qda. El Divisadero	2337.16	281.2	2055.75	0.2	1672.7	839.97	490.78	181063
Qda. El Cuatro	2337.16	281.2	2055.75	0.2	1672.7	709.95	411.55	745728.6
Qda. Buena Vista	2337.16	281.2	2055.75	0.2	1672.7	839.97	490.78	189932
Qda. Galilea 1	2337.16	281.2	2045.34	10.62	1672.7	837.2	483.14	41550
Qda. Galilea 2	2337.16	281.2	2024.78	31.18	1672.7	969.04	539.98	179273
Qda. Galilea 3	2337.16	281.2	2055.75	0.2	1672.7	839.97	490.78	155577
Cuenca Alta Río Sucio	2337.16	281.2	1962.42	93.53	1672.7	687.04	341.13	5585662.6

Qi: Caudal de agua que se infiltra al subsuelo para recargar a los acuíferos.

En la Tabla 7 se sintetizan los resultados realizados para cada subcuenca de la Cuenca Alta del Río Artiguas, donde se ubica la ciudad de Santo Domingo en el departamento de Chontales.

De la tabla anterior se deduce que en la subcuenca Quebrada Alegre ocurre la mayor recarga anual con 627 mm, equivalente a un volumen de agua subterránea de 1, 646,367 m3. Otras subcuencas con importantes recargas son Quebrada El Tamagás, con un volumen de flujo subterráneo circulante de 669,369 m3; Quebrada Peña Blanca, en cuyo subsuelo circula un volumen de 500,596 m3 y en la Quebrada El Cuatro, con un caudal circulante en el subsuelo de 745,729 m3.

El balance global realizado para la Cuenca Alta del Río Artiguas, refleja un flujo de agua subterránea equivalente a 5,585,663 m3, mientras que la suma de balances de las subcuencas (Qdas. El Cedro, El Tamagás, El Paraíso, Peña Blanca, El Divisadero y El Cuatro), reflejan un aporte de agua subterránea equivalente a 2, 712,562 m3, lo que representa el 48.56 % del volumen total que circula en el subsuelo de la Cuenca Alta del Río Artiguas.

Volumen de recarga por lluvia en el área.

Para asignar un volumen de recarga al acuífero, se debe tomar en cuenta

el área investigada (1.6374x107 m2), por lo tanto, se tiene un volumen de agua recargada de 5, 585,663 m3 por año (Tabla 8).

Tabla 8. Volumen de recarga por lluvia en el área.

Resultado final	Área de investigación [m²]	Volumen agua recargada [m³/año]
	1.6374x10 ⁷	5, 585,663

En la Tabla 9 se muestra el resumen del cálculo de recarga por lluvia en el área. El valor de lluvia corresponde a la suma del promedio mensual estimada en la estación ordinaria Santo Domingo (equivalente a 2337.16 mm), la escorrentía genera 93.53 mm, la retención por plantas es de 281.20 mm y el valor de ETP equivale a 1672.70 mm del total anual calculado. Por lo tanto, el valor de la recarga equivale en un 14.60 % del total de la lluvia caída en un año. El error en las estimaciones es de 2.2 %.

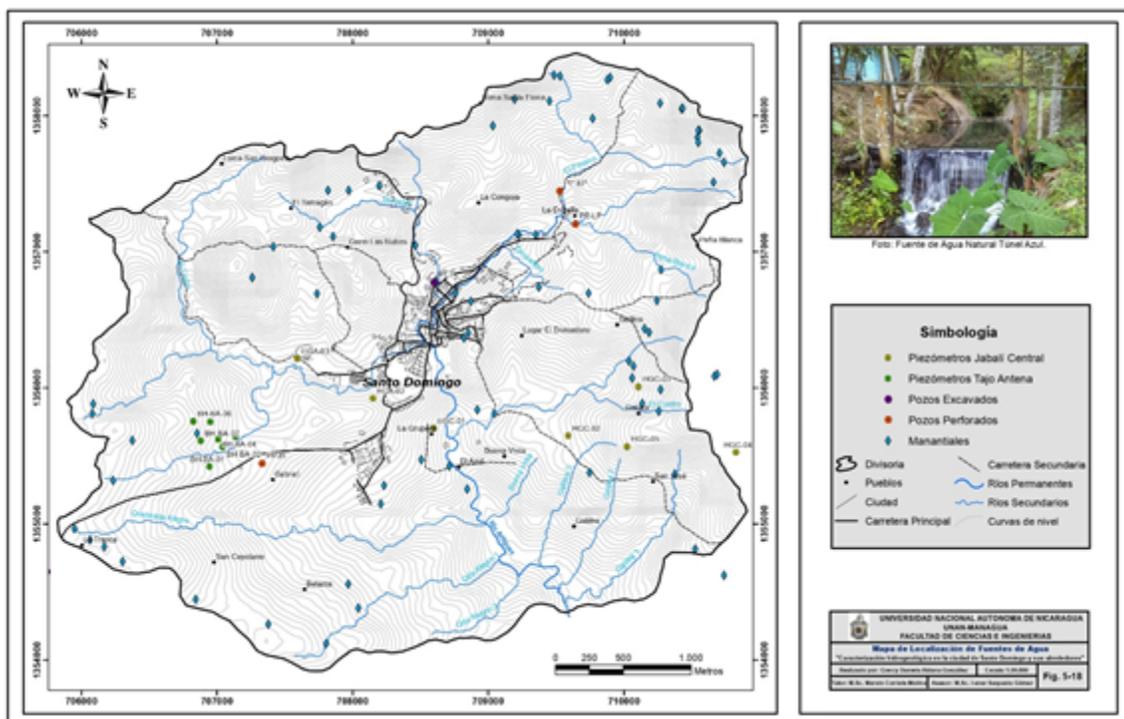


Figura 8. Mapa de Localización de Fuentes de Aguas Inventariadas.

Tabla 9. Resumen de la recarga por lluvia en el área.

Factor	mm / año	Factor	mm / año	Porcentaje
Lluvia	2337.16	ETP	1672.70	71.57
		Escorrentía	93.53	4.00
		Recarga	341.13	14.60
		Retención	281.20	12.03
Total	2337.16	2388.56	102,20	

Calidad del agua.

En los últimos años la investigación hidrogeológica se ha centrado en los problemas de la calidad del agua subterránea. En la mayoría de los casos, no se trata ya de encontrar agua, sino de estudiar cómo la calidad del agua subterránea se ha visto afectada por actividades humanas, prever la evolución del problema, intentar mitigar, o adoptar las medidas pertinentes para que estos problemas no lleguen a producirse.

En este sentido, se evaluó la calidad actual de los recursos hídricos en la Cuenca Alta del Río Artiguas, midiendo en campo y en laboratorio parámetros tales como: conductividad eléctrica (CE), Salinidad, pH, temperatura, turbidez, alcalinidad total, entre otros (Tabla 10).

En resumen y desde el punto de vista fisicoquímico, el agua subterránea en general no presenta contaminación. Sin embargo, es necesario tener en cuenta la turbidez del agua del manantial La Peña, Quebrada Alegre (QA) y Quebrada El Cedro (QEC1) que está por encima de valor máximo permisible (5.00 UNT). Otro parámetro a tomar en cuenta es el hierro total que supera el valor máximo permisible (0.30 mg/l, Norma CAPRE) en el manantial La Peña, Quebrada Alegre, Quebrada El Cuatro y Quebrada El Cedro.

Para la Cuenca Alta del Río Artiguas, básicamente, las aguas superficiales y subterráneas son de tipo bicarbonatada-cálcica (Figura 8). Esto significa que el agua que escurre superficialmente es de corto recorrido y que prácticamente ha tenido contacto con materiales arcillosos. Significa que el agua subterránea es de reciente infiltración con un tiempo de residencia relativamente corto. Además, se infiere que se infiltra preferencialmente por las zonas de fracturas o fallas.

6. CONCLUSIONES

Geológicamente, el área de estudio está representada por rocas volcánicas Terciarias, principalmente andesitas que se encuentran alteradas hidrotermalmente. Estas rocas volcánicas también se encuentran fuertemente fracturadas y meteorizadas generando una capa de suelo arcillosa en la parte superficial con espesor máximo aproximado de 50 metros. Geomorfológicamente, el área se ubica en un ambiente de caldera erosionada con elevaciones que oscilan entre 390 y 760 msnm, con pendientes máximas de 70° y topografía abrupta.

La Cuenca Alta del Río Artiguas está controlada estructuralmente por patrones de fallamiento de direcciones NW-SE, NE-SW y E-W.

Según la clasificación de Horton, se determinó que el Río Artiguas es de

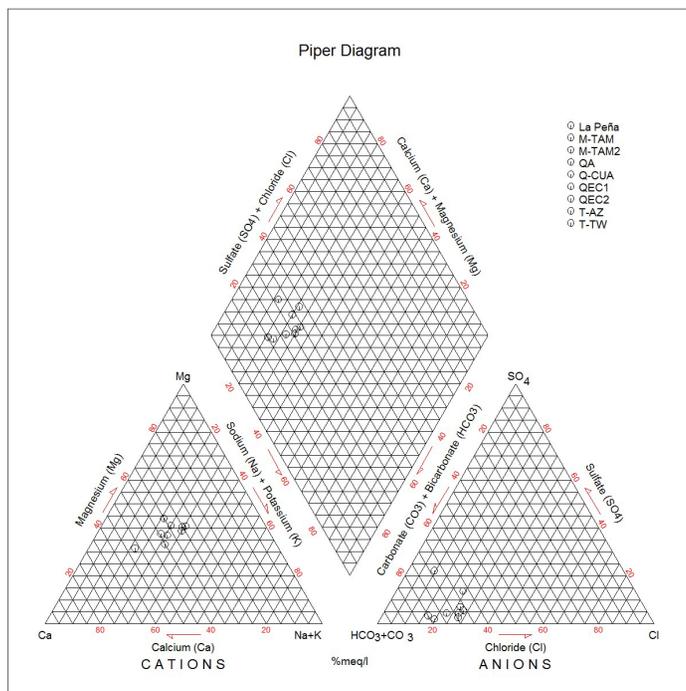


Figura 9. Diagrama de Piper con los resultados del análisis físico-químico.

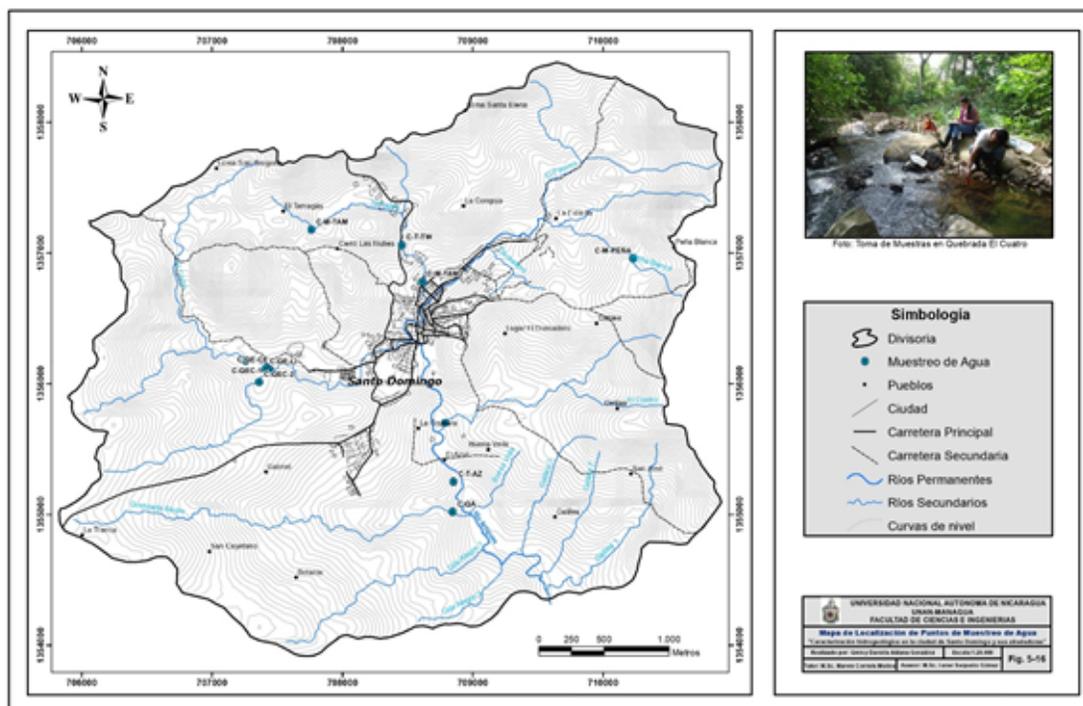


Figura 10. Mapa de Localización de Puntos de Muestreo Hidroquímico.

quinto orden, indicando que es una red de drenaje densa, de respuesta rápida a los eventos lluviosos y con tiempos de concentración relativamente cortos. Para la Cuenca Alta del Río Artiguas, el tiempo de concentración de la escorrentía superficial se estimó en aproximadamente una hora.

Los caudales aforados en las trece (13) subcuencas estudiadas,

variaron desde 0.014 m³/s en la Quebrada El Divisadero, hasta 0.30 m³/s en la Quebrada El Cedro. El caudal de agua superficial que circula en la Cuenca Alta del Río Artiguas alcanza los 1.5 m³/s. Las Quebradas El Cedro, Alegre, Quebrada El Paraíso y Quebrada El Cuatro; son las que aportan la mayor cantidad de agua superficial en el área; representando las mejores fuentes de aprovechamiento de aguas superficiales.

Tabla 10. Parámetros fisicoquímicos y límites permisibles para análisis de agua para consumo humano.

Parámetro	ID										Valor máximo admisible Norma CAPRE
	La Peña	M-TAM	M-TAM2	QA	Q-CUA	QEC1	QEC2	T-AZ	T-TW		
	FUENTE										
	Man.	Man.	Man.	Río	Río	Río	Río	Man.	Man.		
Turbidez	30.80	0.85	0.60	6.90	4.90	30.70	5.10	0.40	1.20	5.00 UNT	
pH	7.17	6.66	6.28	7.78	7.76	7.40	7.34	6.87	6.37	6.50-8.50 UNT pH	
CE	61.60	75.50	99.00	94.50	100.00	66.20	67.00	202.50	99.40	*(30-1000) µS/cm	
STD	38.35	54.15	66.21	62.88	59.72	43.42	44.62	126.19	63.62	1000.00 mg/l	
Color Ver.	20.00	5.00	5.00	15.00	15.00	15.00	15.00	5.00	5.00	15.00 mg/l (Pt-Co)	
Ca	4.23	6.90	7.33	8.94	8.31	4.25	4.88	24.42	8.00	*200 mg/l CaCO ₃	
Mg	2.09	2.11	3.29	3.16	3.75	2.14	2.20	5.47	2.87	50.00 mg/l CaCO ₃	
Na	5.00	5.33	6.48	6.74	5.96	5.38	5.66	9.55	6.31	200.00 mg/l	
K	0.85	1.98	2.11	0.78	1.02	1.38	0.77	2.08	2.16	10.00 mg/l	
Cloruros	4.45	5.30	6.87	5.02	3.74	5.27	5.15	4.60	6.17	250 mg/l	
Nitratos	0.25	0.69	5.96	0.25	1.70	0.25	0.25	2.50	1.18	50 mg/l	
Sulfatos	1.67	1.76	3.29	1.14	1.39	1.77	0.86	19.79	6.41	250.00 mg/l	
Carbonatos	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	*1.00 mg/l	
Bicarbonatos	25.63	41.49	41.49	50.04	46.38	28.07	30.51	89.09	37.22	*150 mg/l	
Dureza Total	19.15	25.92	31.85	35.30	36.20	19.40	21.25	83.45	31.76	*400 mg/l CaCO ₃	
Alcalinidad T.	21.00	34.00	34.00	41.00	38.00	23.00	25.00	73.00	30.50	*150 mg/l	
Alcalinidad F.	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	Sin ref. (mg/l)	
Silice R.D.	15.96	20.71	22.42	26.74	23.64	20.17	21.60	29.90	26.14	Sin ref. (mg/l)	
Nitritos	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.10-3.00 mg/l	
Hierro Total	2.61	0.07	0.04	0.64	0.55	2.10	0.37	0.06	0.11	0.30 mg/l	
Fluoruros	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.70-1.50 mg/l	
As [µ/l]	0.99	0.99	0.99					0.99	0.99	*10.00 µg/l ⁻¹ (OMS)	
Hg [µ/l]	0.09	0.09	0.09					0.09	0.09	*1.00 µg/l ⁻¹ (OMS)	

De acuerdo a los resultados obtenidos para calidad de agua, el agua está clasificada esencialmente como bicarbonatada-cálcica, indicando que el agua subterránea que circula en la cuenca en estudio es de reciente infiltración y no recibe aporte de otras cuencas vecinas.

Las concentraciones de fluoruro, arsénico y mercurio son menores al valor máximo admisible según algunas normas (O.M.S. 1995 y CAPRE), indicando la no conexión hidráulica entre los flujos superficiales de agua y las aguas subterráneas. Las concentraciones de hierro total superan el valor máximo admisible (0.30 mg/l, según CAPRE, 1993), en el manantial La Peña y las quebradas Alegre, El Cuatro y El Cedro. Estas concentraciones son producto de la descomposición de la andesita por la acción hidrotermal.

Se realizaron 13 balances hídricos correspondientes a las subcuencas que conforman la Cuenca Alta del Río Artiguas para conocer la cantidad de agua recargada, los sectores de recarga y los meses o periodos de mayor recarga. Se deduce que la recarga a los acuíferos se origina en la parte alta de la cuenca, a través del medio poroso superficial donde se encuentra el acuífero detrítico arcilloso arenoso y a través del intenso fracturamiento característico de la zona.

Se consideran como alternativas de abastecimiento de agua a la población urbana de Santo Domingo, las fuentes superficiales de Quebrada Alegre, El Cedro y el Paraíso.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al IGG-CIGEO/UNAN-Managua, por su apoyo al incluir esta investigación dentro del Proyecto BIOREM (Biorremediación de sitios contaminados) ejecutado por el Instituto de Geología y Geofísica (IGG-CIGEO) y el Departamento de Biotecnología de la UNAN-Managua, con el apoyo de la Cooperación Austríaca en el programa APPEAR. A la Municipalidad de Santo Domingo, Chontales.

REFERENCIAS

- Andre, L., Rosen, K. & Torstendahl, J., (1997). Minor field study of mercury and lead pollution from gold refining in central Nicaragua. Luleå University of Technology, Sweden.
- Aronsson, M. & Wallner, C., (2002). Inventory of springs and hydrochemical investigations of groundwater in the drainage basin of Sucio river, Nicaragua. Lund University, Sweden.
- ASTM, (2008). D 3385. Guía estándar para la determinación de la caracterización de la rata de infiltración de agua en el terreno empleando infiltrómetros de anillo doble.
- B2GOLD-DESMINIC S.A., (2012). Línea Base Santo Domingo-Chontales, Nicaragua. Tomo I.
- Carranza, G. & Ginet, C., (1987). Prospección geoquímica regional. Región Central de Nicaragua, Boaco-Rama. INMINE/SGAB/ASDI.
- Darce, M., (1987). Geología del distrito minero La Libertad, Nicaragua. Revista Geológica de América Central.
- Darce, M., (1989). Mineralogical alteration patterns, chemical mobility and origin of the La Libertad gold deposits, Nicaragua. Ph.D. Thesis, University Stockholm, Sweden.
- Ehrenborg, J., (1996). Una Nueva Estratigrafía de Rocas Volcánicas Terciarias en la Región Central de Nicaragua. Investigación científica en Nicaragua. Proyecto conjunto Suecia-Nicaragua. Luleå.
- Espinoza, L. & Espinoza, T., (2005). Impacto de la minería en la calidad del agua en la Microcuenca del Río Artiguas. Énfasis en metales pesados. Tesis, Universidad Centroamericana. UCA.
- Grunander, K. & Nordenberg, E., (2004). Investigation of Groundwater-Surface Water Interaction in the Drainage Basin of the River Sucio, Nicaragua. Lund University, Sweden.
- Hodgson, G., (2000). Geología Regional: Introducción al Léxico Estratigráfico de Nicaragua.
- Horton, R.E. Erosional Development o/ Streams, Geo. Soc, Am. Bul., vol. 56, pp. 281-283, (1945).
- IAEA, (1980). Uranium evaluation and mining techniques, STI/PUB/524.
- IGG-CIGEO, 2015. Estudio Hidrogeológico y Balance Hídrico en la Cuenca Alta del Río Artiguas en Santo Domingo, Chontales.
- INETER-COSUDE, (2004). Estudio de Mapificación Hidrogeológica e Hidrogeoquímica de la Región Central de Nicaragua.
- MARENA/INFOM/CIRA/UNAN-Managua/Alcaldías de La Libertad, Santo Domingo, San Pedro de Lovago, Santo Tomas y Villa Sandino., diciembre (2006). Diagnóstico ambiental de la SubCuenca Alta de los ríos Siquia y Mico.
- Martínez-Alfaro, (2006). Fundamentos de Hidrogeología, Ediciones Paraninfo S.A. ISBN 13: 9788484762393 e ISBN 10: 8484762394.
- McBirney, Alexander R. and Howel Williams, (1965). Volcanic History of Nicaragua Volumen 55. University of California publications in geological sciences, Calif University of California Berkeley.
- Mendoza, A., (2002). Geophysical and hydrogeological investigations in the Río Sucio watershed, Nicaragua. Lund University, Sweden.
- Mendoza, A., (2006). Groundwater occurrence and risk of pollution in a mountain watershed of Nicaragua. Lund University, Sweden.
- Parsons Corporation Report., (1972). The geology of western Nicaragua, Final Tech. Rept., 4, Nicaragua Tax Improvement and Natural Resources Inventory Project, Managua, Nicaragua.
- Picado, F., (2008). Fluvial transport and risk of mercury in a gold mining area. Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos (CIRA).
- Romero, F., (1996). Contaminación de Hg y Pb en fuentes de agua, área de Santo Domingo, Chontales. Centro de Investigaciones Geocientíficas, Managua.
- Rodríguez, D., (1998). Mineral deposits and metalogenic provinces in Nicaragua. En: Elming, S., Widenfalk, L., & Rodríguez, D., 1998. Investigación Científica en Nicaragua. Proyecto Conjunto Suecia-Nicaragua. Lulea.
- Silva, G., (1994). Diagnóstico decontaminación ambiental generada por la actividad minera sobre los ríos Sucio, Mico y Sinecapa, Nicaragua. Universidad Federal de Brasil.
- Sánchez, M., (2004). Estudio Geológico de la parte Norte de la Sub-Cuenca del Río Sucio, Santo Domingo, Chontales. Tesis, UNAN-Managua.
- Troéng, B., (1987). Structural interpretation of La Libertad área. INMINE/SGAB/ASDI.
- http://www.inifom.gob.ni/municipios/documentos/CHONTALES/sto_domingo.pdf