

Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra

Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra
Guatemalan Journal of Earth Sciences

Volumen/Volume 5

año 2018

Número/Issue 1



Revista anual de la Carrera de Geología de la Universidad de San Carlos de Guatemala

ISSN 2410-728X



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala



Volumen 5

Número 1

Año 2018

Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra

Revista anual de la Carrera de Geología de la Universidad de San Carlos de Guatemala

Sumario / Contents

- Modelación hidrológica del escurrimiento base en el cauce principal de la cuenca hidrográfica del río Chixoy, Guatemala. *Hydrological modeling of base runoff in the main cauce of the hydrographic basin of the Chixoy River, Guatemala.* J.C. Fuentes, R.W. Figueroa 3
- The Sierra de Santa Cruz in Eastern Guatemala: A giant gravity slide triggered by the K-Pg Chixulub bolide impact.* La Sierra de Santa Cruz de Guatemala oriental: Un gigantesco deslizamiento gravitacional provocado por el impacto del bólido K-Pg Chixulub. J.H. Rosenfeld 9
- Acuíferos: Diseño y análisis de pruebas escalonadas de bombeo. *Aquifers: Design and analysis of step-drawdown pump tests.* R. Machorro 14
- Cartografía de zonas de inundación, evento O-56 y tormenta tropical Nate, en Cobán, Alta Verapaz, Guatemala. *Cartography of flooding zones, event O-56 and Nate tropical storm, in Cobán, Alta Verapaz, Guatemala.* S. Morán, J. Requena, F. Monterroso, O.J. Vásquez, L. Laj 20
- Caracterización litológica de la secuencia Palo Amontonado, El Progreso, Guatemala. *Lithological characterization of Palo Amontonado sequence, El Progreso, Guatemala.* K. Chun, S. Morán 32
- Caracterización hidrogeológica y calidad del agua para abastecimiento a comunidades rurales ubicadas en la microcuenca del río Mapachá, Boaco, Nicaragua. *Hydrogeological characterization and water quality for supply of rural communities located in the Mapachá River micro-basin, Boaco, Nicaragua.* R. Izabá-Ruiz 42

**Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra,
*Guatemalan Journal of Earth Sciences***
vol. 5, núm. / Issue 1, año 2018
ISSN 2410-728X

Equipo Editorial / *Editorial Board:*
Osmín Jared Vásquez Hernández
Sergio David Morán Ical
César Fernando Monterroso Rey
Julio Fernando Avendaño Castro

Portada: Formación Subinal sobre la carretera CA-9 Norte, Guatemala
Cover: Subinal Formation on the CA-9 North highway, Guatemala
Fotografía/*Photo: Marlon Isaac Macz*

MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL ESCURRIMIENTO BASE EN EL CAUCE PRINCIPAL DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO CHIXOY, GUATEMALA

HYDROLOGICAL MODELING OF BASE RUNOFF IN THE MAIN CAUCE OF THE HYDROGRAPHIC BASIN OF THE CHIXOY RIVER, GUATEMALA

Juan Carlos Fuentes Montepeque

Instituto Nacional de Electrificación

7.ª avenida 2-29, zona 9, ciudad de Guatemala, Guatemala

jfuentes@inde.gob.gt

Rolando Wladimir Figueroa Rodríguez

Instituto Nacional de Electrificación

7.ª avenida 2-29, zona 9, ciudad de Guatemala, Guatemala

RESUMEN

La recesión o agotamiento es de relevancia en el régimen del escurrimiento superficial, debido a que la misma es producto del fenómeno de persistencia y de los procesos de lluvia-escurrimiento en la cuenca. Debido a la relevancia del aprovechamiento de los recursos hidráulicos en la cuenca hidrográfica del río Chixoy para generación energética, se aplicaron algoritmos de modelación del escurrimiento base, con el objetivo de estimar el comportamiento del régimen hidrológico en la época de estiaje y el efecto del fenómeno de persistencia. En la cuenca se dispone de una red de monitoreo meteorológico e hidrométrico aceptable, que se ve reflejada en la calidad estadística de las series temporales generadas. Los modelos aplicados fueron estadísticos y determinísticos, para la evaluación de la red de monitoreo, las propiedades estadísticas de la serie temporal de caudal medio en el cauce principal del río Chixoy, las curvas de recesión y el régimen del escurrimiento base. Las propiedades de la serie temporal en análisis muestran que la serie es independiente, homogénea y consistente. Además, al realizar el análisis de variabilidad se evidencia que la misma se comporta de acuerdo con la distribución normal, sin presencia significativa de valores anómalos. Para la estimación de las curvas de recesión se estimaron las series temporales de caudal diario mínimo en 1 día y en 60 días consecutivos, las mismas fueron trazadas en papel a escala probabilística Gumbel mediante la aplicación de modelo de distribución de valor extremo tipo III, conocido como Weibull. El comportamiento estimado en ambas series es estadísticamente similar. Las series modeladas para los años extremos son satisfactorias según los indicadores de suficiencia. Los algoritmos aplicados pueden irse afinando con la incorporación de otras variables, lo cual será de utilidad para planificar el aprovechamiento de los recursos hidráulicos en la etapa final del año hidrológico.

Palabras clave: recesión, período de retorno, persistencia, variabilidad, módulo hidrológico.

ABSTRACT

The recession or exhaustion is of relevance in the regime of surface runoff, due to it is the same product of the persistence phenomenon and the rain-runoff processes in the basin. Due to the relevance of the use of hydraulic resources in the Chixoy river basin for energy generation, base runoff modeling algorithms were applied, with the objective of estimating the behavior of the hydrological regime in the dry season and the effect of the persistence. In the basin there is an acceptable meteorological and hydrometric monitoring network, which is reflected in the statistical quality of the generated time series. The models applied were statistical and deterministic, for the evaluation of the monitoring network, the statistical properties of the time series of medium flow in the main channel of the Chixoy river, recession curves and the base runoff regime. The properties of the time series in analysis show that the series are independent, homogeneous and consistent. In addition, when performing the analysis of variability, it is evident that it behaves according to the normal distribution, without significant presence of anomalous values. For the estimation of the recession curves, the time series of minimum daily flow in 1 day and in 60 consecutive days were estimated, they were plotted on Gumbel probabilistic scale paper by applying the type III extreme value distribution model, known Like Weibull. The estimated behavior in both series is statistically similar. The series modeled for the extreme years are satisfactory in accordance with the indicators of sufficiency. The applied algorithms can be fine-tuned with the incorporation of other variables, which will be useful for planning the use of water resources in the final stage of the hydrological year.

Key words: recession, return period, persistence, variability, hydrological module.

Introducción

La cuenca hidrográfica del río Chixoy se identifica con el numeral 3.7 de acuerdo con el Atlas Hidrológico de la República de Guatemala (INSIVUMEH, 2005). Esta cuenca drena hacia la vertiente del golfo de México. El área de estudio comprende la parte alta de la cuenca, con un área de drenaje de 3,500 km², hasta el sitio donde se ubica la estación hidrométrica (tipo limnigráfica) El Cebollal, sobre el cauce principal del río Chixoy. Esta región comprende el 65 % del área de captación hacia el embalse de regulación anual de la planta hidroeléctrica Chixoy, en donde se estima un aporte hidrológico de al menos el 80 % hacia dicho embalse.

La estación hidrométrica El Cebollal, ubicada sobre el cauce principal del río Chixoy a una altitud de 820 metros sobre el nivel del mar, posee registros continuos desde el año hidrológico 1983-1984 y pertenece a la red nacional de estaciones del Instituto Nacional de Electrificación. En esta estación se genera la serie temporal de caudales medios diarios, la cual se caracteriza por su calidad, en cuanto a sus propiedades, tales como completación, homogeneidad, independencia y consistencia, principalmente, con una longitud que supera los 30 años. La red de monitoreo hasta esta estación está compuesta por 13 estaciones meteorológicas y 5 estaciones hidrométricas, las cuales poseen registros longevos, en promedio mayores a 30 años. El régimen hidrológico define la época seca de noviembre a abril y la época lluviosa de mayo a octubre, con descenso considerable de lluvias durante los meses de julio y agosto debido a la ocurrencia del fenómeno conocido como canícula. El módulo pluviométrico medio supera ligeramente los 1,000 milímetros, mientras que el caudal específico medio anual se estima en 12.2 l/s/km². Con base a estas variables, la cuenca delimitada hasta este sitio se clasifica como de mediana disponibilidad de recursos hidráulicos superficiales, inferior al promedio a nivel nacional.

Los objetivos se centraron en el análisis de la red de monitoreo, la variabilidad de las series, las curvas de

agotamiento, para evaluar en consecuencia el comportamiento del escurrimiento base, en el que se seleccionaron los 2 años hidrológicos extremos observados en la serie temporal.

Metodología

La etapa de campo consistió en la evaluación del comportamiento del escurrimiento superficial de manera continua. Cabe mencionar que esta evaluación se realiza de manera ininterrumpida durante todo el año hidrológico. Posteriormente, la etapa de gabinete consistió en la caracterización de la cuenca hidrográfica y la recopilación de la serie temporal de caudales medios diarios de la estación hidrométrica El Cebollal. La etapa de gabinete incluye la aplicación de modelos estadísticos, tanto a series observadas como a la generada.

El análisis inicial de la serie temporal comprende el cálculo de la consistencia, independencia y homogeneidad. La consistencia se evalúa mediante el análisis doblemente másico, considerando la serie mensual. Para estimar la independencia se aplica la prueba de Anderson, mientras que para estimar la homogeneidad se aplican las pruebas t de Student y de Cramer, descritas por Escalante & Reyes (2005), a un nivel de confianza del 95 %. La variabilidad se evaluó en las series de caudal medio anual (módulo hidrológico) y caudal medio diario mínimo en 1 día (Q_{1D}), al aplicar la metodología propuesta por Chow (1994), consistente en el trazo de intervalos de confianza (al 95 %) conjuntamente con las series temporales en papel a escala probabilística normal, el cual se trazó de acuerdo con lo descrito por Hann (1994).

La tendencia del escurrimiento base fue evaluado mediante la estimación de las curvas de agotamiento, para lo cual se seleccionaron las series temporales de caudal diario mínimo en 1 día (Q_{1D}) y caudal diario mínimo en 60 días consecutivos (Q_{60D}). Estas series fueron trazadas en papel a escala probabilística Gumbel conjuntamente con el modelo de distribución de valor extremo tipo III, conocido como Weibull, para lo cual previamente se realizó la

transformación logarítmica de la serie. El papel a escala probabilística Gumbel fue trazado de acuerdo con metodología descrita por Hosking & Wallis (2005). Para complementar la evaluación del modelo de Weibull, en ambas series se plotearon los intervalos de confianza (95 %), siguiendo el algoritmo descrito por Mejía (2012).

Para la modelación del comportamiento del escurrimiento base se seleccionaron los años hidrológicos 2010-2011 y 2016-2017, siendo el de mayor y menor módulo hidrológico observado en la serie temporal, respectivamente. El período de modelación comprendió desde el 15 de noviembre hasta el 15 de abril. La primera serie modelada del escurrimiento superficial fue generada mediante la aplicación del algoritmo de un parámetro basado en curva de recesión, desarrollado por Gómez (2014). Posteriormente, una segunda serie fue generada mediante una función que introduce un parámetro de perturbación, que simula el fenómeno de persistencia. Para evaluar la eficiencia en la modelación para ambos años hidrológicos, se aplicaron algunos indicadores, tales como: coeficiente de correlación (r), coeficiente de determinación (r^2), criterio de Nash-Sutcliffe, error cuadrático y balance de masa, recomendados por Suárez (2017).

Resultados y discusión

Evaluación hidrometeorológica de la red de monitoreo

En la figura 1 se muestran las curvas de error y densidad asociadas a la red de estaciones existentes en el área de influencia. Como se mencionó, actualmente se dispone de una red compuesta por al menos 13 estaciones meteorológicas, con las cuales se obtiene un error menor al 10 % y densidad de 270 km²/estación, valores que están dentro de los rangos recomendados por la Organización Meteorológica Mundial para regiones con características similares a las de la cuenca hidrográfica del río Chixoy. En lo que respecta al monitoreo hidrométrico, se dispone de una red compuesta por 5 estaciones, de las cuales 2 están instaladas sobre el cauce principal del río Chixoy y cuentan

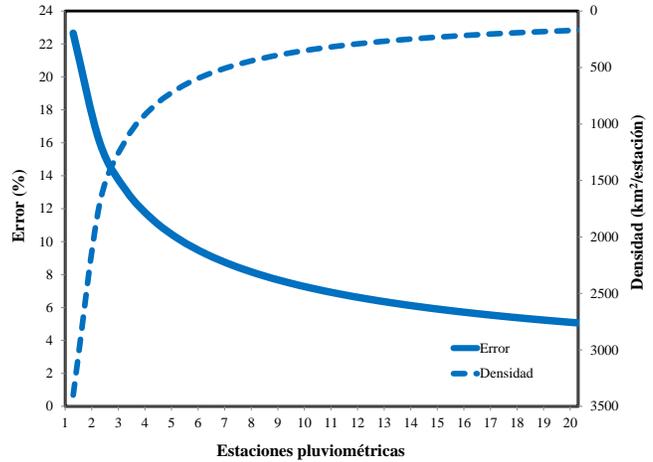


Figura 1. Error y densidad asociada a la actual red de monitoreo meteorológico.

con registro continuo (limnigráfico) que supera los 30 años de longitud.

Propiedades de las series y variabilidad

Las pruebas estadísticas denotan que la serie temporal en estudio es consistente, independiente y homogénea. En las figuras 2 y 3, se muestra la variabilidad de las series: módulo hidrológico y caudal medio diario mínimo anual.

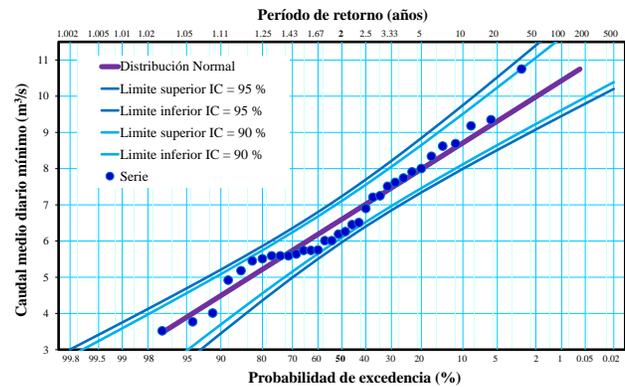


Figura 2. Variabilidad de la serie de caudales medios anuales.

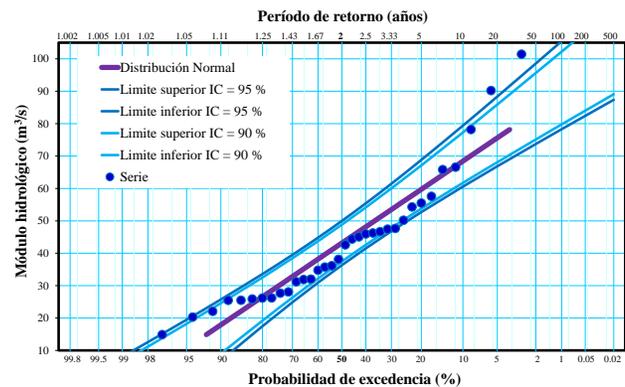


Figura 3. Variabilidad de la serie de caudales mínimos.

La calidad de la serie temporal, verificada en sus propiedades estadísticas, es un reflejo de la operación y mantenimiento que actualmente se realiza en la estación hidrométrica. Esto es un reflejo de la importancia que la misma tiene en la red de monitoreo. Al analizar la variabilidad de las series, en ambas se encuentra dentro del intervalo de confianza y se ajusta a la distribución normal, siendo ligeramente mayor para el caso de la serie temporal del módulo hidrológico. Un comportamiento que no se ajuste a la distribución normal en series anuales denota alteración o anomalías en las mismas.

Curvas de recesión

En la figura 4 se muestra el comportamiento de los años hidrológicos 2010-2011 y 2016-2017, siendo los años extremos en la serie.

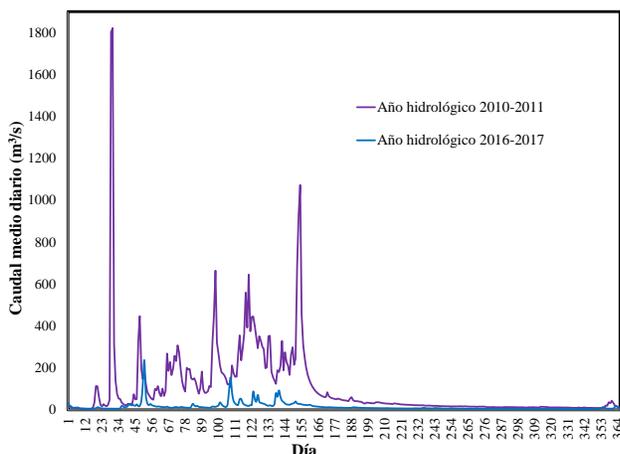


Figura 4. Comportamiento de los años hidrológicos 2010-2011 y 2016-2017.

El módulo hidrológico para el año hidrológico 2010-2011 fue de 102 m³/s, caracterizado por la ocurrencia de la tormenta tropical Agatha a principios del año hidrológico. Para el caso del año hidrológico 2016-2017 el módulo hidrológico fue 15 m³/s, debido a los efectos globales ocasionados por el fenómeno de El Niño. Cabe resaltar que en el caso del año hidrológico 2016-2017, influyó además el fenómeno de persistencia, debido al déficit de lluvias suscitado el año anterior. La diferencia en volumen entre ambos años supera los 2,700 hm³, debido a

la variabilidad climática, fenómenos globales y a la dinámica de los procesos lluvia-escurrimiento en la cuenca.

Las curvas de recesión para las series de caudal mínimo en 1 día y caudal mínimo en 60 días consecutivos son mostradas en la figura 5.

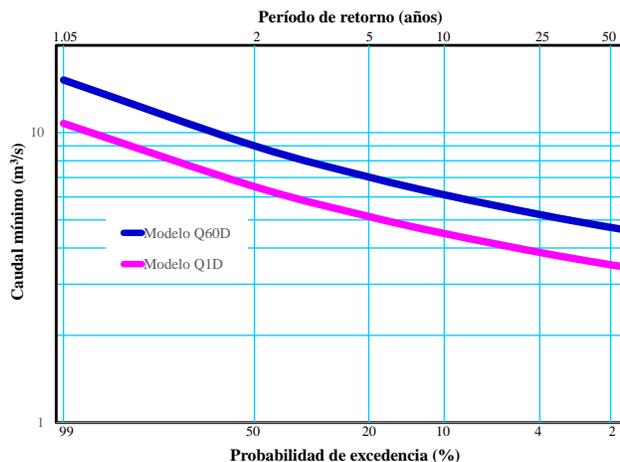


Figura 5. Curvas de recesión para series de caudales mínimos.

Al analizar la tendencia se denota que no existen diferencias significativas entre ambas series, para períodos de retorno comprendidos entre 1.05 y 50 años. El caudal disminuye 7.6 m³/s para la serie diaria, mientras que para la serie de 60 días consecutivos disminuye 10.9 m³/s, el porcentaje de disminución en ambas series se estima en 70 %. La uniformidad en ambas series se debe a la calidad de los datos y variabilidad aceptable en la misma, en donde no existe presencia de valores anómalos o fuera de serie.

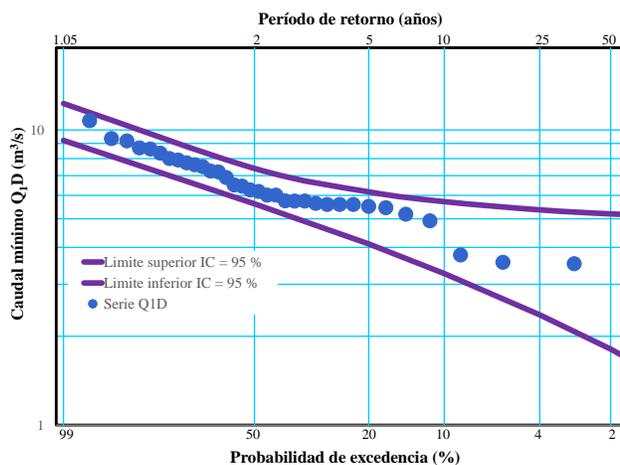


Figura 6. Intervalos de confianza para la serie de caudales mínimos.

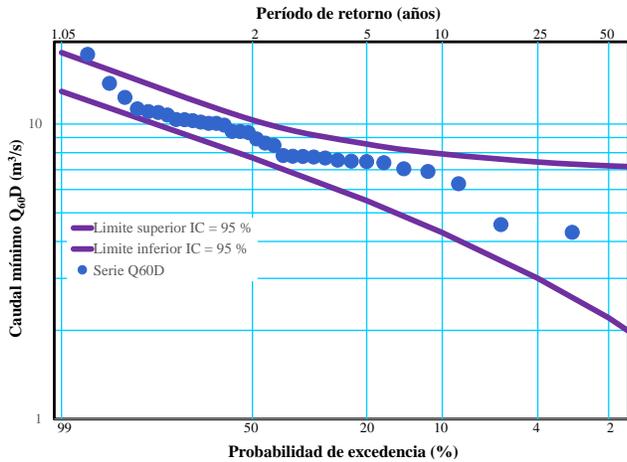


Figura 7. Intervalos de confianza para la serie de caudales mínimos en 60 días consecutivos.

El trazo de intervalos de confianza a ambas series, mostrados en las figuras 6 y 7, confirma que no existen anomalías en las mismas. Se observa para el caso de la serie de caudales mínimos en 60 días consecutivos, que un valor se encuentra fuera de los intervalos de confianza, lo cual no posee significancia estadística.

Modelación hidrológica

Las series generadas de la modelación son mostradas en la figura 8.

Las series de caudales medios diarios generadas mediante la aplicación del algoritmo de un parámetro basado en curva de recesión son equivalentes a la tendencia

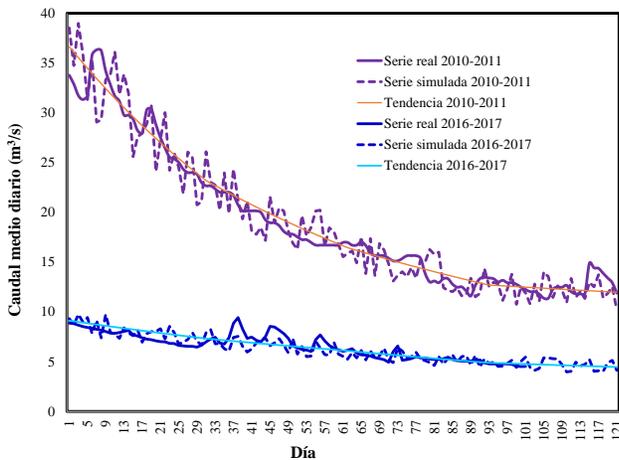


Figura 8. Modelación hidrológica del escurrimiento base en la cuenca hidrográfica del río Chixoy.

de las mismas. La pendiente de la tendencia es mayor para la serie del año hidrológico 2010-2011, donde se reflejó el efecto de la percolación profunda, producto del acumulado de lluvias durante ese año. Cabe resaltar que este año hidrológico es el de mayor módulo pluviométrico durante el tiempo de registro de la red de monitoreo meteorológico (superior a 30 años). Para la época de estiaje seleccionada, el escurrimiento base se agota entre el intervalo de 36 a 12 m³/s.

El agotamiento del escurrimiento base para el año hidrológico más deficitario osciló entre los 9 y los 4.5 m³/s. Los gradientes para ambos años, húmedo y deficitario, oscilan entre 200 y 40 l/s/d, respectivamente. El parámetro de perturbación que simula el fenómeno de persistencia con mejores resultados se encuentra entre 0.95 y 0.85, para los años hidrológicos 2010-2011 y 2016-2017, respectivamente. En el cuadro 1 se muestran los indicadores de suficiencia deducidos de las series modeladas.

Por tratarse de modelación de eventos mínimos, los indicadores de suficiencia son satisfactorios en ambos casos. Por poseer eventos de mayor magnitud, el error cuadrático es mayor para la serie 2010-2011, mientras que el balance de masa es casi perfecto para la serie 2016-2017, debido a que este indicador es específico para evaluar el volumen del hidrograma generado.

Cuadro 1. Indicadores de suficiencia de las series modeladas. Fuente: Elaboración propia (2018).

Indicador	Año hidrológico	
	Húmedo	Deficitario
Coefficiente de Pearson	0.97	0.92
Coefficiente r ²	0.94	0.85
Nash-Sufcliffe	0.90	0.71
Nash-Sufcliffe ln	0.90	0.74
Error cuadrático	2.15	0.76
Balance de masa	0.27	0.02

Conclusiones

1. La red de monitoreo meteorológico e hidrométrico en la cuenca hidrográfica del río Chixoy se considera adecuada de acuerdo con los aspectos evaluados.
2. Los modelos hidrológicos para evaluación de caudales mínimos proveen tendencias y patrones en el comportamiento de las series, lo cual podrá afinarse al introducir otras variables de interés.
3. La modelación del escurrimiento base será de mayor utilidad para proyectar las condiciones finales de la época de estiaje para su posterior planificación en el aprovechamiento de los recursos hidráulicos para generación energética.
4. Los efectos de la variabilidad climática en la cuenca hidrográfica del río Chixoy han sido mayores en los eventos extremos.

Agradecimientos

Al personal técnico y administrativo del Departamento de Hidrología del INDE, por su dedicación, pasión y motivación para desarrollar y engrandecer la hidrología a nivel nacional. Al Lic. Tito Fernando Quiñónez y al Ing. David Estuardo Marroquin, por sus valiosos aportes a la revisión final de este estudio de caso.

Referencias bibliográficas

- Chow, V.; Maidment, D. (1994). *Hidrología aplicada*. Colombia: McGraw-Hill.
- Escalante, C.; Reyes, L. (2005). *Técnicas estadísticas en Hidrología*. México: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Fattorelli, S., & Fernández, C. (2011). *Diseño hidrológico*. Water Assessment & Advisory Global Network.
- Gómez, S. (2014). *Aguas subterráneas en zonas de montaña y trazadores ambientales*. Colombia: Universidad Industrial de Santander.

Hann, C. (1994). *Statistical methods in hydrology*. Iowa: Press.

Hosking, J.; Wallis, J. (2005). *Regional frequency analysis*. Cambridge: Press.

Instituto Nacional de Electrificación. (2018). *Serie temporal de caudal medio diario de estación hidrométrica El Cebollal*. Guatemala: Departamento de Hidrología, Superintendencia de Operación y Mantenimiento.

Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. (2005). *Atlas hidrológico de la República de Guatemala*. Guatemala: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.

Mejía, J. (2012). *Hidrología aplicada*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.

Suárez, W. (2017). *Calibración de un modelo hidrológico*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.

THE SIERRA DE SANTA CRUZ IN EASTERN GUATEMALA; A GIANT GRAVITY SLIDE TRIGGERED BY THE K-Pg CHICXULUB BOLIDE IMPACT

LA SIERRA DE SANTA CRUZ DE GUATEMALA ORIENTAL; UN GIGANTESCO DESLIZAMIENTO GRAVITACIONAL PROVOCADO POR EL IMPACTO DEL BOLIDE K-Pg CHICXULUB

Joshua H. Rosenfeld

Independent Geologist, Granbury, Texas, U.S.A.

ABSTRACT

The Sierra de Santa Cruz (SSC) in eastern Guatemala is a Proto-Caribbean ophiolite allochthon that was obducted onto the Maya (Yucatan) block during Late Cretaceous collision with the Chortis block. The SCC massif is about 90 km long, 15 km wide and is an estimated 2 km thick, with an approximate present-day volume of 2,700 km³. It was probably larger at the time of emplacement, having since undergone erosion and eastward displacement of its southern continuation across the Caribbean-North American strike-slip plate boundary.

The SSC directly overlies non-metamorphosed Upper Cretaceous terrigenous flysch of the Sepur Formation deposited in a foredeep north of the suture zone. This contrasts with other ophiolite bodies in Guatemala that are in contact with either metamorphic rocks or shallow water Cretaceous carbonates within the Maya-Chortis suture zone. Abundant ophiolitic detritus in the Sepur Fm. flysch attests to subaerial exposure of the allochthon prior to its final emplacement into the foredeep.

Although gravity emplacement of the SSC allochthon had been proposed (Wilson, 1974; Rosenfeld, 1981), the trigger required to initiate such a large mass movement was not recognized. Emplacement of the allochthon from the elevated suture zone into the Sepur foredeep basin 600 kms south of the Chicxulub bolide impact site is herein proposed to have been triggered by impact-induced seismicity.

Key words: allochthon, chicxulub, gravity slide.

RESUMEN

La Sierra de Santa Cruz (SSC) del oriente de Guatemala es una ofiolita alóctona proto-caribeña que fue obducida sobre el Bloque Maya (Yucatán) durante la colisión con el Bloque Chortis en el Cretácico Tardío. El macizo del SCC tiene alrededor de 90 km de largo, el ancho promedio de 15 km y un espesor estimado de 2 km, con volumen aproximado de 2,700 km³. Es probable que haya sido más grande al momento del emplazamiento, habiendo posteriormente sufrido erosión y la amputación de su continuación al sur a través de la zona transcurrente entre las placas Caribe y Norteamérica.

La SSC directamente sobreyace en un flysch terrígeno, no metamorizado de la Formación Sepur depositado en una antefosa al norte de la zona de sutura. En esto contrasta con los demás cuerpos ofiolíticos de Guatemala que se encuentran en contacto con rocas metamórficas o carbonatadas en la zona de sutura Maya-Chortis. Abundantes clastos ofiolíticos del flysch Sepur evidencian la exposición subaérea del bloque alóctono antes de su emplazamiento final en la antefosa.

Aunque el emplazamiento final por gravedad ha sido propuesto con anterioridad (Wilson, 1974; Rosenfeld, 1981), el mecanismo que inició este movimiento en masa no fue reconocido. Este trabajo propone que el emplazamiento del bloque alóctono desde la elevada zona de sutura hacia la antefosa Sepur, 600 km al sur del impacto K-Pg de Chicxulub resultó de sismicidad inducida por el impacto del bólido.

Palabras clave: alocton, chicxulub, deslizamiento por gravedad

Introduction

The K-Pg Chicxulub bolide struck near the northern margin of the extensive Yucatan carbonate platform (Figure 1).

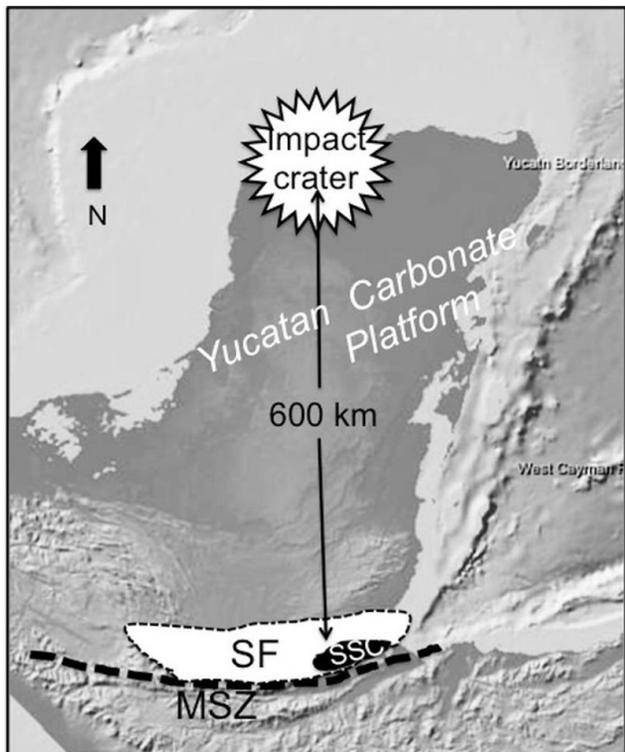


Figure 1. Location map showing the Chicxulub bolide impact site on the Yucatan carbonate platform. SF = Sepur Foredeep, MSZ = Motagua Suture Zone, SSC = Sierra de Santa Cruz.

Impact-induced seismicity caused massive subaqueous collapse of the platform’s steep margins into the adjacent deep basins of the Gulf of Mexico (Grajales *et al*, 2009; Paull *et al*, 2014), and Proto-Caribbean Sea (Kiyokawa *et al*, 1999). The nearest significant subaerial topography to the impact site was approximately 600 km to the south in the Motagua Suture Zone (Figure 2) where the Chortis and Maya (Yucatan) blocks were actively undergoing transpressional collision (Pindell and Kennen, 2009).

Uplift and erosion of the suture zone is recorded by at least 3 km. of Upper Cretaceous terrigenous flysch (Rosenfeld, 1981) in the foredeep on the subsiding southern margin of the Yucatán carbonate platform (Figure 1). This flysch contains abundant ophiolitic detritus (mainly

serpentinite), as well as volcanic and shallow water carbonate clasts. Soft-sediment deformational structures clearly indicate that the flysch was deposited on a north-facing paleoslope.

Evidence for a gravity slide

The SSG lies immediately north of the Polochic Fault segment of the active North American-Caribbean plate boundary (Figure 3).

In contrast with the other ophiolitic bodies found in the suture zone, the Santa Cruz ophiolite was not metamorphosed either during or after obduction. The

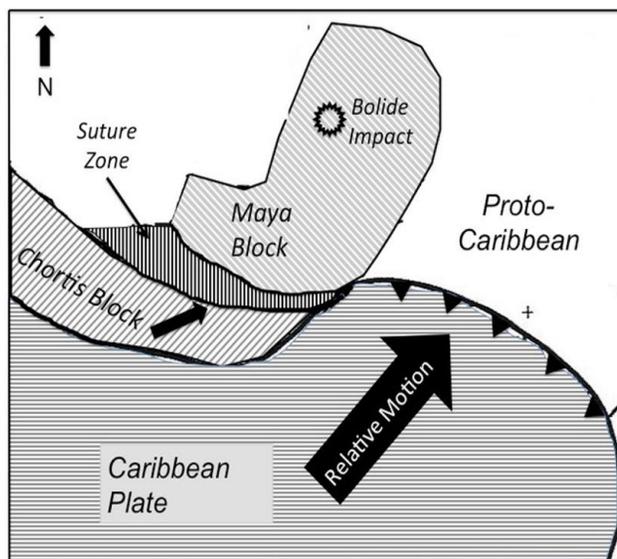


Figure 2. Late Cretaceous tectonic elements referred to in the text. Adapted from Pindell and Kennen, 2009.

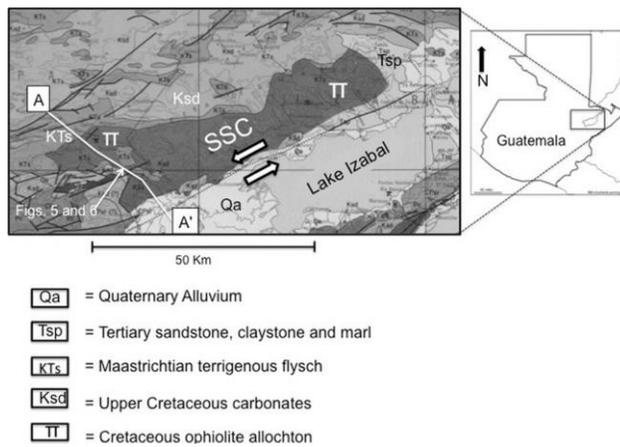


Figure 3. Geologic map of the Sierra de Santa Cruz (SSC) and its surroundings. A-A’ is the line of section of Figure 6. Map by Bonis, Bohnenberger and Dengo, 1970.

metamorphism observed in the SSC is attributable only to the oceanic phase of its formation; including serpentinization; sub-seafloor hydrothermal alteration of gabbro, diabase and basalt; and prehnite-pumpellyite metamorphism of over-ridden trench sediments (Rosenfeld, 1981 and 1993). The base of the ophiolite is the subhorizontal Santa Cruz Thrust Fault whose hanging wall comprises highly sheared serpentinite matrix mélangé enclosing dismembered, subhorizontal decimetric to metric diabase dike fragments (Figure 4).

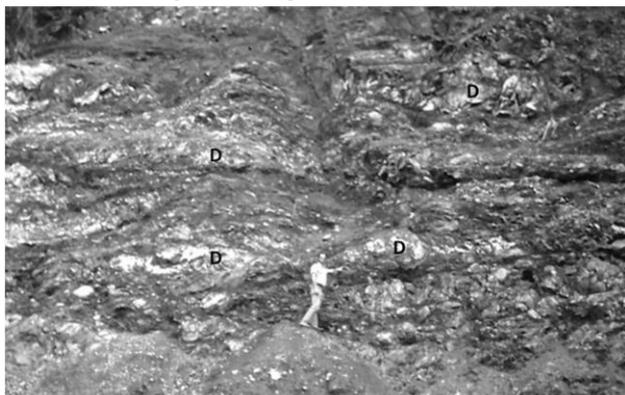


Figure 4. Serpentinite matrix mélangé at the base of the Sierra de Santa Cruz allochthon. D = dismembered subhorizontal diabase dike segments in a highly sheared serpentinite matrix.

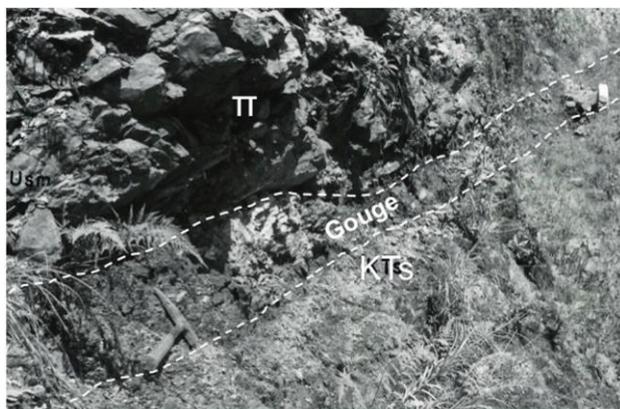


Figure 5. The Santa Cruz Fault marked by thin shaly fault gouge. KT's = Sepur Formation flysch, π = serpentinite matrix mélangé. Hammer (left) and notebook (right) for scale.

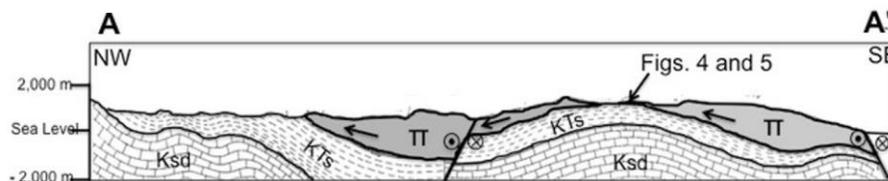


Figure 6. Cross section along the line shown in Figure 3. Arrows in the ophiolite slab show the direction of displacement of the gravity slide. Post-emplacment strike slip faults are also shown. π = Ophiolite slab, KT's = Sepur Fm. Flysch, Ksd = Cretaceous carbonates. No vertical exaggeration.

Immediately beneath the fault is a thin layer of shaly fault gouge that in turn overlies unaltered shaly flysch of the Sepur Fm. (Figure 5). Neither the ophiolite nor the flysch show any evidence of having undergone the amphibolite facies dynamo-thermal metamorphism noted along the sole thrust of the correlative Juan de Paz ophiolite in the Motagua Suture Zone (Muller, 1980).

Abundant ophiolitic detritus in the flysch indicates that the Santa Cruz allochthon was subaerially exposed and eroded following its initial obduction. The absence of metamorphism along the allochthon's sole fault, and the north-facing flysch apron support the hypothesis that the allochthon then glided down the paleoslope into the foredeep flysch.

Age of emplacement

The Sepur Fm. and equivalent strata in Guatemala and southern Belize north of the SSC are as young as Eocene (Bonis, 1967). However, most of the flysch in the foredeep immediately north of, and beneath the allochthon is of Campanian age. A pelagic limestone bed within the flysch 20 meters stratigraphically below the sole thrust of the ophiolite was dated as Late Campanian to Maastrichtian based on the presence of the *Globotruncana elevata* group, including *Gt. fornicata* (high spired form), *Gt. linneana*, *Gt. arca*, *Gt. ventricosa* and *Gt. bulloides* (Rosenfeld, 1981). This age is consistent with final emplacement of the Santa Cruz allochthon having occurred at the Cretaceous-Paleogene boundary.

Geometry of the slide block

The map and cross section of the SSC in Figures 3 and 6 show that the original area and thickness of the allochthon were larger than at present. Specifically, an unknown amount of material has been eroded from the original block, and its

southern continuation has been displaced to the east by about 130 km (Burkart *et al*, 1987) across the strike-slip Polochic Fault. The eastern end of the SSC is overlapped by Oligo-Miocene sedimentary rocks (Figure 3) and may continue to the east in the subsurface. The actual SSC is approximately 90 km. long, 15 km. wide and perhaps 2 km. thick, with an estimated volume of 2,700 cubic km. Although the ophiolite has undergone internal deformation, it is not broken into discrete smaller bodies or debris flows, allowing the conclusion that the allochthon was emplaced as a coherent block.

This remnant of an originally larger slide block compares in size to some of Earth's largest known gravity slides, such as Markagunt (Hacker, *et al*, 2014), Heart Mountain (Beutner and Gerbi, 2004) and Storrega (Bryn, *et al*, 2005), all of which include voluminous debris flows. In the absence of evidence for disaggregation during emplacement, the SSC may be the Earth's largest known coherent gravity slide block.

Magnitude of impact seismicity at the SSC

The Earth Impacts Effects Program of Marcus, Melosh and Collins (2010) is used to calculate the seismic effects of the Chicxulub impact. The bolide is assumed to have been 10 km in diameter, impacting the Earth at 20 km./second at an angle of 45°. This would have produced a 9.9 Richter magnitude earthquake in the study area 600 km. south of ground zero. Such an event is deemed sufficient by the author to have triggered the slide of the massif, which at that time was being uplifted along the margin of the actively subsiding foredeep. Lubrication at the base of the slide by instantaneous overpressuring in water-saturated sediments below the basal fault would have facilitated gliding of the slide mass.

Event chronology

The sequence of key events in the history of the Santa Cruz allochthon is depicted in Figure 7. Initial obduction of the ophiolite occurred in Campanian time,

contemporaneous with development of the foredeep north of the suture zone. Erosion of the exposed allochthon continued into the Maastrichtian. The bolide impact at the end of the Maastrichtian caused the allochthon to slide into the flysch basin. Continued flysch deposition during the Danian may have covered the allochthon as the foredeep extended northward, while subsequent Eocene through Neogene uplift and folding exhumed the allochthon and shaped its present configuration.

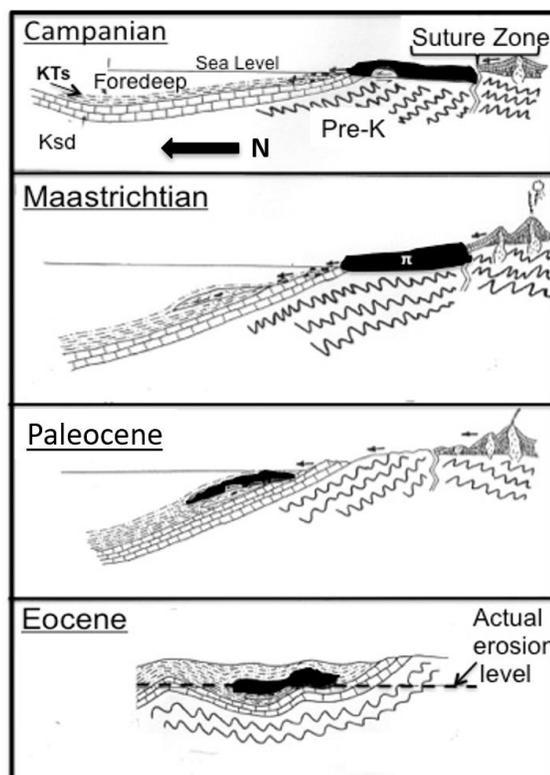


Figure 7. Key developmental stages of the Sierra de Santa Cruz allocation. π = Ophiolite slab, KT's = Sepur Formation flysch, Ksd = Cretaceous carbonates.

Acknowledgements

Mapping and laboratory work for this study from 1977 to 1979 was done by the author for a Ph.D. dissertation under the guidance of Professor T.W. (Nick) Donnelly, with generous support from the State University of New York at Binghamton (now Binghamton University). Peter Marsh, Chief Geologist and Manager of the Oxeo copper mine, kindly arranged logistical support and provided invaluable encouragement and advice during the fieldwork.

References

- Beautner, E.C. and Gerbi, G.P., 2004. *Catastrophic emplacement of the Heart Mountain block slide, Wyoming and Montana, USA*: GSA Bull. v. 117, no. 5-6, p. 724-735.
- Bonis, S., Bohnenberger, O.H. and Dengo, G. compilers, 1970. Instituto Geográfico Nacional: *Mapa Geológico de la República de Guatemala*, scale 1:500,000, 4 sheets.
- Bonis, S., 1967. *Geological Reconnaissance of the Alta Verapaz fold belt*, Guatemala: Ph.D. thesis, Louisiana State Univ., Baton Rouge, 146 pp.
- Bryn, P., Berg, K., Forsberg, C.F., Solheim, A. and Kvalstad, T.J., 2005. *Explaining the Storrega Slide: Marine and Petroleum Geology*, v. 22, p. 11-19.
- Burkart, B., Deaton, B.C., Dengo, C. and Moreno, G., 1987. *Tectonic wedges and offset Laramide structures along the Polochic Fault of Guatemala and Chiapas, Mexico: Reaffirmation of large Neogene displacement: Tectonics*, v. 6, p. 411-422.
- Grajales-Nishimura, J.M., Murillo-Muñetón, G., Rosales-Domínguez, C., Bermúdez-Santana, J.C., Velasquillo-Martínez, L.G. and García-Hernández, J., 2009. *The Cretaceous-Paleogene boundary Chicxulub impact. Its effect on carbonate sedimentation on the western margin of the Yucatan Platform and nearby areas: American Association of Petroleum Geologists Memoir 90*, Tulsa, Oklahoma, p. 316-336.
- Hacker, D.B., Biek, R.F. and Rowley, P.D., 2014. *Catastrophic emplacement of the gigantic Markagunt gravity slide, southwest Utah (USA): Implications for hazards associated with sector collapse of volcanic fields: Geology*, v. 42, no. 11, p. 943-946.
- Kiyokawa, S.R., Tada, T., Matsui, E., Tajika, E., Takayama, H. and Iturralde-Vinent, M.A., 1999. *Extraordinary thick K/T boundary sequence, Cacarajicara Formation, western Cuba: Lunar and Planetary Science XXX*, Abstract #1577, Lunar and Planetary Institute, Houston, Texas.
- Marcus, R., Melosh, H.J. and Collins, G., 2010. *Earth Impacts Effects Program*. <http://www.impact.ese.ic.ac.uk/ImpactEffects>, Imperial College, London.
- Muller, P.D., 1980. *Geology of the Los Amates Quadrangle and vicinity, Guatemala, Central America*: Ph.D. thesis, State University of New York at Binghamton (Binghamton University), 326 pp.
- Paull, C.K., Caress, D.W., Gwiazda, R., Urrutia-Fucugauchi, J., Rebolledo-Vieyra, M., Lundsten, E., Anderson, K. and Sumner, E.J., 2014. *Cretaceous-Paleogene boundary exposed: Campeche Escarpment, Gulf of Mexico: Marine Geology*, v. 357, p. 392-400.
- Pindell, J. and Kennen, L., 2009. *Tectonic Evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and Northern South America in the Mantle Frame: An Update*, <http://www.tectonicanalysis.com>
- Rosenfeld, J.H., 1981. *Geology of the western Sierra de Santa Cruz, Guatemala, Central America: An ophiolite sequence*. Ph.D. thesis, State University of New York at Binghamton, 313 p.
- Rosenfeld, J.H., 1993. *Sedimentary rocks of the Santa Cruz ophiolite, Guatemala – A Proto-Caribbean history: in Proceedings, 13th Annual GCSSEPM Foundation Research Conference*, p. 173-180.
- Wilson, H.H., 1974. *Cretaceous sedimentation and orogeny in Nuclear Central America: American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 58, p. 1348-1396.

ACUÍFEROS: DISEÑO Y ANÁLISIS DE PRUEBAS ESCALONADAS DE BOMBEO

AQUIFERS: DESIGN AND ANALYSIS OF STEP-DRAWDOWN PUMP TESTS

Rudy Machorro Sagastume

Asociación Guatemalteca de Geociencias Ambientales - ASGA

rudy.machorro@yahoo.com

RESUMEN

Las pruebas escalonadas de bombeo en pozos de agua son una herramienta fundamental para establecer el rendimiento sostenible de una fuente de agua subterránea. Se revisa el marco teórico de la hidráulica de acuíferos y se describe el diseño y análisis de pruebas escalonadas de bombeo presentando los resultados obtenidos en un pozo de agua alojado en un acuífero Paleozoico de esquistos fracturados.

El método analítico más simple utilizado para la evaluación hidráulica del acuífero consiste en la solución gráfica de los datos de caudal y descenso del nivel del agua mediante el procesamiento con la hoja electrónica, lo cual permite determinar las pérdidas del acuífero, pérdidas del pozo, capacidad específica del pozo, eficiencia del pozo y el rendimiento sostenible del pozo.

La evaluación hidráulica detallada de las pérdidas de presión durante la prueba de bombeo puede ser un ejercicio de mayor complejidad, por lo que se aportan referencias para el análisis más robusto de las pruebas escalonadas de bombeo.

Palabras clave: Acuífero, hidráulica, bombeo escalonado, pozo de agua, esquistos.

ABSTRACT

Step-drawdown pump tests are a fundamental tool to determine the sustainable yield of a groundwater source. The theoretical framework for aquifer hydraulics is revised and the design and analysis of step-drawdown tests is described presenting results for a water well hosted in an aquifer made up of Paleozoic fractured schists.

The hydraulic evaluation of the aquifer is conducted with an analytical method consisting in the graphical solution of discharge and water level drawdown processing the data with the spreadsheet which allows the determination of aquifer losses, water well losses, specific capacity, well efficiency, and sustainable yield.

The detailed hydraulic assessment of pressure losses during a pump test can be an exercise of greater complexity so references are provided for a more robust analysis of step-drawdown pump tests.

Key words: Aquifer, hydraulic, step-drawdown pumping, water well, schist.

Introducción

La contaminación de aguas superficiales y las sequías en varios países han estimulado notablemente la perforación y construcción de pozos de agua para extraer las aguas subterráneas que tienden a ser de mejor calidad en distintos usos. La estimación del rendimiento sostenible de un pozo de agua es una tarea fundamental en un proyecto de aguas subterráneas. Esta tarea involucra la evaluación hidráulica del acuífero, la cual se simplifica de la siguiente manera: se bombea el agua de un pozo que penetra el acuífero y se miden el caudal y los cambios en el nivel del agua en el pozo y en piezómetros ubicados a una distancia conocida del pozo de bombeo. El bombeo puede implementarse a un caudal constante durante por lo menos veinticuatro horas o de manera escalonada en espacios cortos de tiempo.

El concepto de prueba escalonada de bombeo fue inicialmente formulado por Jacob (1947) para establecer cómo variaba el nivel del agua con el cambio en el ritmo de bombeo. El objetivo fue determinar el radio efectivo de un pozo y cuantificar los componentes de descenso del nivel del agua asociados al bombeo. Jacob anotó que el descenso tiene dos componentes. El primer componente denominado “pérdida del acuífero” está relacionado con la resistencia al flujo laminar dentro del acuífero. La pérdida del acuífero es proporcional al caudal (Q) y aumenta con el tiempo a medida que el cono de descenso se expande. El segundo componente denominado “pérdida del pozo” resulta de la resistencia al flujo turbulento en la zona adyacente al pozo y representa la pérdida de presión que acompaña el flujo de agua a través de la tubería ranurada del pozo (o a lo largo de fracturas en un pozo sin entubado) y en el revestimiento liso (casing). La pérdida del pozo es proporcional al cuadrado del caudal (Q) y es independiente del tiempo.

Jacob (1947) sugirió que la relación entre los dos componentes de descenso puede aproximarse con la siguiente ecuación para distinguir entre flujo laminar y turbulento:

$$S_w = BQ + CQ^2 \quad (1)$$

donde:

S_w : descenso total del nivel del agua en el pozo de bombeo (L).

Q: ritmo de bombeo (L^3/t).

BQ: Componente de descenso por pérdida del acuífero (L).

CQ^2 : Componente de descenso por pérdida del pozo (L).

B: Constante de pérdida del acuífero (t/L^2), también denominado *factor de flujo laminar*. B representa la resistencia total de la matriz del acuífero a partir de la pared del pozo hacia el radio de influencia.

C: Constante de pérdida del pozo (t^2/L^5), también denominado *factor no lineal de turbulencia* ocasionada por la bomba en las cercanías del pozo.

Las *pérdidas lineales de presión* se derivan del daño que sufre el acuífero durante la perforación y terminación del pozo (Kruseman y de Ridder, 1994) e incluyen las pérdidas de presión por compactación del acuífero durante la perforación, por sellado del acuífero con lodo de perforación, por instalación del filtro de grava, y por presión de la tubería. Las *pérdidas no lineales de presión* abarcan las pérdidas por fricción en la parte interna del entubado del pozo y de la tubería de succión de la bomba.

El descenso del nivel de agua en el pozo depende no solo de Q sino también de la geometría del acuífero. Aunque el componente no lineal de la ecuación (CQ^2) normalmente se relaciona con la turbulencia, pueden existir otros factores que también contribuyen al comportamiento no lineal, tal como el drenaje de las fracturas discretas, la deformación de la matriz rocosa y un acuífero no confinado (van Tonder et al., 2001).

La teoría básica de hidráulica de pozos aplica el concepto de flujo laminar (Darcy) para el agua subterránea. Sin embargo, en las inmediaciones de un pozo, la velocidad del agua puede incrementar hasta alcanzar condiciones turbulentas. La turbulencia se asocia frecuentemente con fracturas y cavidades kársticas, aunque también puede relacionarse con una tasa alta de descarga y con restricciones a la entrada de agua al pozo. Las restricciones pueden ser muy variadas e incluyen la obstrucción de la

porosidad del acuífero por los lodos de perforación, los sedimentos finos provenientes de la perforación y la instalación del filtro de grava (van Tonder et al., 2001). Estos factores pueden ocasionar la formación de una zona vecina al pozo conocida como “piel” cuya conductividad hidráulica difiere notablemente de la conductividad hidráulica del acuífero.

Las condiciones de flujo durante el bombeo pueden representarse con la siguiente ecuación (Roscoe Moss Company, 1990):

$$s = ds + ds' + ds'' + ds''' \quad (2)$$

donde:

s = descenso total del nivel del agua medido en el pozo de bombeo.

ds = pérdida de presión en el acuífero (pérdida de la formación).

ds' = pérdida de presión en la zona dañada (efecto piel).

ds'' = pérdida de presión en el filtro de grava.

ds''' = pérdida de presión del agua que entra en la tubería ranurada.

La ecuación (2) es una representación más detallada equivalente a la ecuación (1).

La Figura 1 ilustra las contribuciones individuales de las pérdidas de presión a la pérdida de presión total que se registran durante el bombeo en un pozo.

La estimación de las pérdidas de presión es importante para evaluar la eficiencia, capacidad específica y rendimiento seguro de los pozos de agua.

Las pérdidas de presión para cada componente individual de flujo se describen detalladamente en Houben (2015). El factor más importante que contribuye al descenso del nivel del agua es frecuentemente el acuífero. Mientras mayor sea la conductividad hidráulica, menor será el descenso que se registre durante el bombeo. El segundo factor más importante es la formación de la capa relacionada con el efecto piel, particularmente cuando no se limpia y desarrolla adecuadamente el pozo después de la perforación. El efecto piel agrupa todas las pérdidas de presión en las inmediaciones del pozo, asumiendo que estas

pérdidas se concentran en una delgada y resistente “piel” en las paredes del pozo. Se ha demostrado que una capa de arcilla de pocos milímetros de espesor puede ocasionar pérdidas de presión que varían de pocos metros a decenas de metros (Houben, 2015).

La prueba escalonada de bombeo es una herramienta muy útil para la evaluación de pozos y acuíferos, ya que permite predecir el comportamiento del nivel del agua de un pozo al ser sometido a bombeo y establecer el rendimiento a largo plazo del pozo.

El descenso total observado en un pozo de bombeo es la diferencia entre el nivel estático del agua y el nivel de bombeo (nivel dentro del entubado del pozo). El nivel del agua fuera del entubado varía en función de las pérdidas de presión que ocurren a medida que el agua se mueve a través del acuífero (ds), las pérdidas de presión a medida que el agua subterránea atraviesa la zona dañada con el efecto piel (ds'). El efecto piel se debe a los fragmentos finos provenientes de la perforación que permanecen en el pozo. El agua subterránea luego se mueve a través del filtro de grava (ds''). Se desarrollan pérdidas adicionales de presión (ds''') cuando el agua subterránea ingresa a la tubería ranurada del pozo y cambia de dirección de flujo horizontal a vertical hacia la bomba.

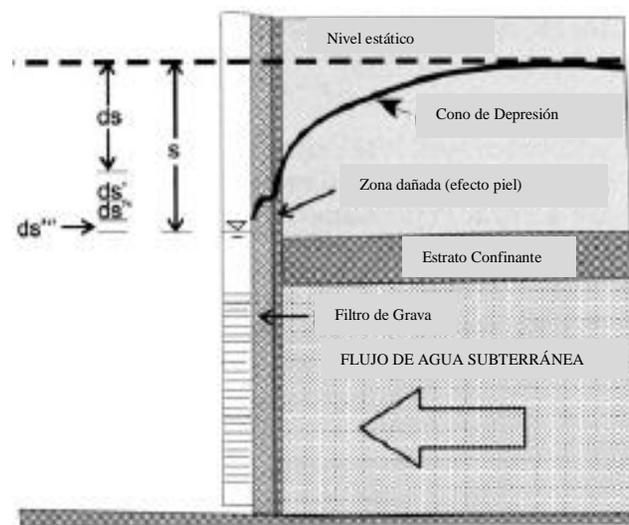


Figura 1. Diagrama que muestra las pérdidas de presión que ocurren en un pozo durante el bombeo (ligeramente modificada de Weight, 2008).

Diseño de pruebas escalonadas de bombeo

La prueba escalonada de bombeo se diseña para coleccionar dos datos básicos: caudales y niveles de agua (Clark, 1977). Esta prueba se realiza cambiando el ritmo de bombeo de manera deliberada en un intervalo consistente de tiempo, normalmente cada hora o cada 100 minutos. La clave de la prueba reside en que cada escalón dure la misma cantidad de tiempo y que se documenten por lo menos cuatro escalones. El ritmo inicial de bombeo es menor al caudal máximo esperado en el pozo. El primer escalón debe constituir cerca del 75 % del caudal esperado en el pozo para luego adoptar incrementos en caudal entre 15 y 20 %.

En pozos someros, los niveles de agua se miden con una cinta. Pero cuando existen niveles de agua profundos donde puede ser necesario instalar una línea de aire, el caudal normalmente se mide con un flujómetro, pero también puede usarse un tubo con orificio calibrado y manómetro instalado, o realizarse descargas volumétricas en botes de 5 galones o en un barril (Figura 2).

Métodos analíticos de pruebas escalonadas de bombeo

El método analítico más simple y utilizado en esta investigación consiste en una solución gráfica de la ecuación $S_w = BQ + CQ^2$ desarrollada por Bruin y Hudson (1955), la cual permite determinar las constantes B y C mediante el procesamiento de datos con la hoja electrónica.

Resultados – Estudio de caso

Para efectos de la presente investigación se han utilizado datos de una prueba escalonada de bombeo en un acuífero de esquistos paleozoicos fracturados (Cuadro 1) en el área de influencia de la Zona de Falla del Motagua en el departamento de El Progreso. Se ha utilizado la solución gráfica propuesta por Bruin y Hudson (1955).

Los datos de la prueba de bombeo se han obtenido en un pozo de 8" de diámetro y de 120' de profundidad con un intervalo ranurado de 80'.

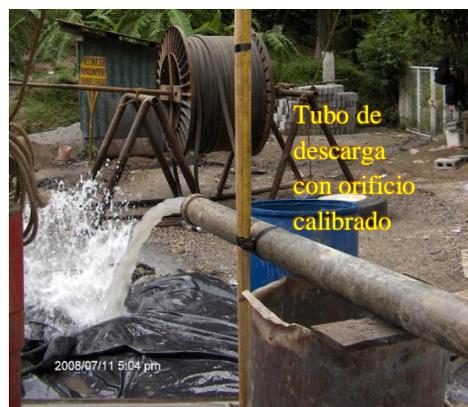


Figura 2. Fotografías que muestran el equipo utilizado en una prueba de bombeo.

Como muestra el Cuadro 1, la prueba escalonada consistió en el bombeo del pozo con cuatro escalones sucesivos de una hora de duración.

Cuadro 1. Datos crudos de prueba de bombeo escalonada en esquistos Paleozoicos fracturados.

	Escalón			
	1	2	3	4
Q (gpm)	20	43	64	75
Tiempo pasado (min)	Nivel Agua (pies) 1	Nivel Agua (pies) 2	Nivel Agua (pies) 3	Nivel Agua (pies) 4
0	11,5	14,2	20,5	28,1
1	12,5	15,5	21,5	29
2	13	16,5	22	31
3	13,1	17,1	22,8	34
4	13,2	17,2	23,5	36
5	13,4	17,5	24,5	40,8
6	13,5	18,4	24,9	41,2
7	13,6	18,8	25,3	40,5
8	13,6	19,1	25,7	39,5
9	13,7	19,1	26	39,1
10	13,7	19,3	26,2	39,6
15	13,75	19,6	26,8	40,4
20	13,8	19,8	27,2	40,8
25	14,1	20	27,4	41,1
30	14,1	20	27,6	41,4
40	14,1	20,2	27,7	41,9
50	14,1	20,3	28	42,1
60	14,2	20,5	28,1	42,3
Bomba de 5 HP y 12 etapas.				

El ritmo inicial de bombeo fue de 20 galones por minuto (gpm) seguido de 43 gpm, 64 gpm y 75 gpm. Se analizaron los datos para determinar la magnitud de descenso del nivel del agua debido al acuífero, pérdida de formación (BQ) y la pérdida del pozo (CQ²).

La Figura 3 es un diagrama semi-logarítmico que muestra el descenso observado del nivel del agua en el pozo versus el tiempo de bombeo para cada escalón. El descenso incremental para cada escalón (Δs) es la diferencia entre el descenso del nivel del agua al final de un escalón dado y el descenso del escalón anterior. El descenso total del nivel del agua (s_w), o descenso observado, es la suma de los descensos incrementales.

Para obtener la constante de pérdida del acuífero, B, y la constante de pérdida del pozo, C, se calcula la relación s_w/Q_n para cada escalón individual (n) y se grafica contraponiendo los correspondientes valores de Q_n , tal y como se muestra en la Figura 4.

Cuadro 2. Resultados de la evaluación hidráulica del acuífero en base a la prueba escalonada de bombeo.

Escalón No.	Q (gpm)	Descenso Incremental	Descenso Observado	Capacidad Específica	s_w/Q (pie/gpm)	B (pie/gpm)	C (pie/gpm ²)	Pérdida del acuífero	Pérdida del pozo	Descenso Calculado	Eficiencia del Pozo $BQ/(BQ+CQ^2)$
		Δs (Pies)	s_w (Pies)	Q/ s_w (gpm/pie)				BQ (pies)	CQ ² (pies)	s_{wc} BQ + CQ ²	
1	20	2.8	2.8	7.14	0.140	0.028	4.40E-03	0.56	1.760	2.320	0.241
2	43	6.3	9.1	4.73	0.212			1.204	8.136	9.340	0.129
3	64	7.6	16.7	3.83	0.261			1.792	18.022	19.814	0.090
4	75	14.2	30.9	2.43	0.412			2.1	24.750	26.850	0.078

La Figura 4 muestra una línea recta cuya pendiente equivale al valor de C, mientras que la intercepción de la línea con el eje vertical aporta el valor de B.

De este análisis se obtiene un valor de 0.0044 pie/gpm² para C y un valor de 0.028 pie/gpm para B.

El Cuadro 2 ilustra todos los parámetros hidráulicos obtenidos para el acuífero a partir del análisis realizado para esta prueba de bombeo. El análisis indica que las pérdidas del pozo son mayores que la pérdida del acuífero. La capacidad específica del pozo, la relación de su caudal con su descenso total (descarga por unidad de descenso) y la eficiencia del pozo son mucho mayores durante el primer escalón que en el último escalón. Esta variación sugiere que el acuífero no es homogéneo, sino que constituye una secuencia anisotrópica con hidráulica variable a nivel local.

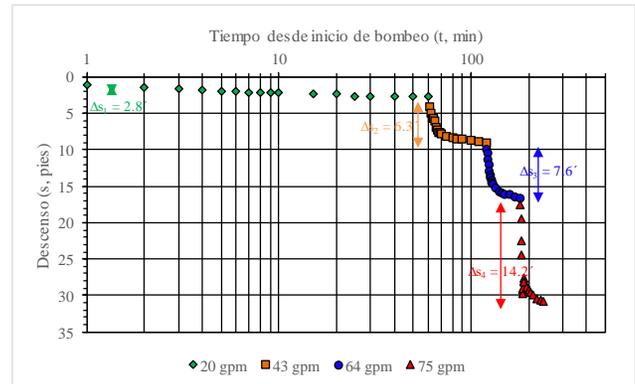


Figura 3. Gráfica semi-logarítmica de descenso del nivel del agua ante el tiempo de bombeo.

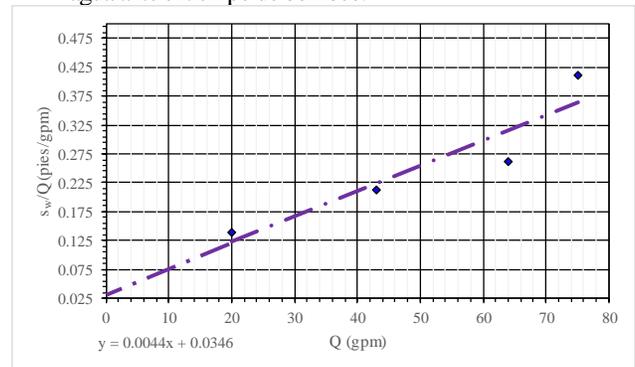


Figura 4. Gráfica aritmética de s_w/Q versus Q.

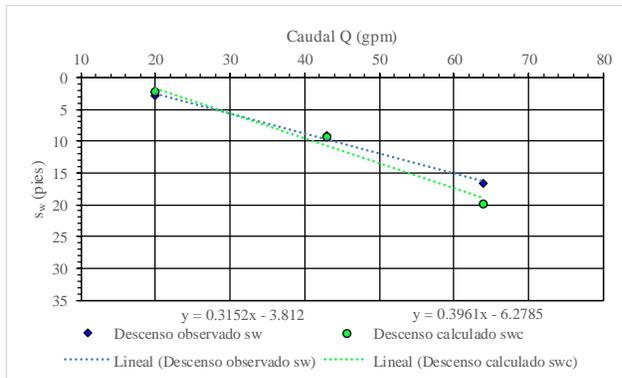


Figura 5. Relación entre el descenso observado y el calculado para la prueba escalonada de bombeo.

La Figura 5 muestra una buena correlación entre el descenso del nivel del agua monitoreado durante la prueba de bombeo y el descenso teórico calculado con la ecuación de Jacob, lo cual sugiere que la metodología utilizada para el modelo hidráulico del acuífero es aceptable.

Discusión y Conclusiones

Las pruebas de bombeo son normalmente la única herramienta que se puede utilizar para determinar el rendimiento sostenible a largo plazo de un pozo de agua. Para el caso analizado en la presente investigación, los descensos del nivel del agua registrados en la prueba escalonada de bombeo, junto con la capacidad específica y eficiencia del pozo, sugieren un rendimiento sostenible de 30 gpm. Este dato fue corroborado mediante la realización de una prueba de bombeo constante de veinticuatro horas de duración.

El análisis hidráulico de un acuífero mediante pruebas escalonadas de bombeo no requiere datos adicionales de pozos de observación, por lo que el método analítico de solución gráfica con la hoja electrónica constituye una solución simple, de bajo costo e inmediato para obtener la relación entre nivel y caudal.

Aunque la ecuación de Jacob sigue siendo el método clásico para el análisis de las pruebas escalonadas de bombeo, tiene la limitante de que no incorpora el tiempo como una variable independiente. Esto constituye una debilidad notable, ya que el descenso depende tanto del tiempo como del caudal. El lector interesado en el análisis

más robusto de pruebas escalonadas de bombeo puede consultar métodos más detallados que se describen en Clark (1977), Helweg (1994), van Tonder et al. (2001) y Shekhar (2006).

Referencias bibliográficas

- Bruin, J., and Hudson, H.E. (1955). *Selected methods for pumping test analysis*: Illinois State Water Survey. Report of Investigation 25. 51 p.
- Clark, L. (1977). *The Analysis and Planning of Step Drawdown Tests*: Quarterly Journal of Engineering Geology, v. 10, p. 125-143.
- Helweg, O.J. (1994). *A general solution to the step-drawdown test*: Groundwater, v. 32, p. 363-366.
- Houben, G.J. (2015). *Review: Hydraulics of water wells – head losses of individual components*: Hydrogeology Journal, v. 23, p. 1659-1675.
- Jacob, C.E. (1947). *Drawdown test to determine the radius of artesian well*: Transactions of the American Society of Civil Engineers, v. 112, p. 1047-1070.
- Kruseman, G.P., & de Ridder, N.A. (1994). *Analysis and Evaluation of Pump Test Data*. International Institute for Land Reclamation and Improvement. The Netherlands. Publication No. 47. 377 p.
- Roscoe Moss Company. (1990)., *Handbook of Groundwater Development*. John Wiley & Sons. 493 p.
- Shekhar, S. (2006). *An approach to interpretation of step drawdown tests*: Hydrogeology Journal, v. 14, p. 1018-1027.
- van Tonder, G.J., Botha, J.F., & van Bosch, J. (2001). *A generalized solution for step-drawdown tests including flow dimension and elasticity*: Water SA, v. 27, p. 345-354.
- Weight, W.D. (2008). *Hydrogeology Field Manual*. McGraw Hill. 751 p.

CARTOGRAFÍA DE ZONAS DE INUNDACIÓN, EVENTO O-56 Y TORMENTA TROPICAL NATE, EN COBÁN, ALTA VERAPAZ, GUATEMALA

CARTOGRAPHY OF FLOODING ZONES, EVENT O-56 AND NATE TROPICAL STORM, IN COBÁN, ALTA VERAPAZ, GUATEMALA

Sergio David Morán Ical⁽¹⁾, Jaime Requena F.⁽²⁾, Fernando Monterroso⁽¹⁾, Osmín Jared Vásquez⁽¹⁾, Lui H. Laj⁽¹⁾,

Centro Universitario del Norte, Universidad de San Carlos de Guatemala, Finca Sachamach

Km 210, Cobán, Alta Verapaz, Guatemala⁽¹⁾

Asociación Guatemalteca de Geociencias Ambientales⁽²⁾

RESUMEN

El río Cahabón es uno de los principales sistemas fluviales que drena dentro de la región de Alta Verapaz. Dentro de su cuenca se encuentran algunos poblados importantes, tales como Tactic, Santa Cruz, San Cristóbal, Cobán, Carchá y Cahabón, los cuales han resultado afectados en épocas de intensas lluvias. El registro histórico de inundaciones podría iniciar desde el paso de los huracanes Fifi en septiembre 1974 y Mitch en 1998. Recientemente se han documentado, desde el punto de vista cartográfico, los niveles máximos de inundación del río Cahabón, en los años 2007 y 2017.

El evento denominado localmente O-56, ocurrido en 2017, afectó a la ciudad de Cobán. En este evento, los sitios impactados fueron Petet Chixic, el acceso a Creompaz, Chichochoch, el sector del Hospital regional, el INJUD, la colonia Imperial, El Recreo, Yalguo, la colonia Las Carmelitas, La Esperanza, la Escuela de Aplicación Chajxucub, la colonia Israel y La Colonia. Estos sitios resultan afectados por dos razones: la primera, por estar ubicados dentro de la planicie de inundación del río, y la segunda, por lo relacionado al sistema kárstico, que evidenció acumulación de agua pluvial, así como la resurgencia de agua subterránea, causada por los cambios del nivel freático local. Ejemplo de ello son los sitios de La Colonia, Yalguo y Chajxucub.

Con respecto a la gestión del riesgo, se ha hecho muy poco en estos sitios, ya que las actividades antrópicas continúan ocurriendo en estos espacios de alta susceptibilidad a inundación.

Palabras clave: inundaciones, cartografía, gestión de riesgo, río Cahabón, karst.

ABSTRACT

The Cahabón River is one of the main fluvial systems that drains within the Alta Verapaz region. Within its basin, there are some important towns, such as Tactic, Santa Cruz, San Cristóbal, Cobán, Carchá and Cahabón, which in times of intense rains have been affected. The historical record of floods could start from the passage of hurricanes Fifi in September 1974 and Mitch in 1998. Recently, the maximum levels of flooding of the Cahabón River have been documented from the cartographic point of view, corresponding to the year 2007 and 2017.

The event locally called O-56 occurred in 2017, affected the city of Cobán, where the sites impacted were Petet Chixic, the access to Creompaz, Chichochoch, the area of the regional hospital, INJUD, Colonia Imperial, El Recreo, Yalguo, Las Carmelitas, La Esperanza, Escuela de Aplicación, Chajxucub, Colonia Israel and La Colonia. These sites were affected for two reasons: the first one, because they are located within the floodplain of the river, and the second one is related to the karst system, there is evidence of accumulation of rainwater, as well as the resurgence of groundwater, caused by the changes in the water table local. Examples are the sites of La Colonia, Yalguo and Chajxucub.

With relation to risk management, very little has been done in these sites, since anthropic activities continue to occur in these spaces with high susceptibility to flooding.

Key words: floods, cartography, risk management, Cahabón river, karst.

Introducción

La cartografía de zonas de inundación es utilizada como herramienta básica en la planificación del territorio, así como para la toma de decisiones en la gestión del riesgo, considerando el caso de eventualidades que impliquen lluvias constantes y/o extremas. El mapa de zonas de inundación permite visualizar directamente las áreas y sectores urbanos afectados y de alta susceptibilidad en condiciones climáticas similares.

La Carrera de Geología elaboró el mapa de zonas inundadas a partir de la ocurrencia de la Tormenta Nate, sucedida el 5 y 6 de octubre de 2017. Esta tormenta causó daños a los pobladores de Cobán, situados en la cuenca alta del río Cahabón (Figura 1). Así mismo, se realizó un análisis básico sobre el comportamiento de la precipitación y se plantea la cantidad de precipitación acumulada necesaria para generar un sistema de alerta.

Por su parte, las ciudades de Cobán y Carchá resultan ser los municipios más poblados del departamento de Alta Verapaz y los que recurrentemente son afectados por inundaciones.

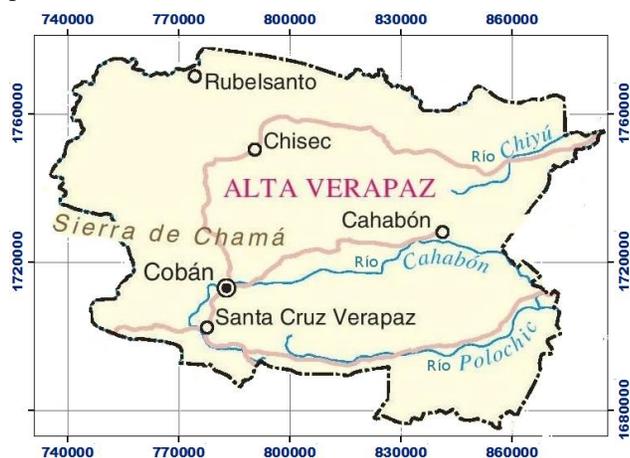


Figura 1. Ubicación de la ciudad de Cobán en el contexto del departamento de Alta Verapaz.

Metodología

Para el desarrollo del trabajo, inicialmente se recopiló información concerniente a modelos de elevación del terreno, conformada por fotos aéreas digitales (IGN, 2006), imágenes satelitales (LandSat, Sentinel 2) y

captadas con dron. Durante los días que duró el evento y permanecieron sus efectos, se realizó la visita de campo y la cartografía de los niveles máximos de inundación. Con estos datos se obtuvo el mapa de zonas de inundación para las ciudades de Cobán y Carchá. Así mismo, se obtuvo y analizó la base de datos de la precipitación de dos estaciones locales: INSIVUMEH y Anacafé. Finalmente, se contrastaron los niveles alcanzados para los eventos del año 2007 y 2017.

Resultados

1. Escenario geológico

En los alrededores de Cobán y Carchá afloran calizas de la Formación Cobán (Cretácico) que han sido afectadas por procesos de disolución y consecuentemente han desarrollado una serie de elementos geomorfológicos relacionados al karst: dolinas, poljes, úvalas y simas (“siguanes”), elementos de alta vulnerabilidad a la contaminación e inundación. Sobre las calizas y de forma discordante se dispone la Formación Jolom Naj (Gilles et al., 2015). Esta formación de unos 60 metros de espesor se compone principalmente de limos y arcillas de origen lagunar. Al contrario de las calizas, estos sedimentos son impermeables y muchas veces rellenan dolinas, uvalas y poljes, como es el caso de la ciudad de Cobán.

Tectónicamente, el área es afectada por la zona de falla Polochic (al Sur) y por la zona de falla Siguanhá (al Norte), ambas de movimiento lateral izquierdo y orientación Este-Oeste. Estos dos sistemas de fallas controlan la distribución del sistema de drenaje del río Cahabón por la región.

2. Cuenca del río Cahabón

La cuenca del río Cahabón tiene un área de 2,459 km² (Figura 2) y forma parte de la vertiente del Caribe. El río Cahabón, a nivel de Alta Verapaz, es una de redes hidrológicas de importancia que drena al este, confluyendo con el río Polochic (Figura 1).

La región es vulnerable particularmente a la ocurrencia de huracanes y tormentas. FIFI (1974), Mitch

(1998) y Stan (2005) son recordados debido a fuertes impactos negativos que incluyeron daños a la infraestructura y pérdida de vidas humanas. Más recientemente en el 2007 y 2017 (Tormenta Nate), también han ocurrido inundaciones. Las crecidas del río Cahabón y otros tributarios menores son las que han afectado a la población, cuyo desarrollo urbanístico se sitúa en las planicies de inundación del río Cahabón, por ejemplo. Uno de los tributarios en la cuenca alta del río Cahabón es el río Mestelá.

3. Microcuenca del río Mestelá

El río Mestelá, es un importante río tributario dentro de la cuenca alta del río Cahabón. Su microcuenca tiene un área de $\pm 70.7807 \text{ km}^2$ (7078.07 hectáreas) que drena de sur a norte, confluyendo con el Cahabón ya en el área urbana de Cobán (cercanía al puente San Vicente).

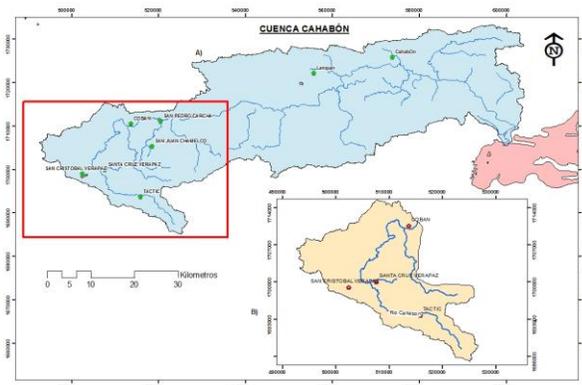


Figura 2. Cuenca del río Cahabón y segmento de la cuenca en su parte alta.

4. Cartografía de zonas de inundación

Para realizar la cartografía de las zonas de inundación del Río Cahabón y algunos de sus tributarios, se programaron visitas de campo dentro del área urbana de Cobán. El proceso cartográfico fue sencillo, ya que consistió en documentar la ubicación y el nivel máximo de agua en cada sitio para su posterior traslado al mapa base.

La Tormenta Tropical Nate (localmente denominada evento O-56) provocó intensas lluvias el 5 y 6 de octubre de 2017 en la región de Alta Verapaz (Figura 3).

En la ciudad de Cobán se identificaron 16 sectores afectados por el temporal O-56 (Tabla 1); mientras que en

Carchá solamente se mencionan 4 sitios afectados, los cuales se citan más adelante.

5. Comportamiento de la precipitación

Consultada la base de datos de precipitación del INSIVUMEH, en su estación Cobán (Figura 3), se graficó la precipitación ocurrida en los meses de septiembre y los primeros seis días de octubre de 2017. Es posible apreciar que los días 9 y 28 de septiembre son considerados los más lluviosos de dicho mes (48 y 84 mm, respectivamente). Sin embargo, a partir del 28 de septiembre ocurrieron lluvias constantes hasta el 6 de octubre (75 mm).

Con ello, la precipitación provocó el aumento en el caudal del río Cahabón y se mantuvo activa la escorrentía.

6. Causas ligadas a la inundación y zonas afectadas

Las inundaciones tienen diferentes causas y sus efectos han ido aumentando debido al mal uso del territorio. Las principales causas que se han identificado son las siguientes (Figura 4):

- Exceso de precipitación
- Presencia de karst
- Actividades humanas (colapso de drenajes).

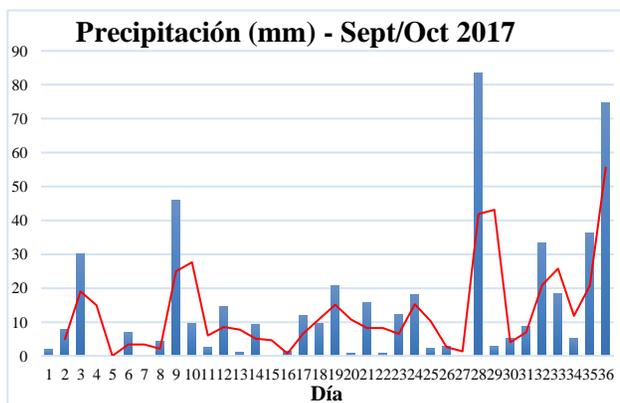


Figura 3. Histograma y tendencia para el comportamiento de la precipitación en el evento O-56.

Tabla 1. Áreas afectadas en el perímetro urbano de Cobán.

Sitios afectados	
Petet Chixic	La Colonia
Acceso a Creompaz	Cerro Sapens
Chichochoch	Las Carmelitas
Sector del Hospital regional	La Esperanza
INJUD	Escuela de Aplicación
Colonia Imperial	Chajxucub
El Recreo	Colonia Israel
Yalguo	La Colonia
La Joya, Esfuerzo I	Colonia W

a) Exceso de precipitación

Los temporales de lluvias son el origen principal de las crecidas. Cuando el terreno no puede absorber o almacenar toda el agua que cae, esta resbala por la superficie (escorrentía) y sube el nivel de los ríos. En estas condiciones, un río deja de ocupar su cauce natural y pasa a cubrir su planicie de inundación. En Cobán se registran en ciertos años precipitaciones superiores a los 200 mm en un día en algunas zonas y se han registrado lluvias muy superiores hasta llegar a los 300 mm.

A esta causa obedecen las inundaciones relacionadas al río Cahabón y sus efectos a la propiedad privada dentro de la ciudad de Cobán.

Los sectores dentro de la planicie de inundación del río son: Petet Chixic, entrada a Creompaz, Chichochoch, Colonia Israel, Residenciales Imperial, Liceo Ricardo Bressani y El Recreo (Figura 5 de “a” a “d”).

Para el sector de Petet Chixic, el nivel de agua del río Cahabón llegó a ± 0.75 m del muro perimetral noroeste del Colegio Hispanoamericano, muy por debajo del nivel alcanzado en 1998 con el Huracán Mitch, según indica Alberto Caal.

La entrada a las instalaciones de Creompaz fue afectada tanto por la inundación como por la sedimentación de material arcilloso, obstaculizando la ruta principal y dañando la infraestructura existente en el sitio (Figura 5).

Por otra parte, se presentó esta misma situación en la Bodega Municipal (Figura 5a) que se extendió hasta el Liceo Miguel Ángel Asturias y Residenciales Imperial, donde varias familias fueron damnificadas. En dicha zona, los niveles del agua ascendieron entre 1 y 1.50 m desde el nivel de pavimento. La arcilla depositada alcanzó un espesor de 10 cm.

Por último, se encuentra el área El Recreo y Prodenorte. Aunque en la mayoría de este tramo aún existen áreas verdes con poca actividad antrópica, el nivel del río afectó ciertas viviendas (Figura 4).

El problema común es la invasión antrópica de la planicie de inundación del río Cahabón o sus tributarios.

Esta invasión se debe al crecimiento poblacional y urbano. La ocupación de los cauces por construcciones y/o rellenos de áreas reduce tanto la sección útil para evacuar el agua como la capacidad de la llanura de inundación del río. En consecuencia, el nivel del agua tenderá a subir a cotas más altas y nuevas áreas que históricamente no han evidenciado inundación serán afectadas. Por otra parte, el riesgo de perder la vida y de daños personales es muy alto en las personas que viven en esos lugares.

Por ello surge la necesidad de normar el uso de dichos espacios.

b) Presencia de karst

La presencia de karst se refiere a las depresiones y/o cavidades naturales que son el producto de la disolución de la roca caliza, que aflora en los municipios de Cobán y Carchá.

Las dolinas son depresiones topográficas producidas por el colapso de antiguas cavernas, rellenas posteriormente de suelo arcilloso y cenizas volcánicas. Estos suelos impermeables poseen baja tasa de infiltración, lo que provoca acumulación de agua y, en consecuencia, sitios muy susceptibles a provocar inundación puntual o local, como lo sucedido en ciertos sectores dentro de la ciudad de Cobán (Figura 4).

El agua subterránea circula por estas cavidades en las calizas que, en épocas de fuertes precipitaciones, provocan las “surgencias” del agua que conducen, causando inundaciones.

Los elementos kársticos son vulnerables, haciéndose necesario su adecuado uso, por lo que es obligatorio incluirlos dentro de las normativas e instrumentos legales ambientales del país. Por otra parte, son importantes desde el punto de vista hidrogeológico (aguas subterráneas).

En Cobán se han identificado siete sectores con este problema: Yalguo, Injud, La Colonia, Escuela de Aplicación, Hospital Hellen Lossi de Laugerud, Chajxucub y el parque Nacional Las Victorias (Figura 4 y 5).

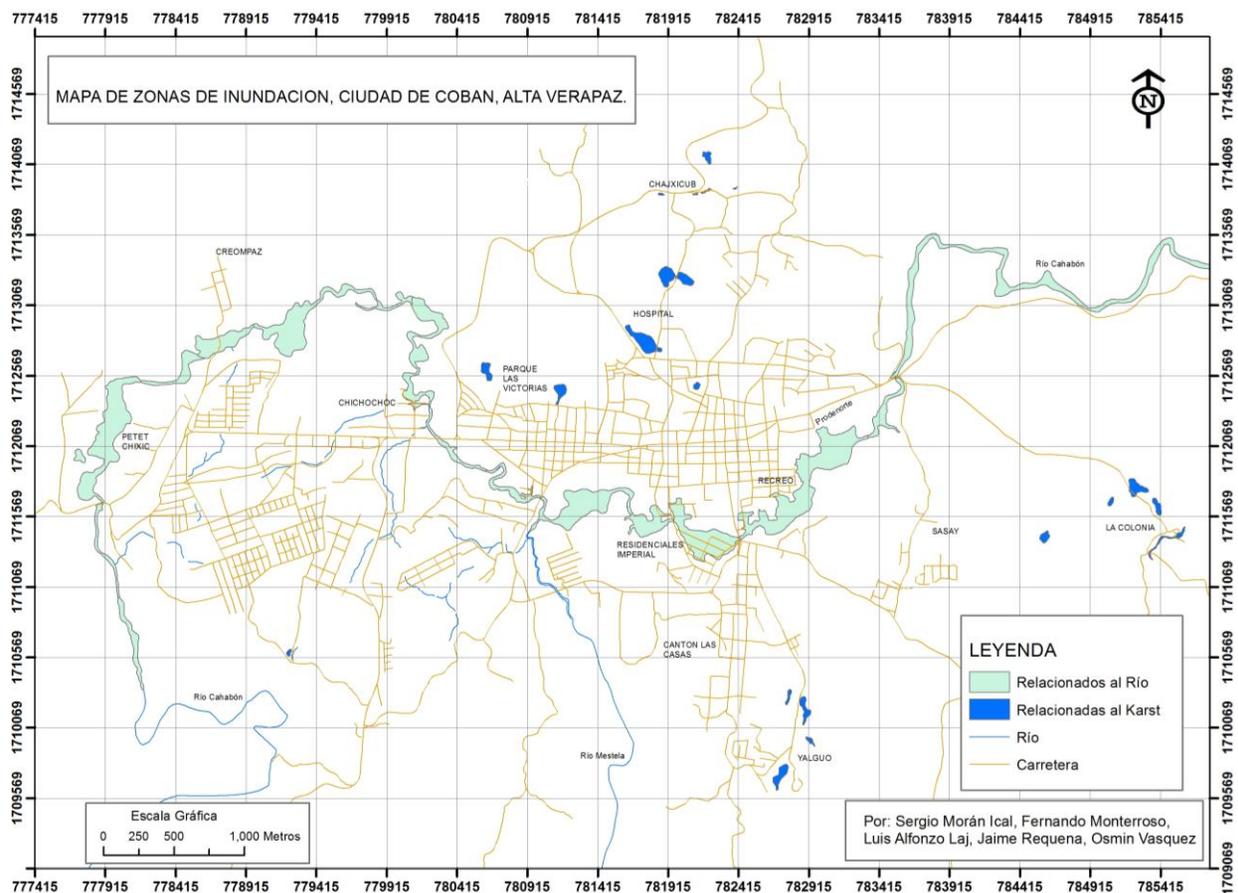


Figura 4. Áreas afectadas durante la Tormenta Nate, ocurrida en octubre de 2017.

El ingreso principal al hospital se ve interrumpido debido a la inundación que experimentan estos elementos kársticos.

c) Colapso de drenajes

El caso de colapso de drenajes se debió a dos situaciones: La primera fue la obstrucción por basura, y la segunda, la baja capacidad de la tubería para evacuar el agua pluvial. Como en muchas ciudades de Guatemala, el exceso y mala disposición de desechos sólidos es evidente, y la ciudad de Cobán no escapa a esta cultura. Los problemas de acumulación de agua en ciertos sectores se debieron a que las tuberías no poseen el diámetro adecuado para drenar el agua. En este caso es posible citar los del área de Llanresa y La Colonia.

Discusión

Comportamiento de la precipitación

A nivel regional, el comportamiento de la Tormenta Nate, durante el 5 y 6 de octubre, se centró principalmente al sur de Guatemala, para luego conformar bandas con alta precipitación casi NE-SW, sobre el sector de Alta Verapaz (Figura 6).

Se ha construido la gráfica de precipitación acumulada (Figura 7). Claramente se observa que la acumulación de lluvia en los últimos días de septiembre e inicios de octubre fueron las que causaron las inundaciones, alcanzando acumulaciones superiores a 250 mm. Con las observaciones de campo, se logró establecer que efectivamente, con esas cantidades de lluvia acumulada, ocurre el desbordamiento y se empiezan a presentar problemas de inundación en las áreas citadas dentro de la ciudad de Cobán.



a) Vista del puente de Hamaca. Edin Meza, 2017.



b) Sedimentación e infraestructura en la entrada a Creompaz. 2017.



c) Residenciales Imperial. 8:43 a. m. 5 de octubre de 2017.



d) Evacuación de habitantes en Colonia Israel. Byron Juárez. 2017.



e) Resurgencia en dolina en el “Proyecto planta tratamiento”, Zona 1. 2017.



f) Aumento del nivel freático en Balneario La Colonia. 2017.



g) Inundación en sector Chajxucub, zona 11. 2017.



h) Inundación en Petet Chixic. Evento de 2007.

Figura 5. Principales sectores afectados por la inundación del río Cahabón y relacionados al karst.

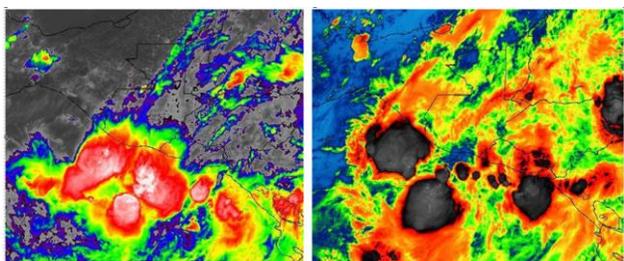


Figura 6. Distribución espacial de la precipitación a nivel regional. weather.msfc.nasa.gov.

Por lo que, en esta primera aproximación, es posible sugerir que una alerta naranja (AN) debe iniciar al alcanzar los 250 mm de precipitación acumulada en esta parte de la cuenca. Mientras que, la alerta roja (AR) debe darse cuando se alcancen los 400 mm de precipitación acumulada (Figura 7).

La falta de instrumentación en la cuenca y particularmente en la parte alta de la cuenca, limita un control más efectivo y con fines de previsión. Se puede observar la necesidad de instrumentar la cuenca con estaciones meteorológicas y de caudales, entre otros, para permitir el correcto monitoreo desde una computadora central, con el objetivo de facilitar la emisión de las alertas respectivas y la toma de decisiones para salvaguardar vidas y/o bienes.

Inundaciones antiguas y recientes

En este caso se hace referencia al huracán Mitch y al temporal de 2007. El huracán Mitch ingresó a Guatemala el 27 de octubre de 1998, con una trayectoria que afecta inicialmente el departamento de Zacapa.

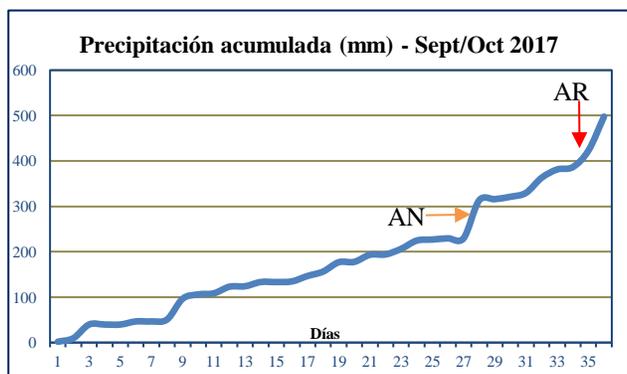


Figura 7. Gráfico para la precipitación acumulada. Flechas en naranja y rojo correspondientes a los límites propicios para activar la alerta naranja y roja (Registro instrumental con datos del INSIVUMEH).

Durante este evento en 1998, varios poblados fueron afectados a lo largo del cauce del río Cahabón, entre ellos la ciudad de Cobán. Según los pobladores que aun recuerdan, el huracán Mitch y el más reciente evento de 2017 sobrepasaron una columna de agua de ± 3.5 m en sectores donde la planicie de inundación es angosta, y una de 0.75 m, donde es más ancha.

Para 1998, durante el Mitch, los registros obtenidos indican que el sector de Residenciales Imperial tuvo un ascenso máximo de 3.25 m y un mínimo de 1.5 m en el nivel del agua.

En agosto de 2007 ocurre un evento de alta precipitación que afecta varios sectores dentro de la ciudad de Cobán. El comportamiento de la precipitación en relación con los días anteriores tuvo un ascenso abrupto (Figura 8), no gradual como en el 2017.

En el caso del evento de 2007, el desbordamiento del río Cahabón y los deslizamientos en los alrededores de la ciudad de Cobán ocurrieron entre las 9:00 y las 10:00 a. m. del día 13 de agosto, según los pobladores, con una precipitación acumulada de ± 240 mm (Figura 8).

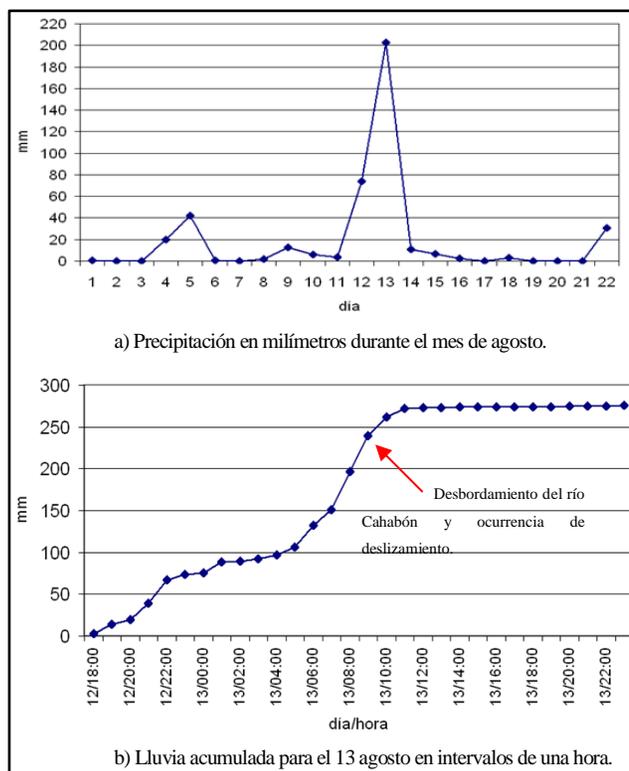


Figura 8. Comportamiento de la precipitación del año 2007.

A nivel regional, la precipitación se distribuyó al sur de Guatemala y con pequeñas acumulaciones sobre el departamento de El Quiché y Alta Verapaz (Figura 9).

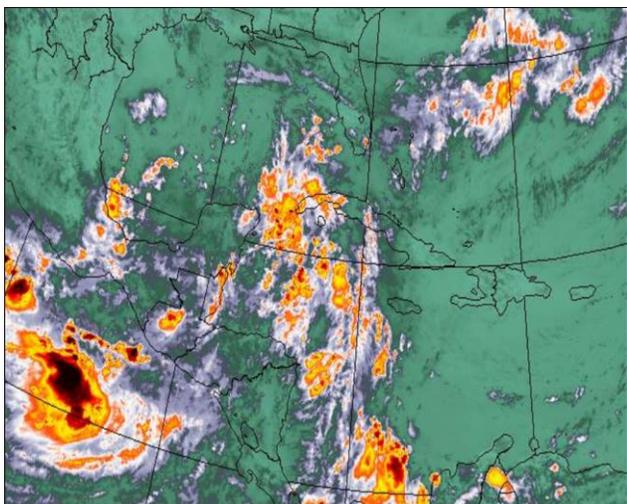


Figura 9. Distribución de la precipitación a nivel regional. Imagen del 13 de agosto de 2007, 8:29 horas. weather.msfc.nasa.gov

En este caso, fue cartografiado y a nivel de comparación se contrasta este evento con el del 2017 (Figura 10).

Monitoreo a futuro dentro de la cuenca

La carrera de Geología ha documentado detalladamente e identificado desde el 2007 las zonas susceptibles a inundación dentro del sector de la ciudad de Cobán, Alta Verapaz (Figura 10). Además, se tienen identificados los niveles máximos de inundación considerando como evento extremo el Huracán Mitch, ocurrido en 1998.

Se sugiere que los “pasos a seguir” para hacer sostenible la gestión del riesgo por inundaciones y deslizamientos en el departamento de Alta Verapaz, deberían contemplar lo siguiente:

1. Se debe plantear el estudio sistemático de las cuencas a través de estudios técnico-científicos dirigidos por la Carrera de Geología, a través de sus docentes y estudiantes. Una vez realizados los diagnósticos y estudiado la problemática, se debe proceder a instrumentar las cuencas, lo cual permitirá generar Sistemas de Alerta Temprana. Solo de esta manera será posible asegurar que el impacto a la población sea evitado o minimizado. El

monitoreo constante de las cuencas, sus respuestas y la generación de modelos particulares permitirá establecer niveles de precipitación o caudales, sobre los cuales se emitirán alertas: amarilla, naranja y roja, “antes de que sucedan los desastres”.

2. La contraparte (Gobernación, Alcaldía, CONRED) deberá gestionar y asignar los fondos necesarios al proyecto.

El cambio climático continuará generando tormentas y huracanes, de los cuales no es posible escapar; en cambio, con una gestión adecuada del manejo de las cuencas y el ordenamiento del territorio, será posible disminuir o evitar los impactos o futuros desastres.

Cartografía de amenazas naturales a futuro

a) Flujos de escombros, caso de aldea Pantic

Un desastre asociado a las lluvias intensas del mes de septiembre ocurrió en la Aldea Pantic (Tamahú, A. V.). Se trata de un flujo de escombros ocurrido el 27 de septiembre de 2017. La elevada cantidad de lluvia generó un flujo de escombros que sepultó a una parte de la comunidad, dejando 8 fallecidos, 25 viviendas con daños y el bloqueo del paso hacia el Polochic.

La comunidad Pantic (Tamahú) se localiza dentro de una microcuenca de 5.88 km²; justo en el ápice de la cuenca (Figura 11), en la confluencia con el Río Polochic. Geológicamente, la comunidad se sitúa 50 metros al sur de la traza principal del sistema de fallas Polochic. La principal unidad de roca está conformada por lutitas-pizarras de la formación Tactic y calizas de la formación Chóchal; ambas del Paleozoico. En la Figura 11 se observan las pendientes y casi toda la parte sur de la microcuenca está constituida por pendientes superiores a los 40°.

Este escenario reúne por lo menos 3 de los principales factores condicionantes de la ocurrencia de movimientos de ladera (flujos de escombros): altas pendientes, rocas fracturadas y presencia de fallas.

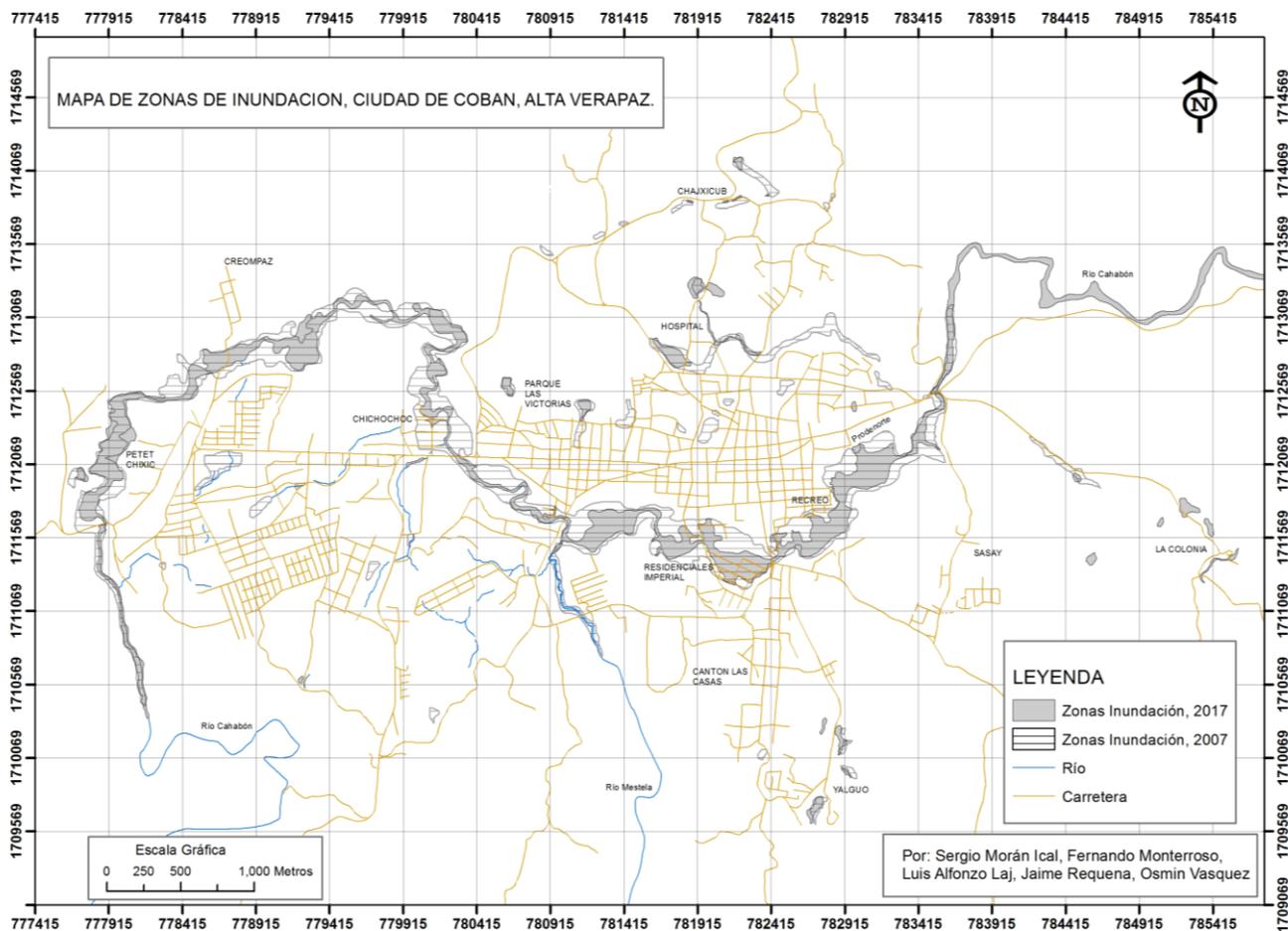


Figura 10. Zonas de inundación considerando los dos eventos de precipitación de 2007 y 2017.

El flujo de escombros está constituido principalmente por fragmentos de calizas de distintos tamaños, pero destacan por su poder destructivo los bloques con más de dos metros de diámetro, los cuales superan las 15 toneladas de peso.

En la comunidad de Pantic no existen estructuras que resistan la enorme cantidad de material generado o su peso (Figura 11).

El análisis de toda la cuenca Polochic demuestra la existencia de otras comunidades en similares condiciones; colocándolas en situación vulnerable.

b) Cartografía urbana de niveles de inundación

La cartografía urbana por inundación y monitoreo constante de la precipitación dentro de la cuenca que conlleve la instrumentación dentro de la cuenca considerando sus partes superior, media e inferior, es de vital importancia dentro de la gestión del riesgo.

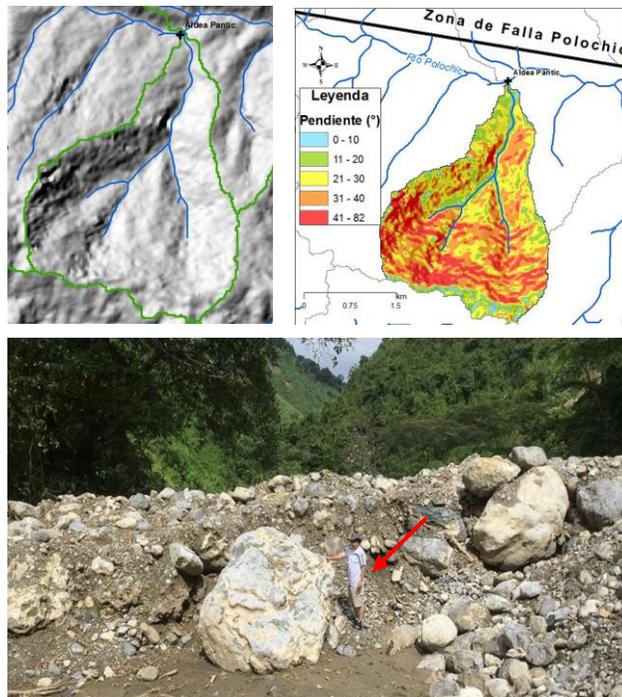


Figura 11. Cuenca y características en la pendiente del terreno, como diámetro de rocas transportadas por el flujo ocurrido en Pantic.

La carrera de Geología tiene como meta documentar otros sitios que han sido afectados por procesos relacionados a la precipitación (Figura 12), como por ejemplo, la cartografía de niveles dentro de la zona urbana y alrededores de **Carchá**, Tactic, San Cristóbal, Chamelco, etc; aplicando la metodología que se desarrolló para la zona urbana de Cobán.

En Carchá, por esta misma causa y asociada a la crecida del río Cahabón, los principales problemas se registraron en Residenciales Raxpec y Barrio Chibujbú. El río Chió (tributario del río Cahabón) también provocó daños en el parque infantil La Presa (Figura 11). A nivel del municipio de Carchá se mencionan las comunidades de Canihab y Chajsaquil y la entrada a Chaimal.

Por otra parte, existen sitios afectados por diferentes amenazas naturales identificados por CONRED Y COE (Coordinadora del Centro de Operaciones de Emergencia), a nivel de Alta Verapaz. Pero para dichos sitios, falta el levantado de la información técnico-científica (Tabla 2).

Tabla 2. Municipios afectados en 2017.

Localidades identificadas	
Tactic	Carchá
Tamahú	Panzós
Tucurú	La Tinta
San Cristóbal	San Juan Chamelco
Chisec	Fray Bartolomé de las Casas

A nivel de la gestión de riesgo se puede desarrollar una serie de técnicas para la visualización de las zonas de afectación según grado de impacto. Herramientas simples

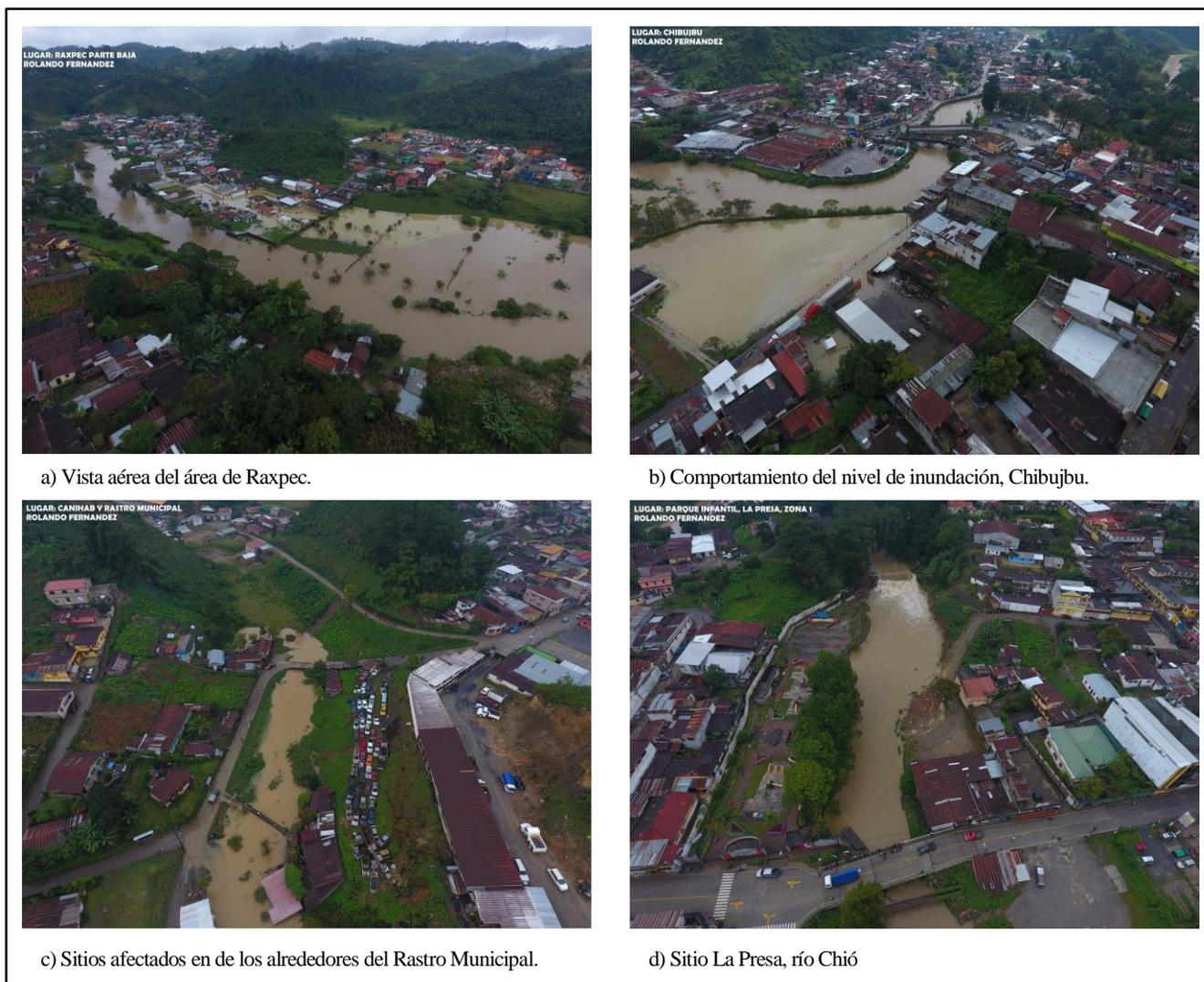


Figura 12. Zonas afectadas dentro del área urbana de Carchá, Alta Verapaz. Fotos Rolando Fernández.

pero útiles en la visualización de las zonas afectadas pueden ser implementadas en las localidades listadas en la tabla 2.

Conclusiones

Es frecuente que los sitios cercanos a los ríos sean afectados por inundación y esto depende de ciertos factores, como tamaño de la cuenca, uso del suelo, geología y tasa de precipitación.

El nivel freático a nivel local está controlado por el río Cahabón. Sus variaciones temporales afectan a los sistemas naturales que se encuentra alrededor, como por ejemplo, el sistema kárstico. Estas variaciones se ven reflejadas en el ascenso del nivel del agua subterránea. Esto provoca la resurgencia de agua en las dolinas y poljes. Ejemplo de esto son los sectores del Hospital Helen Lossi, Yalguo, La Colonia y Chajxucub.

Actualmente se continúan construyendo obras habitacionales muy cercanas al río. Estas áreas, corresponden a la planicie de aluvial del río Cahabón y, por lo tanto, podrían ser consideradas como zonas con mayor recurrencia y susceptibilidad a inundación en el futuro.

Considerando las variaciones en la cantidad (mm) y temporalidad de la precipitación, se obtienen diferentes escenarios de inundación. Esto puede ser analizado a partir del comportamiento que refleja la precipitación a nivel local de 2007 y 2017. En el primer caso, existe un ascenso brusco en la precipitación de un día para el otro. Caso contrario para el año 2017 (Figura 13).

La mayor intensidad de lluvia ocurrió el día 28 de septiembre (83.6 mm) y el día 6 de octubre (74.8 mm), de tal manera que el valor de lluvia acumulada (Figura 12) para el día 7 de octubre alcanzó un máximo de 269.9 mm. Esto permite interpretar que, a los 240 mm de lluvia acumulada, el río Cahabón tiende a desbordarse o explayarse.

En este caso, los niveles del río Cahabón no descendieron lo suficiente, del 1 al 4 octubre, por lo que el alza de 75 mm en la precipitación (menor que la del día 28 de septiembre) bastó y generó el desbordamiento del río.

Para implementar cualquier proyecto dentro de un área, se requiere la caracterización de las amenazas naturales. Una forma sencilla es la cartografía de amenazas (fenómenos naturales) en áreas urbanas. Solo se necesita que las autoridades gubernamentales reconozcan su importancia, con lo cual se reducirían pérdidas económicas y sobre todo humanas.

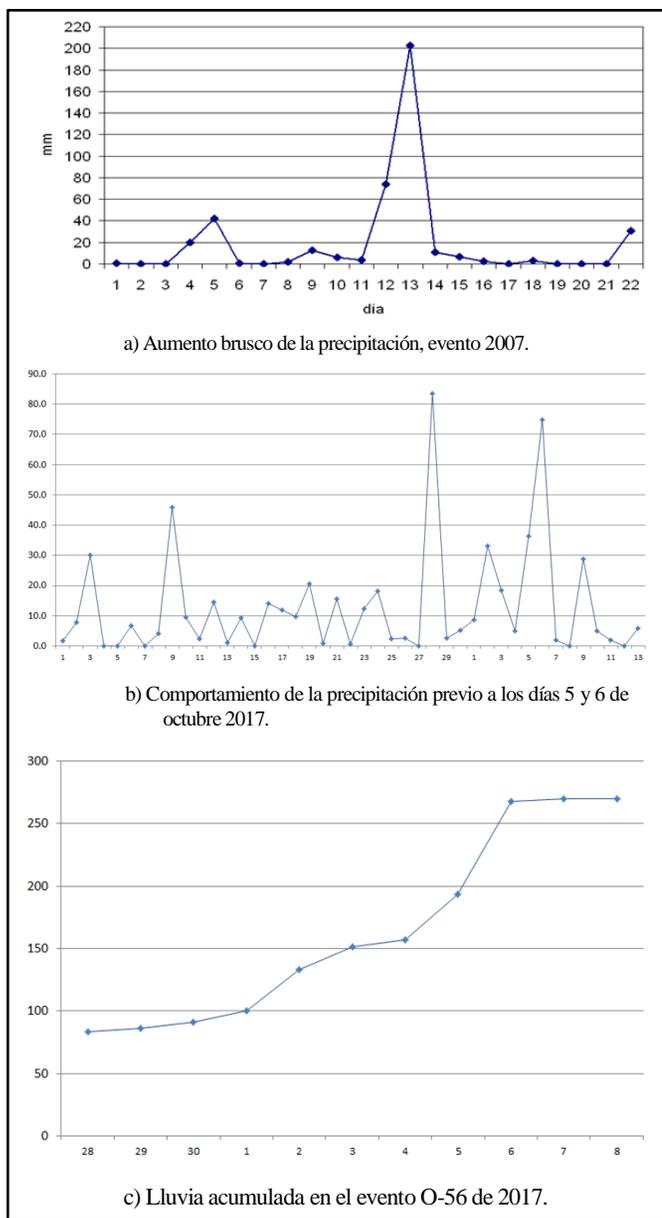


Figura 13. Comportamiento de la precipitación (mm) considerando los eventos de 2007 y 2017.

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a Carlos Ventura, Helen Morán y Luis Bá, por recopilar información sobre las zonas de inundación relacionadas por el huracán Mitch.

Referencias bibliográficas

Robert C. Bucknam, Jeffrey A. Coe, Manuel Mota Chavarría, Jonathan W. Godt, Arthur C. Tarr, Lee-Ann Bradley, Sharon Rafferty, Dean Hancock, Richard L. Dart, y Margo L. Johnson, *Deslizamientos de Tierra Inducidos por el Huracán Mitch en Guatemala — Inventario y Discusión*. 2001. Open-File Report 01-443.

Prensa Libre, 1974. *Guatemala Castigada: 2 Ciclones Dañan Caminos, Poblados y Sembradíos*. Año XXIV, Numero 7066. Hemeroteca.

<https://es.climate-data.org/america-del-norte/guatemala/alta-verapaz/coban-53883/#climate-graph>

<https://weather.msfc.nasa.gov/>

CARACTERIZACIÓN LITOLÓGICA DE LA SECUENCIA PALO AMONTONADO, EL PROGRESO, GUATEMALA

LITOLOGICAL CHARACTERIZATION OF PALO AMONTONADO SEQUENCE, EI PROGRESO, GUATEMALA

Kevin Carlos Enrique Chun Quinillo

Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro Universitario del Norte, Carrera de Geología
contacto@kevin.quinillo.com

Sergio David Morán Ical

Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro Universitario del Norte, Carrera de Geología
moran_sergio@usac.edu.gt

RESUMEN

Con el objetivo de caracterizar las capas Palo Amontonado, se realizó una cartografía geológica de un área de 7 km² ubicada dentro de la Zona de Falla del Motagua (ZFM). Dicho estudio muestra que las capas Palo Amontonado son parte de una secuencia conformada por pilow lavas, areniscas y lutitas verdosas con niveles de chert y calizas bioclásticas, por lo que podrían sugerir su pertenencia a una secuencia ofiolítica. La continuidad y relaciones estratigráficas de las unidades identificadas se ve interrumpida principalmente por estructuras frágiles con dirección NE-SW, tales como la Falla Las Minas al norte y al sur por la Falla El Limonar, que corresponde el límite norte de las capas rojas de la Formación Subinal.

El nivel de calizas bioclásticas contiene restos de microfósiles, tales como foraminíferos de orden *miliolina* (30 %) y *Loftusiida* (25 %), fragmentos de algas (5 %), restos de gasterópodos (40 %) y espículas de equinodermos. Dichos microorganismos confieren tentativamente una edad de Cretácico superior a la secuencia Palo Amontonado.

Palabras clave: Caliza bioclástica, basalto almohadillado, secuencia, Palo Amontonado.

ABSTRACT

In order to characterize the Palo Amontonado layer, a geological map was made of an area of 7 km² located within the Motagua Fault Zone (ZFM). This study shows that the Palo Amontonado layers are part of a sequence consisting of pillow lavas, sandstones and greenish shales with chert levels and bioclastic limestones, so they could suggest their belonging to an ophiolitic sequence. The continuity and stratigraphic relationships of the identified units are interrupted mainly by fragile structures with NE-SW direction, such as the Las Minas fault to the north, and the El Limonar fault to the south, which corresponds to the northern limit of the red layers of the Subinal Formation.

The level of bioclastic limestones contains microfossil remains such as foraminifera of order *Miliolina* (30 %) and *Loftusiida* (25 %), fragments of algae (5 %), remains of gastropods (40 %) and spicules of echinoderms. These microorganisms tentatively confer an age of Upper Cretaceous to the Palo Amontonado sequence.

Key words: Bioclastic limestone, pillow basalt, sequence, Palo Amontonado.

Introducción

El área de estudio se encuentra situada a 5 km de la cabecera departamental de El Progreso dentro de la zona de falla del Motagua, la cual se localiza en la parte central de Guatemala, cuya traza posee una dirección E-W y de cinemática sinistral (Figura 1).

De la recopilación bibliográfica resalta la confusión geológica sobre las capas sedimentarias denominadas “Palo Amontonado” y la Formación Subinal. Por lo que la siguiente investigación se enfoca en delimitar por medio de un análisis petrográfico las características sedimentológicas, como su extensión y relación estratigráfica a través de fotografías aéreas y patrones preferenciales de lineamientos estructurales a escala 1:5,000.

Metodología

La investigación se desarrolló básicamente en tres etapas. La primera fase consistió en recopilar información bibliográfica relacionada a la distribución de las capas Palo Amontonado a escala regional. Posteriormente se elaboró un mapa de elevación digital y se analizaron fotografías aéreas para el reconocimiento y cartografía de rasgos estructurales.

La segunda fase contempló la visita de campo con el objetivo de identificar las características físicas de las

rocas (textura, color, matriz, contenido fósil, mineralogía) recolectando muestras y datos estructurales. Como parte de la caracterización de las capas Palo Amontonado se llevó a cabo un muestreo.

La tercera fase consistió en analizar 27 secciones delgadas a través de un microscopio petrográfico con la finalidad de identificar la microtextura de las rocas por medio de la clasificación de Dunham (1962) y la morfología y arreglo de las cámaras de los microfósiles por la clasificación de Eustaquio Molina (2004).

Antecedentes

En el departamento de El Progreso se localizan cuerpos autóctonos y alóctonos de rocas metamórficas, ígneas intrusivas como extrusivas, rocas sedimentarias continentales y marinas fuertemente falladas.

Dentro del cartografiado de El Progreso a escala 1:50,000 estas rocas fueron estudiadas inicialmente por Eric Bosc (1938) y en fechas más recientes por Donnelly G.S. Horne (1990), Hirschman (1993), Edgar Pérez (2000), M. Chiquín (2003) y Axel Gutiérrez (2008). Dichos autores enfocaron su trabajo en caracterizar las unidades geológicas de Guatemala agrupándolas en formaciones.

Eric Bosc (1971), a través de la investigación geológica en El Progreso, localiza una secuencia bien consolidada denominada Palo Amontonado, conformada



Figura 1. Mapa de la República de Guatemala con las principales fallas geológicas y la localización del área de estudio (estrella en rojo). Burkar, 1978.

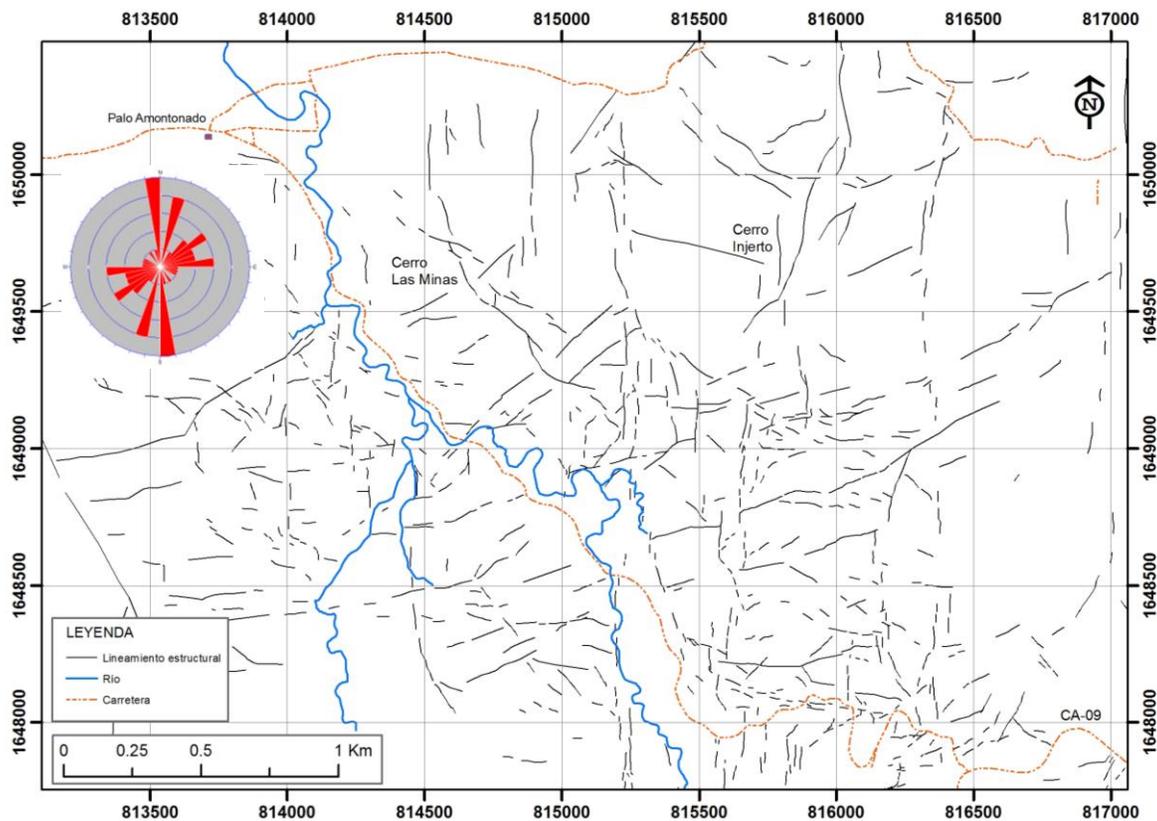


Figura 2. Mapa de lineamiento estructural y diagrama de rosa. Patrones preferenciales NE-SE y N-S.

por areniscas en contacto con lentes de caliza masiva con una fauna de gasterópodos, moluscos, fragmentos de briozoos, placas de algas y equinodermos.

Bosc, resalta que las características de esta unidad son diferentes a las exposiciones conocidas de la Formación Subinal.

Donnelly G.S. Horne (1990), con base en la información proporcionada por Hirschman, identifica dos tipos de caliza de material fino y grueso con contenido de foraminíferos (Rhipidolina, Cuneolina, Dicyclina) y fragmentos de rudistas (Plagiotchys).

Los rasgos estructurales cartografiados mediante imagen digital muestran patrones preferenciales NE-SW, N-S, N50-60W. Dichos lineamientos, a nivel de afloramiento, ponen en contacto a la mayoría de unidades dentro del área (Figura 2).

Los planos de fallas medidas en afloramiento, muestran tendencias similares a los cartografiados mediante fotografías aéreas digitales (Figura 3).

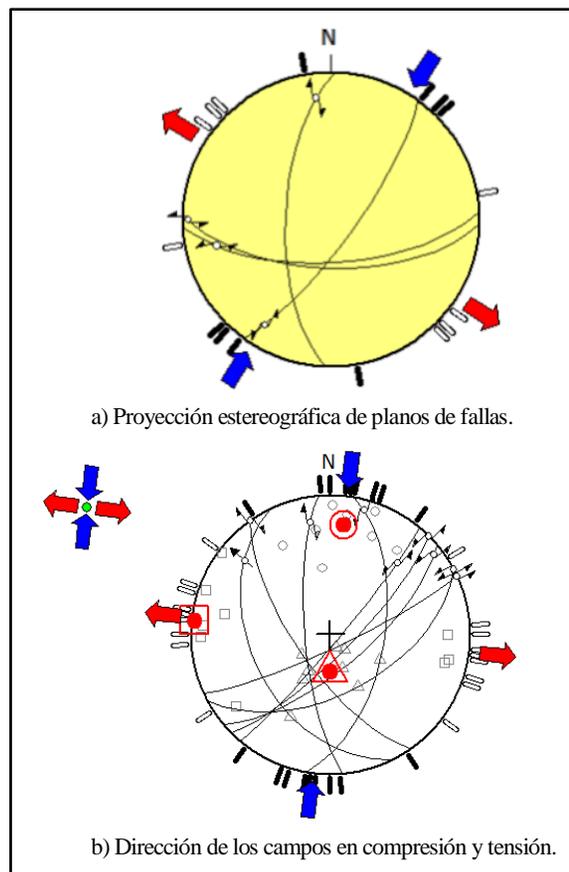


Figura 3. Cinemática y patrón de fallamiento en el área.

Resultados

Unidades litológicas

Se reconocieron nueve unidades litológicas, cuyos contactos son fallados en su mayor parte, estas son: Peridotita serpentizada (Ps), Gabro (Gb), Rocas de alta presión (Ap), Basalto almohadillado (Ba), lodolitas y areniscas rojas (La), Carbonatos (Ca), secuencia de capas rojas de la Formación Subinal (Cr), Ceniza volcánica de caída (Cv) y Depósitos aluviales (Da) (Figura 4).

La **Peridotita serpentizada (Ps)** se encuentra distribuida en la parte Este del área. Las mejores exposiciones se observan en la quebrada Las Mesas, específicamente en el cerro El Injerto.

Presenta una coloración verdosa, textura de grano fino y brillo sedoso. Mineralógicamente se logran observar pequeños minerales del grupo de la serpentinita y minerales opacos.

Lateralmente al sur se encuentra en contacto fallado (Falla El Limonar) con niveles de rocas de alta presión (jadeíta), capas rojas y los basaltos almohadillados.

Rocas intrusivas (Ig), la mejor exposición se ubica en la cantera cercana a la quebrada Agua Shuca. Presenta una coloración verdosa oscura con estructura masiva, textura fina conteniendo minerales de feldespatos, anfíboles y se encuentra afectada por pequeños diques intrusivos.

Por sus características se ha clasificado como gabro (Gb). El contacto se encuentra fallado (Falla Las Minas) con la secuencia Palo Amontonado y se halla cubierta por depósitos de ceniza volcánica.

Al centro del área se ha identificado una zona que hemos nombrado como de **alta presión** (Melange). Consiste en una serie de bloques de roca cuya matriz es de serpentinita altamente cizallada, que incluye bloques y fragmentos con diámetros de 0.10 a 0.50 m de jadeíta y rocas metamórficas. Sus límites tanto al norte como al sur son tectónicos.

Esta zona de alta presión separa la secuencia Palo Amontonado de la Formación Subinal (Figura 5).

La **Formación Subinal (Cr)** consiste en una intercalación de lutitas, areniscas y conglomerados moderadamente clasificados de color rojo debido a que las arcillas son ricas en hierro. Las mejores exposiciones se encuentran a lo largo de la carretera CA-09, que comunica a la comunidad del Rancho y Guastatoya.

Las lutitas presentan una textura muy fina intercalándose con areniscas de textura gruesa a fina. Poseen un alto contenido de mica blanca (porcentaje promedio) cuyas láminas son ≤ 1 mm.

Las areniscas poseen granos subredondeados a redondeados de cuarzo y líticos con diámetros que varían de 0.5 cm a 3 cm. La matriz es arcillosa y en parte compuesta por carbonato. Los conglomerados están compuestos por clastos (cuarzo, caliza, serpentinita, basalto) subredondeados moderadamente, clasificados dentro de una matriz arenosa a arcillosa. El tamaño de los clastos varía entre 0.5 cm y unos 3 cm aproximadamente asociándose a paleocanales.

La estratificación varía sobre la ruta al atlántico, mantiene una dirección NE-SW buzando al sureste, mientras que en la entrada del área cambia en dirección NW-SE inclinándose al suroeste.

Otra secuencia está conformada de basalto almohadillado, areniscas y lutitas verdosas, y por último, cuerpos de caliza, las que se describen en detalle más adelante.

Ceniza volcánica de caída (Cv), las mejores exposiciones se observan al norte, en donde la ceniza volcánica cubre las capas rojas y los basaltos almohadillados.

Macroscópicamente es de textura fina, de color blanco-rosado, con mica biotita y fragmentos líticos de serpentinita.

Por lo menos se pueden distinguir dos niveles, sugiriendo por lo menos dos episodios volcánicos. El nivel inferior puede estar ligado a los depósitos H, de la erupción de los Chocoyos (Figura 4f).

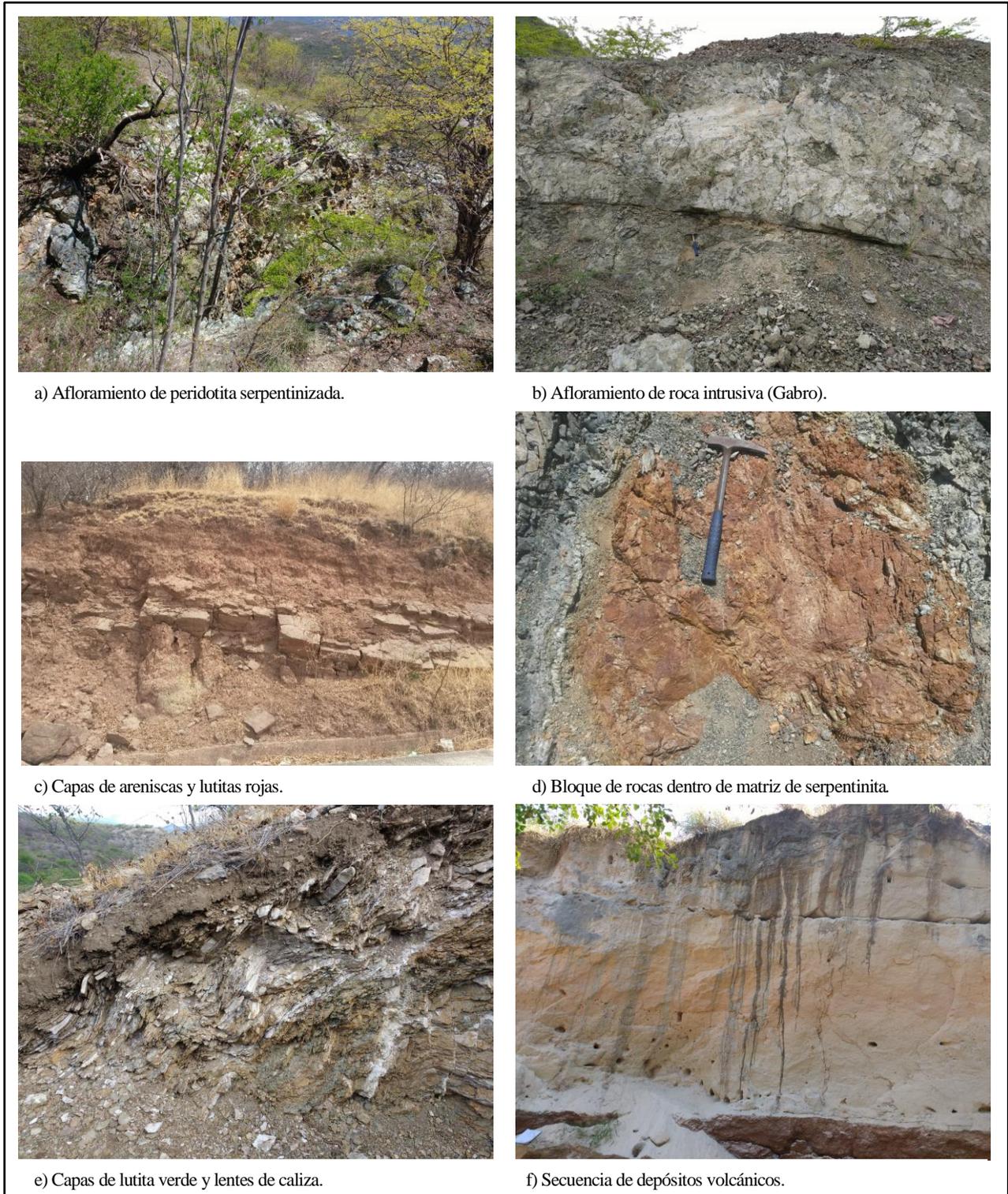


Figura 4. Características litológicas y estructurales de las unidades cartografiadas en el área.

Depósitos aluviales (Da), se localizan al norte en cercanía con el río Motagua, extendiéndose al oeste hacia la aldea Piedra Parada (Figura 5).

Presentan una disposición horizontal compuesta de clastos líticos de redondeados a subredondeados que varían en sus dimensiones.

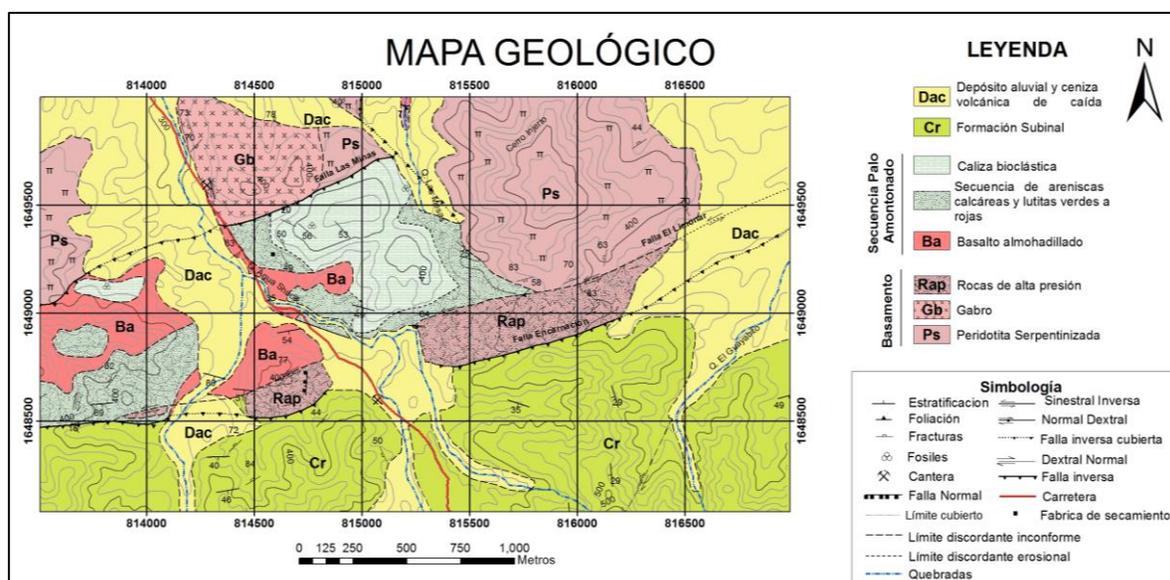


Figura 5. Mapa geológico simplificado del área de estudio.

Discusión

- Secuencia Palo Amontonado

La secuencia Palo Amontonado aflora como una banda estrecha de tendencia NE-SW, limitada por fallas tanto al sur como norte (Figura 5). Dichas fallas poseen una orientación de N75E/ 80S.

Básicamente se encuentra compuesta de tres niveles. A nuestro criterio, inicia la secuencia con **basalto almohadillado**, continuando con estratos de **areniscas y lutitas verdosas**, para luego pasar a un pequeño intervalo de **calizas con fósiles**.

El intervalo de **Basalto almohadillado (Ba)** se expone en la quebrada Agua Shuca, pasando una fábrica de secamiento.

La roca (Basalto almohadillado) posee coloraciones entre verdoso, violeta a negro.

En dirección norte, sus estructuras almohadillas se encuentran bien formadas, pero mientras más se acerca a la zona central, en contacto con las areniscas y lutitas, los basaltos presentan una alteración color violeta, textura fina, fracturas radiales y con las estructuras almohadilladas más estrechas y alargadas.

En dirección oeste presentan una forma masiva de coloración violeta, entrando en contacto con lentes de arenisca calcárea rojiza y peridotita serpentizada.

Macroscópicamente, la matriz es afanítica. A nivel microscópico presenta plagioclasas con alto contenido en vidrio desvitrificado generado por procesos de enfriamiento rápido de la roca e intruidos de material.

En afloramiento pueden observarse lóbulos magmáticos con morfología circular a elíptica. Verticalmente presenta un contacto discordante inconforme con las areniscas calcáreas rojizas.

Está conformada por una textura de grano muy fino (afanítica), de coloración violeta, verdosa con presencia de vacuolas desde 1 mm hasta 5 mm.

En afloramiento exhiben en parte una forma elipsoidal, núcleo de coloración oscuro de textura medio a fina y por otra parte masiva.

Se encuentra sobreyacida por una pequeña **secuencia de Areniscas rojas** de textura fina. Dicha, relación estratigráfica se evidencia en las coordenadas 813650-1648850 donde el cuerpo tiene una distribución aproximadamente de 300 m².

Las areniscas que poseen un cemento calcáreo de color rojizo presentan un tamaño de partículas angulosas de 1 mm con presencia de cuarzo lechoso en 20 %, feldspatos en 15 %, moscovita en 5 %, calcita en 30 %, hierro en 30 %.

En los afloramientos, estos presentan formas lenticulares, masivas y en otras, es evidente la estratificación que posee una tendencia NE-SW.

Las **Lodolitas verdosas y rojizas** se observan depositadas sobre las areniscas. Las lodolitas de tonalidad verdosa presentan una textura fina, conteniendo una matriz carbonática sin contenido fósil evidente. Se encuentran cizalladas e intercaladas con calizas de coloración negro-grisácea de 3 a 5 cm de espesor, con abundantes vetillas de calcita en las coordenadas 813785-1649174, cerca de la fábrica de secamiento con una distribución aproximadamente de 400 m². La estratificación buza en dirección suroeste. Microscópicamente, las lutitas contienen vetillas de calcita, matriz muy fina con posibles globotruncanas.

Se confeccionaron 3 láminas delgadas de dichas capas. Las calizas presentan una matriz muy fina con inyecciones de sedimentos y litoclastos redondeados posiblemente pelets.

Las lodolitas de tonalidad rojiza con textura fina y matriz carbonática se observan interestratificadas con capas de calizas rojizas con una textura de grano grueso sin fósiles. Estas capas marcan el límite en dirección sur de la

secuencia Palo Amontonado con la zona de alta presión (Melange) por la falla El Limonar.

Lodolitas y areniscas rojas (La) se extienden como una franja en dirección este-oeste.

Las areniscas presentan una textura de grano fino moderadamente clasificada de coloración rojiza y matriz calcárea. En dirección oeste se observan lentes masivos y estratificados (NE-SW) con un grado de meteorización III, depositándose en pequeñas zonas de 10 m² sobre los basaltos almohadillados debido al arrastre tectónico. Al sur se encuentran siendo cabalgadas en contacto fallado por las capas rojas de la formación subinal.

Las lodolitas presentan una coloración verdosa y rojiza con una textura fina y matriz carbonática. Se encuentran interestratificadas con capas de calizas con una textura de grano medio sin contenido fosilífero evidente.

Carbonatos sobreyacen al intervalo de lutitas verdosas, se encuentran calizas de color gris claro, cuyo contacto es gradual.

Se encuentran mejor expuestos en las cercanías de la quebrada Agua Shuca a un costado de la fábrica de secamiento subiendo el cerro Las minas, en las coordenadas 814750-1649250, y en la parte oeste, llegando



Figura 6. Principales niveles dentro de la secuencia Palo Amontonado.

aproximadamente a la cima del cerro en coordenadas 813863-1649105.

Tres niveles pueden ser identificados, uno de caliza cristalina, brecha calcárea y otra fosilífera (bioclástica).

La caliza cristalina exhibe una coloración grisácea de textura gruesa a media, sin estructura interna (masiva). Lentes de caliza cristalina de 5 cm de espesor son observados intercalados con lutitas. Microscópicamente, estos niveles carecen de fósiles.

El intervalo brechoso está compuesto de clastos angulosos de caliza cuyo diámetro oscila entre 3 a 10 cm.

Para la caliza bioclástica (Figura 6), los mejores afloramientos se ubican en las coordenadas 813785-1649093 (UTM-Zona15) y mientras que hacia el oeste se encuentran niveles calcáreos en las coordenadas 814783-1649411.

Presenta coloración grisácea con una textura de grano fino, vetillas de calcita, fracturas y estratificación en dirección NW-SE.

- Contenido microfaunal

Referido principalmente a calizas bioclásticas, con mejores exposiciones ubicadas en las coordenadas 813785-1649093 y 814783-1649411 (WGS-84, Zona 15).

Presenta coloración grisácea y pueden clasificarse como calizas cristalinas a packstones, conteniendo vetillas de calcita, fracturas y estratificación en dirección NW-SE.

Microscópicamente se observan foraminíferos (Figura 7) de orden *miliolina* (30 %) conteniendo una variedad en su arreglo de cámaras (biloculinas, triloculinas y quinqueloculinas). Del orden *Loftusiida* (25 %) se observó *Cuneolina Pavonea* Parva y *Dicyclina*, en forma alargada.



Figura 7. Principales microfósiles encontrados dentro de la secuencia de calizas, Palo Amontonado.

Así mismo se observaron fragmentos de algas (5 %), restos de gasterópodos (40 %) y espículas de equinodermos dentro de una matriz de micrita.

Los microfósiles observados en las secciones delgadas de dichos niveles de carbonato, son muy similares a los descritos por Eric Bosc (1971) y Donnelly (1990) en la que predominan foraminíferos y restos de gasterópodos.

Conclusiones

Los límites de la mayoría de unidades están marcados por fallas cuya dirección principalmente es NE-SW. Se ha identificado una pequeña secuencia que comprende en la base basalto almohadillado, sobreyacido por niveles de areniscas y lutitas verdosas y, por último, un intervalo de calizas. Dichas calizas, en su mayoría son bioclásticas, cuyo contenido microfaunal consiste en foraminíferos de orden *miliolina* (30 %) conteniendo una variedad en su arreglo de cámaras (biloculinas, triloculinas y quinqueloculinas). Del orden *Loftusiida* (25 %), se observó *Cuneolina Pavonea Parva* y *Dicyclina Schlumbergeri*.

Además, se observaron fragmentos de algas (5 %), restos de gasterópodos (40 %) y espículas de equinodermos.

Dichos microorganismos confieren tentativamente una edad de Cretácico superior a la secuencia Palo Amontonado. La secuencia estratificada interpretada, para dichas rocas, puede considerarse como parte de una secuencia ofiolítica.

Agradecimientos

Al ingeniero Luis Gustavo Chiquin Marroquin, por haber confiado y asesorado desde un inicio esta investigación. A la familia Sican, por el apoyo logístico en la aldea Palo Amontonado. Al Ing. Osmín Vásquez por la traducción del resumen al inglés.

Referencias bibliográficas

- Bosc, Eric. *Geology of the San Agustín Acasaguastlán Quadrangle and northeastern part of the El Progreso Quadrangle*. Thesis doctor of Philosophy. Rice University. Michigan, United States of America: School of Graduate Studies, 1938.
- Burkart, B. *Geology of the Esquipulas Chanmagua and Cerro Monte Cristo quadrangles*. Unpub. Ph.D. dissertation, Rice University, 1965.
- Chiquin Yoj, Mauricio. *Geología del cuadrángulo El Progreso*. Centro Universitario del Norte- Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala: Dirección General de Investigación, 2003.
- Donnelly, Thomas. Et. *Al. Northern Central America; The Maya and Chortis Blocks*. United States of America: The Geological Society of America, 1990.
- Gutiérrez Orrego, Axel. *Las formaciones geológicas en Guatemala*. Tesis Ingeniero Geólogo. Centro Universitario del Norte- Universidad de San Carlos de Guatemala. Cobán, Alta Verapaz. Guatemala: Carrera de Geología, 2008.
- Hirschmann, T. *Reconnaissance geology and stratigraphy of the Subinal Formation (Tertiary) of the El Progreso*. Unpub. M.A. thesis, Indiana University, 1963.
- MacKenzie, WS. *Atlas de rocas ígneas y sus texturas*. Barcelona, España: Editorial Masson, 1997.
- . *Atlas en color de rocas y minerales en lámina delgada*. Barcelona, España: Editorial Masson, 1997.
- Molina, Eustoquio. *Micropaleontología*. Zaragoza, España: Editorial Prensas Universitarias de Zaragoza, 2004.
- Nichols, Gary. *Sedimentology and stratigraphy*. Kingdom, England: Editorial Offices, 2009.

Pérez Bol, Edgar Rolando. *Léxico estratigráfico del bloque Chortí en Guatemala*. Tesis Ingeniero Geólogo. Centro Universitario del Norte-Universidad de San Carlos de Guatemala. Cobán, Alta Verapaz, Guatemala: Carrera de Geología, 2000.

Pettijohn, F.J. *Sedimentary rocks*. New York, United States of América: Editorial Harper and Row, 1975.

Reeves, T.K. *Geology of the southern half of the El Progreso Quadrangle, Guatemala*: M.S. thesis, Rice University, 1967.

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y CALIDAD DEL AGUA PARA ABASTECIMIENTO A COMUNIDADES RURALES UBICADAS EN LA MICROCUENCA DEL RÍO MAPACHÁ, DEPARTAMENTO DE BOACO, NICARAGUA

HYDROGEOLOGICAL CHARACTERIZATION AND WATER QUALITY FOR SUPPLY OF RURAL COMMUNITIES LOCATED IN THE MAPACHÁ RIVER MICRO-BASIN, DEPARTMENT OF BOACO, NICARAGUA

Raquel Izabá-Ruiz

Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua / Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua-Managua
(CIRA/UNAN-Managua).

raquel.izaba@cira.unan.edu.ni

RESUMEN

El estudio fue realizado en la microcuenca del río Mapachá, zona central de Nicaragua, con el objetivo de estimar la disponibilidad de agua subterránea para abastecimiento a las comunidades rurales asentadas en la misma, así como la calidad comparándola con los valores recomendados por la Norma Regional de Calidad del Agua para Consumo Humano de la CAPRE. Se realizó reconocimiento geológico, inventario de pozos y manantiales, mediciones de niveles freáticos, aforo de manantiales en junio, agosto y octubre de 2013, así como en febrero y marzo de 2014. Además, se realizaron dos muestreos en 10 puntos seleccionados para análisis fisicoquímico, bacteriológico, arsénico y piretroides en época lluviosa (nov-13) y seca (mar-14). La microcuenca presenta geología de roca fracturada, lo que permite almacenamiento de agua local, característico del tipo de acuífero fracturado predominante de la zona. Se identificaron 29 pozos excavados, un pozo perforado y 25 manantiales potenciales para abastecimiento de agua. Los resultados muestran que la demanda total de agua corresponde al 1 % de la recarga potencial al acuífero. A partir de 21 manantiales identificados que proveen el 57 % del suministro de agua, podría suplirse la demanda, cubriendo la dosis recomendada por la OMS de 100 l. persona⁻¹. día⁻¹ (0.100 m³. persona⁻¹. día⁻¹); es decir, presenta disponibilidad de agua subterránea para abastecer a la población. En cuanto a la calidad, el agua de la microcuenca es en general apta para consumo humano de acuerdo con las Normas CAPRE, siempre que las fuentes de agua se protejan para evitar la contaminación bacteriana.

Palabras clave: Calidad del agua, Disponibilidad de agua subterránea, Recarga Potencial, Normas CAPRE.

ABSTRACT

The study was conducted in the Mapachá River micro-basin, central zone of Nicaragua, with the goal of estimating the availability of groundwater for supplying of rural communities settled there, as well as the water quality comparing it with the recommended values by Water Quality Regional Standard for Human Consumption of CAPRE. A geological survey, an inventory of wells and springs, groundwater level measurements and spring flow capacity were carried out in June, August and October 2013, as well as in February and March 2014. In addition, two samples were taken in 10 selected points for physicochemical, bacteriological, arsenic and pyrethroid analysis in rainy (Nov-13) and dry (Mar-14) season. The micro-basin presents fractured rock geology, which allows local water storage, characteristic of the fractured aquifer type that predominates in the area. Twenty-nine excavated wells, a drilled well and 25 potential springs for water supply were identified. The results show that the total water demand corresponds to 1 % of the potential recharge to the aquifer. From 21 identified springs that provide 57 % of the water supply, the demand could be met, covering the WHO recommended dose of 100 l.person⁻¹.day⁻¹ (0.100 m³.person⁻¹.day⁻¹); that is, it presents groundwater availability to supply the population. In terms of quality, the water in the micro-basin is generally suitable for human consumption according to the CAPRE Standards, as long as the sources are protected to avoid bacterial contamination.

Key words: Water quality, Groundwater availability, Potential recharge, CAPRE Standards.

Introducción

Los estudios hidrogeológicos y la evaluación de la calidad del agua juegan un papel fundamental en la identificación de fuentes potenciales de agua para el desarrollo de las principales actividades económicas, como la agricultura, la industria y, principalmente, el abastecimiento para consumo humano; ya que una gran parte de la población a nivel mundial depende de las fuentes de agua subterráneas (Candel, Brooks, Sánchez-Murillo, Grader, & Dijkstra, 2016).

En la región centroamericana, las aguas subterráneas corresponden el 26 % (1,592 Mm³) del total de extracción de agua dulce utilizada para el desarrollo de las principales actividades económicas en los países del istmo (FAO, 2015). En Nicaragua, la principal fuente de agua está constituida por las aguas subterráneas, con un potencial de 2,959 Mm³.año⁻¹ (GWP, 2006), donde la mayor disponibilidad se encuentra en la zona del Pacífico debido a las características hidrogeológicas del medio poroso que facilita la infiltración y el almacenamiento de la misma (Fenzel, 1989; GWP, 2017; Losilla, M., Rodríguez, H., Schosinsky, G., Stimson, J., Bethune, 2001). Por otro lado, en la zona central del país predominan los medios fracturados con reservas para abastecimiento de agua principalmente para poblaciones rurales (Vammen et al., 2012).

A pesar de que Nicaragua cuenta con disponibilidad hídrica a nivel nacional, el acceso de sistemas de agua potable es bajo, sobre todo en la zona rural, donde solamente el 61 % de la población tiene acceso al agua para consumo humano (WHO-UNICEF, 2017).

Por otra parte, la falta de cobertura total de saneamiento en el área rural (36 %) (WHO-UNICEF, 2017) conlleva la práctica del fecalismo al aire libre, exponiendo las fuentes potenciales de agua a la contaminación por bacterias principalmente (Calderón, Flores, & Delgado, 2009; CIRA/UNAN-Managua & MARENA-PINCHAS, 2013).

Por lo anterior, es importante la realización de los estudios hidrogeológicos con la finalidad de identificar las fuentes potenciales con disponibilidad hídrica y a la vez evaluar la calidad de las mismas para, de esta forma, lograr la planificación, diseño e implementación del abastecimiento de agua en zonas rurales a través obras de captación y potabilización básica.

El presente estudio se desarrolló en la zona central de Nicaragua, específicamente en la microcuenca del río Mapachá, en el departamento de Boaco, donde se identificaron 11 comunidades con 1,875 personas en 375 viviendas. Las fuentes principales de abastecimiento de agua son los pozos y manantiales, con poca o nula protección de una estructura (brocal u obra de captación), encontrándose expuestos a la contaminación (Izabá-Ruiz, 2016).

El objetivo de la investigación consiste en la caracterización hidrogeológica con el fin de identificar fuentes potenciales de agua subterránea y a la vez, evaluar la calidad para consumo humano. Esta información base podría ser utilizada por los tomadores de decisiones locales y municipales, para crear estrategias de abastecimiento de agua para las poblaciones rurales asentadas en las microcuencas; así como, implementar medidas de protección de los recursos hídricos subterráneos para conservar su potencial y calidad.

Área de estudio

La microcuenca del río Mapachá está ubicada en el municipio de San Lorenzo, Departamento de Boaco; Nicaragua (Figura 1), con un área de 54 km² y se encuentran establecidas 1,875 personas (375 viviendas).

Las principales actividades económicas son la agricultura de granos básicos y la ganadería. La población se abastece de agua principalmente a través de manantiales (57 %) y pozos excavados (39 %). El consumo humano de agua es de 35,588 m³. Año⁻¹ y el consumo de agua por el ganado es de 33,753 m³. Año⁻¹ con una demanda total de 69,341 m³. Año⁻¹ (Izabá-Ruiz, 2016).

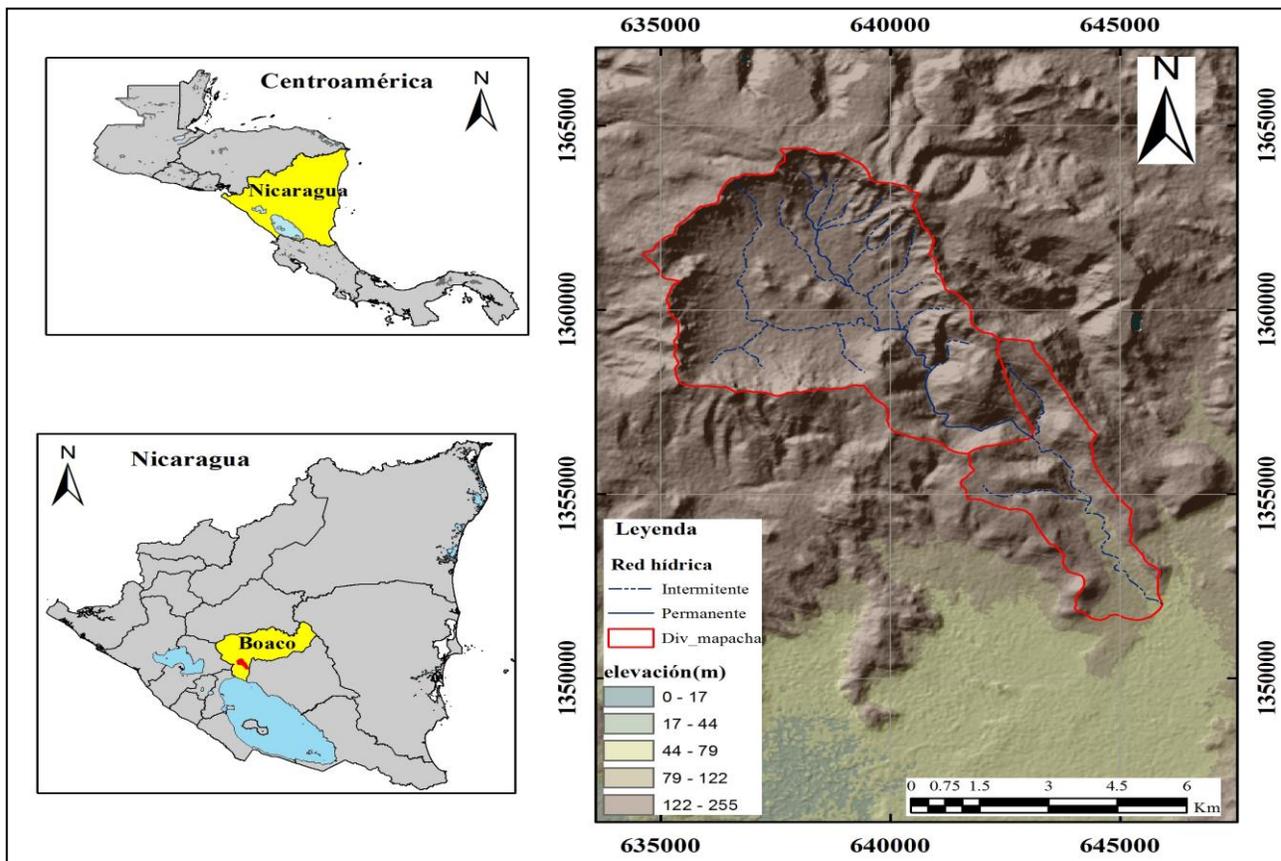


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio, microcuenca del río Mapachá.

El río Mapachá es el río principal en la microcuenca, con una longitud de 6 km, intermitente, solamente presenta caudal en la época lluviosa. La red hídrica de la microcuenca está representada por su río principal y 23 ríos tributarios, la mayoría de régimen intermitente solamente presentan caudal base en la época lluviosa, principalmente en los meses de septiembre y octubre (Izabá-Ruiz & García, 2018).

El clima del municipio es de sabana tropical (Köppen, 1936). Los registros climáticos del Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) reportan una precipitación media anual de 1,427 mm, con una temperatura media anual de 27.17 °C.

El tipo de orden de suelo predominante se compone de suelos molisoles, con un 93 % del área, y los suelos alfisoles con el 3 % del área ubicados en la parte baja de la microcuenca (Izabá-Ruiz, 2016). La geología predominante pertenece a la Provincia Geológica Central o Tierras Altas del Interior del grupo Coyol (Krásný & Hecht,

1989). Es una zona poco estudiada en cuanto a detalles geológicos e hidrogeológicos (Losilla, M. et al., 2001). De terreno abrupto a moderado hasta muy escarpado, con pendientes entre 15 y 75 %. Las rocas presentan fallas, fracturas y grietas, en la mayoría de los casos verticales abiertas, rellenas de materiales arcillosos, el cual reduce la posibilidad de recarga (Krásný & Hecht, 1989). De acuerdo al mapa Hidrogeológico del Pacífico de Nicaragua se caracteriza como un acuífero discontinuo poco profundo, producto de la meteorización y fisuración o fracturación; parcialmente cubierto por depósitos aluviales cuaternarios a lo largo de los ríos (Krásný & Hecht, 1989).

El balance hídrico superficial estimado en el período de junio de 2013 a marzo de 2014, indica que las mayores pérdidas de agua se producen por evapotranspiración real ($57,842,490 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$), escorrentía ($12,812,344 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$) y la recarga potencial ($5,742,986 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$) obteniéndose una disponibilidad hídrica superficial de $297,518 \text{ m}^3 \cdot \text{Año}^{-1}$ (Izabá-Ruiz & García, 2018).

Metodología

Reconocimiento geológico e hidrogeológico

Se realizó reconocimiento geológico identificándose unidades geológicas, tipos de rocas, fallas y fracturas, así como rumbo y buzamiento de las mismas. A la vez se realizó un inventario de pozos y manantiales.

Monitoreo en pozos

Se realizaron 5 campañas de monitoreo de niveles freáticos distribuidas en la época lluviosa 2013 (junio, agosto y octubre) y en la época seca 2014 (febrero y marzo), en los 29 pozos excavados y en un pozo perforado, identificados utilizando la sonda Solinst de 100 metros. A partir de los niveles freáticos se diseñó el mapa piezométrico en el software ARGIS 10.2, utilizando como datos representativos de las épocas lluviosas los datos de octubre de 2013, y secas, de marzo de 2014. Para realizar el mapa piezométrico, las equipotenciales se trazaron con la información de niveles piezométricos de los pozos ubicados en el material coluvial (caldera). En la parte media-baja se presentan solamente los niveles piezométricos de los ocho (8) pozos ubicados en el material andesita-basaltos.

Medición de caudales en manantiales

De los 25 manantiales identificados se realizaron mediciones de caudales en 21 de ellos en la época lluviosa de 2013 (agosto y octubre) y en la época seca de 2014 (febrero y marzo), utilizando el método volumétrico (Hudson, 1997).

Campaña de muestreo

Se desarrollaron dos campañas de muestreo, la primera en noviembre de 2013 (nov-13), correspondiente a la época lluviosa; y en marzo de 2014 (mar-14), correspondiente a la época seca. En cada una de las campañas de muestreo, se tomaron muestras en 6 manantiales (puntos 1-6), 3 pozos excavados (puntos 7-9) y 1 pozo perforado (punto 10). A estas muestras de agua se les realizó análisis fisicoquímico completo, microbiológico, de plaguicidas piretroides (solamente en el muestreo de época lluviosa en noviembre de 2013), y

metales pesados (Arsénico). Paralelamente al muestreo se realizaron mediciones de algunos parámetros *in situ* (pH, temperatura, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto). Esta actividad se realizó siguiendo los Procedimientos Operativos del Aseguramiento y Control de la Calidad del CIRA/UNAN (PROC), para la colecta, preservación, almacenamiento y transporte de muestras. Las muestras ingresaron a los laboratorios del CIRA/UNAN-Managua para los análisis: Físicoquímico completo en el laboratorio de aguas naturales; piretroides en el laboratorio de contaminantes orgánicos; arsénico en el laboratorio de contaminantes metálicos y microbiológico en el laboratorio de microbiología; siguiendo los métodos analíticos normalizados en el Procedimiento Operativo Normativo (PON) establecido en cada laboratorio del CIRA/UNAN-Managua.

Los resultados se compararon con la Norma Regional de Calidad del Agua para Consumo Humano del Comité Coordinador Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centroamérica, Panamá y República Dominicana (CAPRE, 1994).

Resultados

Geología

La microcuenca del río Mapachá (Figura 2), pertenece a la Provincia Volcánica Terciaria Central (Fenzel, 1989), predominan rocas volcánicas indiferenciadas del terciario o cuaternario (Losilla, M. et al., 2001), representado por lavas y piroclastos indiferenciados. Las principales rocas observadas son basaltos, flujos de lava piroclástica y andesitas-basaltos que descansan sobre las formaciones sedimentarias terciarias y están cubiertas por depósitos cuaternarios que rellenan las zonas planas y valles de los ríos (Fenzel, 1989; Krásný & Hecht, 1989).

La parte alta de la microcuenca se encuentra en una caldera volcánica inactiva conocida como caldera Las Lajas, que contiene basaltos intercalados con aglomerados (Fenzel, 1989), principalmente, rocas consolidadas tipo

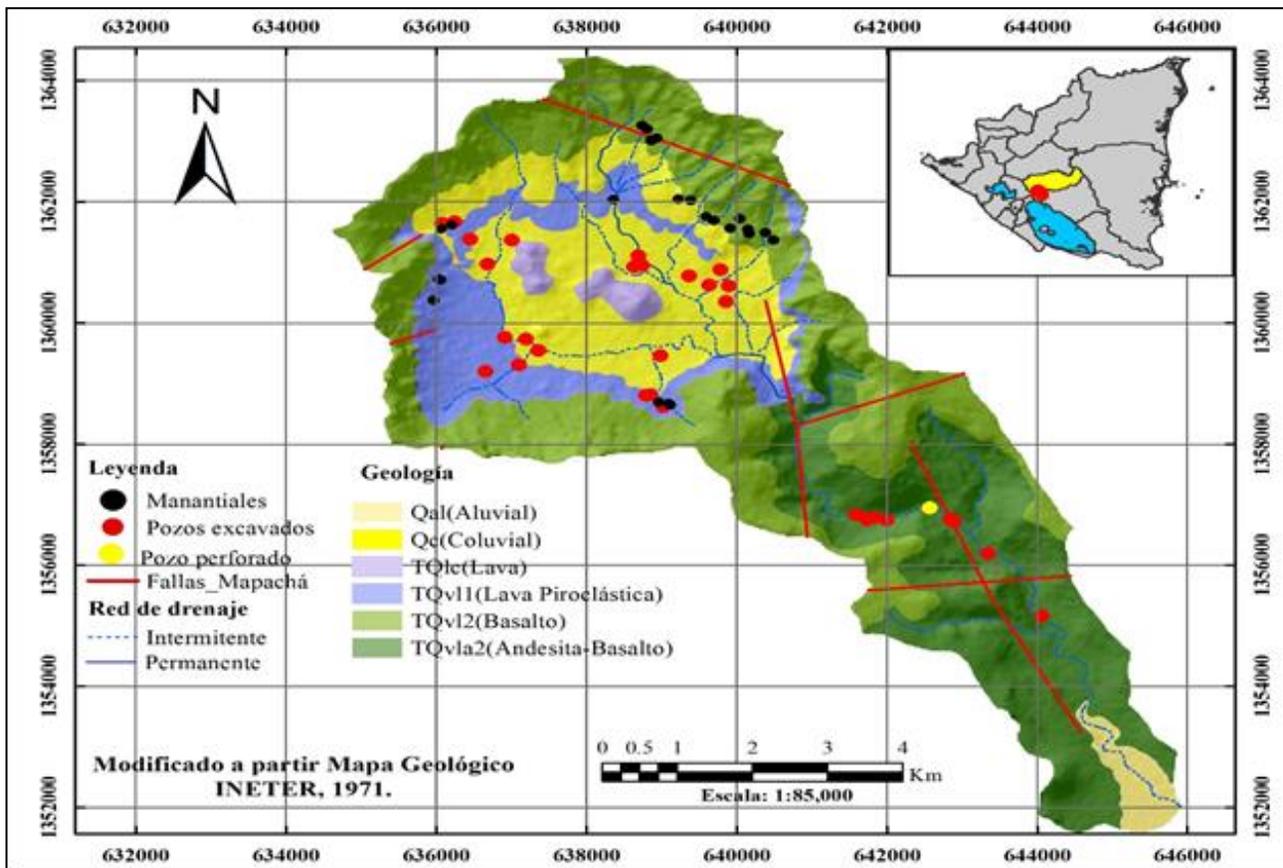


Figura 1. Mapa geológico y de fuentes de agua subterránea en la microcuenca del río Mapachá (modificado a partir de Izabá-Ruiz & García, 2018).

basalto, alteradas y fracturadas. Además, afloramiento de flujo de lava piroclástica consolidada con fractura S 46 E y N 55 E; presentando aluviones de arcilla.

En el flujo piroclástico (Figura 3a), se observan fragmentos de granos gruesos de grava y matriz de cenizas muy compactas con rumbo N 71 W y buzamiento 13 NW. En la Figura 3b se observa el cerro Monte Fresco, compuesto de flujo de lava consolidada, roca poco alterada de 150 m de espesor, identificados en la Figura 2 como TQlc (lava compacta). La parte plana de la caldera presenta coluviales del cuaternario (Qc), poco profundos, fragmentos de roca de granos gruesos a finos (Krásný & Hecht, 1989). En la parte NO superior de la caldera se identificaron aglomerados volcánicos compactos, compuestos de lavas basálticas en una matriz de ceniza basáltica (Figura 3c). El tamaño de los granos medio a gruesos; afectados por fracturas abiertas, rellenas de arena fina y arcillas (Krásný & Hecht, 1989), identificado en la Figura 2 como TQlv₂ (basaltos). En el NE den la caldera se

observa la formación de manantiales en el límite de la roca basáltica y el coluvial (Figura 3d). En la parte media de la microcuenca se observan afloramientos de roca piroclástica (Figura 3e), poco alterada con fractura de rumbo S 284 W y buzamiento 15 SW, así como falla de flujo de lava basáltica inclinada N 10 E y Rumbo N 40 W (Figura 3f). En la parte baja se identificaron rocas andesitas-basálticas, identificadas en la figura 2 como TQvla2 (andesita-basalto); observándose la roca completamente deformada y afectada por fallas, con planos en dos direcciones indicando una conjugación de fallas que se cortan en dirección predominante NW (Figura 3g). También, se observó fuerte deformación de la roca debido a la presencia de esfuerzos de fallas y fracturamiento paralelo en la zona con dirección predominante NE (Figura 3h). En la desembocadura del río Mapachá, el material presente es aluvial, conformado por arena, grava y arcilla (Fenzel, 1989) (Figura 3i), identificado en la figura 2 como Qal (aluvial).

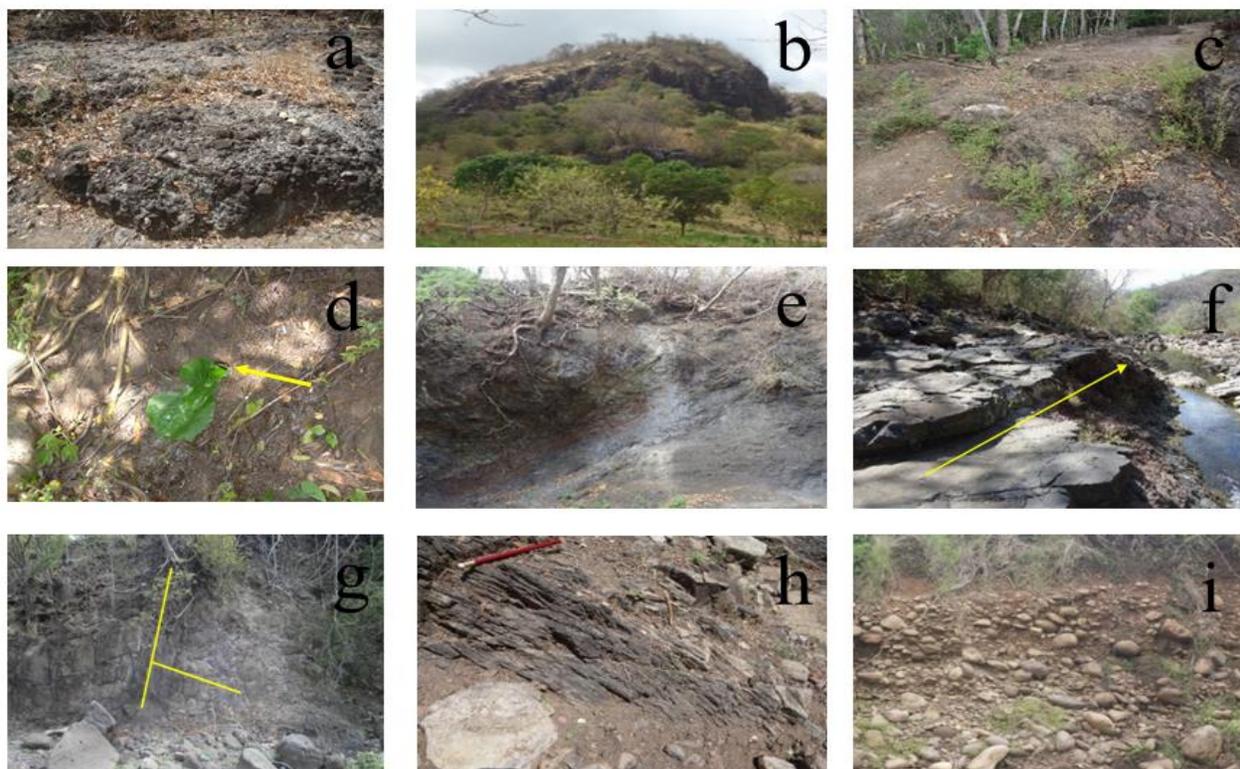


Figura 3. **a)** Flujo piroclástico con fragmentos de granos gruesos de lava. **b)** Cerro Monte Fresco (lava compacta). **c)** Aglomerados volcánicos compactos. **d)** Formación de manantial entre la roca basáltica y el coluvial. **e)** Afloramiento de roca piroclástica poco alterada. **f)** Falla de flujo de lava basáltica. **g)** Plano de dos direcciones indicando conjugación de fallas. **h)** Deformación de la roca por presencia de esfuerzo de fallas. **i)** Depósitos aluviales formados por arena, grava y arcilla.

Inventario de pozos y manantiales

Se identificaron 55 fuentes de agua subterráneas (Figura 2), de los cuales veintinueve son pozos excavados (PE), un pozo perforado (PP) y 25 manantiales (MN). Los PE que se concentran en la parte alta en la caldera (22 PE), se identificaron principalmente en el material coluvial y flujo de lava piroclástica, considerado medio poroso que presenta transmisividades entre $100-1000 \text{ m}^2 \cdot \text{día}^{-1}$ (Krásný & Hecht, 1989). En el material andesita-basáltica, en la parte baja de la microcuenca, considerado un medio fracturado con transmisividades entre $1-10 \text{ m}^2 \cdot \text{día}^{-1}$, se identificaron siete PE y un PP. Los pozos excavados y el perforado representan el 39 % del abastecimiento de agua en el área de estudio (Izabá-Ruiz, 2016).

Los sistemas de manantiales se encuentran ubicados en la parte alta-media de la microcuenca, principalmente en la roca basáltica (medio fracturado), donde se identificaron catorce manantiales. En el coluvial y flujo de lava piroclástica considerado un medio poroso se identificaron

11 manantiales más. En la época lluviosa, los caudales medidos oscilan entre 2.76 y $123.67 \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$ y en la época seca entre 1.18 y $105.28 \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$, obteniéndose mayores caudales en octubre de 2013 con 3.44 a $141.24 \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$, que corresponde a las mayores precipitaciones y recarga potencial del acuífero (Izabá-Ruiz & García, 2018).

Nivel freático y piezometría

Se realizaron mediciones de niveles freáticos en veintinueve pozos excavados y un pozo perforado. En la Figura 4 se presentan los niveles freáticos de oct-13 y mar-14.

En la época lluviosa, los valores mínimos y máximos registrados en oct-13 corresponden a 0.14 y 9.51 m . En la época seca en mar-14, los valores mínimo y máximo fueron de 0.96 y 11.08 m . El nivel freático máximo se refleja en el pozo Núm. 20 con 9.51 m en oct-13 y en el pozo Núm. 16 con 11.08 m en mar-14. En el material coluvial, que es un medio poroso con transmisividad de media a alta (Krásný & Hecht, 1989), se

encontraron niveles de agua cercanos a la superficie del terreno (pozo Núm. 5 con 0.14 m y pozo Núm. 7 con 0.34 m) ambos en oct-13. También en el medio fracturado se encontró nivel freático somero, específicamente en el pozo Núm. 23 con 0.33 m en oct-13. En el basalto-andesita (material fracturado), el nivel freático máximo se observa en el pozo perforado (pozo Núm. 26) con 7.91 m en oct-13 y 8.29 m en mar-14 respectivamente.

En el mapa piezométrico (Figura 5), se trazaron las líneas equipotenciales de oct-13 (época lluviosa) y de mar-14 (época seca). Se observó que las líneas piezométricas son de flujo local, siguiendo la topografía del terreno hacia el centro de la caldera, condicionado por la hidrodinámica del material poroso (coluvial), debido a que es considerado homogéneo y con mayor permeabilidad (Fenzel, 1989; Krásný & Hecht, 1989; Losilla, M. et al., 2001).

Disponibilidad de agua subterránea

Para determinar la demanda de agua de las viviendas, se consideró el consumo humano ($18.98 \text{ m}^3 \cdot \text{persona}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) y el consumo por el ganado ($90.008 \text{ m}^3 \cdot \text{vivienda}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) (Izabá-Ruiz, 2016), obteniendo una demanda por consumo humano de $35,588 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ y una demanda por consumo del ganado de $33,753 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$, ambos suman una demanda total de $69,341 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ (Tabla 1).

Tabla 1. Demanda de agua en las viviendas, microcuenca del río Mapachá

Tipo de fuente de agua subterránea	Número de Población	Número de Viviendas	Demanda consumo humano $\text{m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$	Demanda por ganado $\text{m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$	Demanda total $\text{m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$
Manantiales	1,190	238	22,586	21,422	44,008
Pozos	685	137	13,001	12,331	25,332
Suma	1,875	375	35,588	33,753	69,341

A partir de los resultados del balance hídrico superficial del período de jun-13 a mar-14, en Izabá-Ruiz & García (2018) se considera la recarga potencial (Rp) de $5,742,986 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ como la única entrada al sistema de agua subterránea. Los resultados indican que la demanda de agua en ese período corresponde al 1 % de la recarga

potencial estimada, logrando una disponibilidad después de la demanda de $5,673,646 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ (Tabla 2).

Calidad del agua subterránea

Los resultados de las muestras de agua subterráneas (Figura 6) se evaluaron con los valores recomendados por la Norma Regional de Calidad del Agua Para Consumo Humano (CAPRE, 1994). Los bicarbonatos (HCO_3^-), Oxígeno disuelto (OD) y la alcalinidad no tienen valores de referencia dentro de las normas CAPRE, sin embargo, se consideran en este estudio como indicadores de calidad del agua. De manera general, las características fisicoquímicas (color, turbidez, pH, Sólidos Totales Disueltos (STD), cationes, aniones, alcalinidad, dureza y hierro total presentaron valores en las aguas subterráneas aptas para consumo humano al compararlas con la Norma CAPRE (1994); con excepción de algunos parámetros, como Conductividad Eléctrica (CE), calcio (Ca^{2+}), Magnesio (Mg^{2+}), dureza, nitratos (NO_3^-), amonio (NH_4^+) y cloruros (Cl^-), que presentaron valores por encima a los recomendados por la Norma (CAPRE, 1994), en algunos puntos de muestreo, tanto en la época lluviosa (nov-13) como en la época seca (mar-14).

Los valores de CE oscilan entre $258-1,301 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ en el muestreo de nov-13 y $129.8-1,240 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ en mar-14. Estos valores se encuentran dentro del valor establecido por

Tabla 2. Disponibilidad hídrica de agua subterránea estimada en el período de junio 2013 a marzo 2014

Recarga potencial en $\text{m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$	Demanda total $\text{m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$	Disponibilidad después de la Demanda $\text{m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$
5,742,986	69,341	5,673,646

la Norma CAPRE ($400 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) a excepción de los puntos 5, 7, 8, 9, 10 respectivamente. El punto 7 (PE) presenta los valores de CE más altos de todos los puntos analizados, con $1,301 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ para el muestreo de nov-13 y $1,240 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ para el muestreo de mar-14.

Los valores de (Ca^{2+}) oscilan entre 70.07 y 278.22 mg. l⁻¹ de CaCO_3 en nov-13. En mar-14, los valores

oscilan entre 59.45 y 267.63 mg. l⁻¹ de CaCO_3 . La mayoría de los puntos de muestreo (puntos 2, 5, 7, 8, 9 y 10) no cumple con el valor establecido por la norma CAPRE (100 mg. l^{-1} de CaCO_3). Al igual que el Mg^{2+} , en los puntos 5, 7, 8, 9, 10 supera al valor máximo admisible de la norma (50 mg. l^{-1} de CaCO_3).

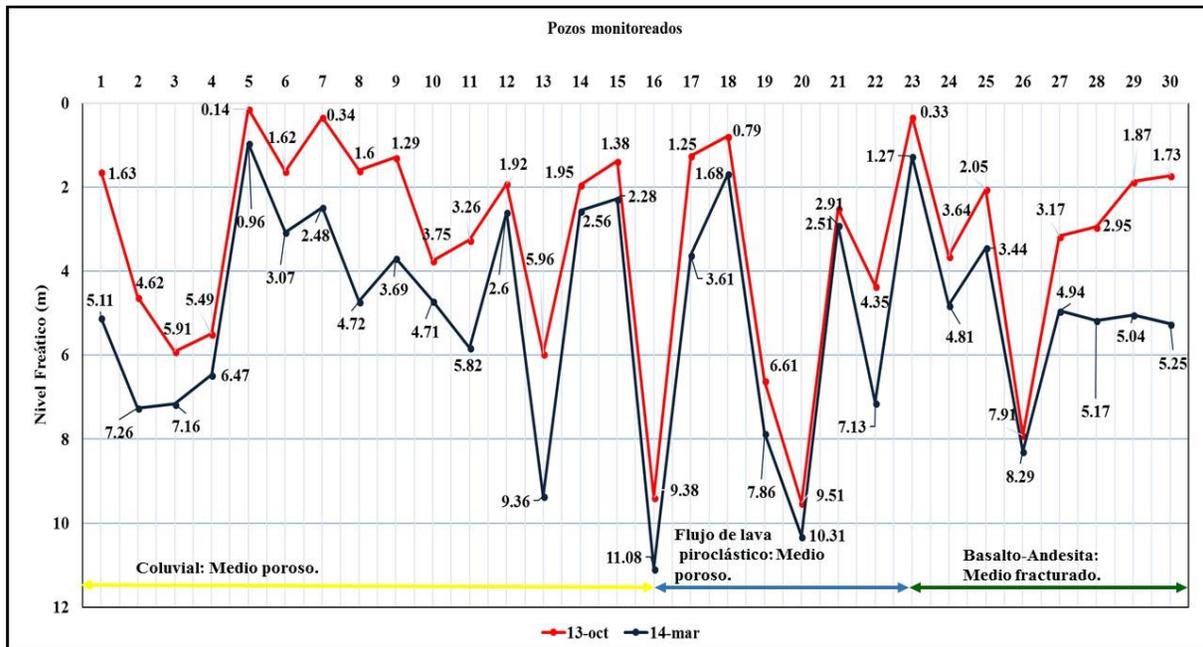


Figura 4. Niveles freáticos en el mes de octubre de 2013 y marzo de 2014.

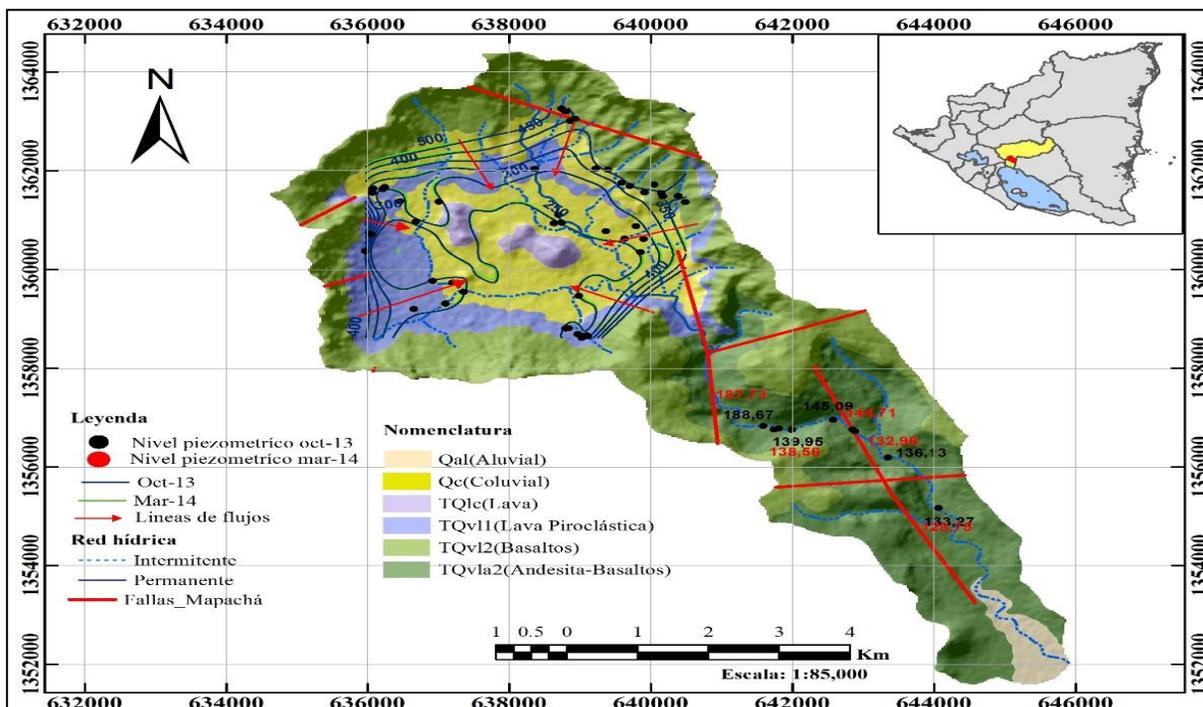


Figura 5. Mapa piezométrico con las líneas equipotenciales de oct-13 y mar-14, indicando las líneas de flujo. Modificado a partir de Izabá Ruiz, 2016.

Los resultados de dureza total para ambos muestreos se encuentran dentro del valor recomendado por la Norma (400 mg.l⁻¹); clasificando las aguas como aguas duras, ya que presentan valores entre 121 y 180 mg. l⁻¹ (Hem, 1985); con excepción a los puntos 7, 8 y 10 que mostraron valores mayores a 180 mg. l⁻¹, por lo que fueron consideradas como aguas muy duras. En relación con la alcalinidad, se clasifica de media a alta (valores de referencia (Kevern, 1899) de 75-150 mg. l⁻¹); presentando los mayores valores de alcalinidad el punto 7 (312.05 mg. l⁻¹ en nov-13 y 250.05 mg. l⁻¹ en mar-14) y el punto 8 (338 mg. l⁻¹ en nov-13 y 250 mg. l⁻¹ en mar-14).

Los valores de OD oscilan entre 0.92 y 3.90 mg. l⁻¹ en el muestro de nov-13 y en el muestreo de mar-14, 1.48-6.83 mg. l⁻¹; a la vez presenta valores de HCO₃⁻, entre 146.45 y 412.50 mg. l⁻¹ en el muestreo de nov-13 y entre 161.09 y 305.10 mg. l⁻¹ en el muestreo de mar-14. Por otro lado, los NO₃⁻ presentan concentraciones entre 1.88 y 31.88 mg. l⁻¹ (nov-13) y entre 1.56 y 47.08 mg. l⁻¹ (mar-14). Las mayores concentraciones de NO₃⁻ se encuentran en el punto 7 con 31.88 en nov-13 y 47.08 mg. l⁻¹ en mar-14. Los nitritos (NO₂⁻) presentan concentraciones entre 0.001 y 0.010 mg. l⁻¹ en nov-13 y entre 0.002 y 0.010 mg. l⁻¹ en mar-14, encontrándose por debajo del máximo valor admisible (3.0 mg. l⁻¹) según las normas (CAPRE, 1994), para ambas épocas de muestreo. El NH₄⁺ se presenta en concentraciones entre 0.02 y 0.16 mg. l⁻¹ (nov-13); y entre 0.0002 y 0.102 mg. l⁻¹ (mar-14). En nov-13, los puntos 1, 6, 7, 8 y 9 presentan concentraciones mayores al valor máximo admisible (0.5 mg. l⁻¹) de la norma CAPRE. En el

muestreo de mar-14, solamente el punto 9 presenta las concentraciones de NH₄⁺ por arriba del valor máximo admisible por la Norma. Por otro lado, las concentraciones de hierro total en todos los puntos de muestreo se encuentran dentro del valor máximo admisible por la Norma (0.3 mg. l⁻¹).

Las concentraciones de Cl⁻ varían entre 6.0 y 202.5 mg. l⁻¹ en el muestreo de nov-13 y entre 5.7 y

184.3 mg. l⁻¹ en mar-14. El punto 7 es el que presenta los valores más altos.

Los resultados microbiológicos de ambos muestreos indican la presencia de Coliformes Totales (CT) y *E. Coli*. En nov-13, el punto 3 presenta la mayor contaminación de origen fecal con concentraciones de 1,700 NMP.100 ml⁻¹ de CT, *E. Coli* con 220 NMP.100 ml⁻¹. En cuanto a los puntos 7 y 8, ambos con 4,900 NMP.100 ml⁻¹ de CT; y los máximos valores de *E. Coli* se encontraron en el punto 10 con 2,300 NMP.100 ml⁻¹. En el muestreo de mar-14, los sitios que presentaron mayor contaminación son los puntos 3, 7, 8, 9 y 10.

Los máximos valores de CT se encontraron en el punto 9 con 2,300 NMP.100 ml⁻¹ y *E. Coli* en el punto 10 con 490 NMP.100 ml⁻¹, con una disminución con relación al muestreo de nov-13 de 1,810 NMP.100 ml⁻¹ respectivamente.

Los resultados encontrados en el análisis del arsénico (As) en los puntos seleccionados fueron menores que el límite de detección (<2. 02μg.l⁻¹). Por otro lado, los resultados del análisis de piretroides (cipermetrina) en el muestreo de nov-13, fueron de analizados no detectados (AND). Por lo tanto, se decidió no realizar análisis de piretroides en el muestreo de mar-14.

Discusión

Geología e inventario de pozos y manantiales

La geología predominante y el sistema de fallas identificados constituyen el indicador de las características hidrodinámicas de acuíferos discontinuos, fracturados y pocos profundos, y está clasificado en el Mapa Hidrogeológico e Hidrogeoquímico del Pacífico de Nicaragua (Krásný & Hecht, 1989). El material coluvial y el flujo de lava piroclástica, por ser medios porosos, son considerados buenos acuíferos (Krásný & Hecht, 1989; Losilla, M. et al., 2001), por tal razón es donde se

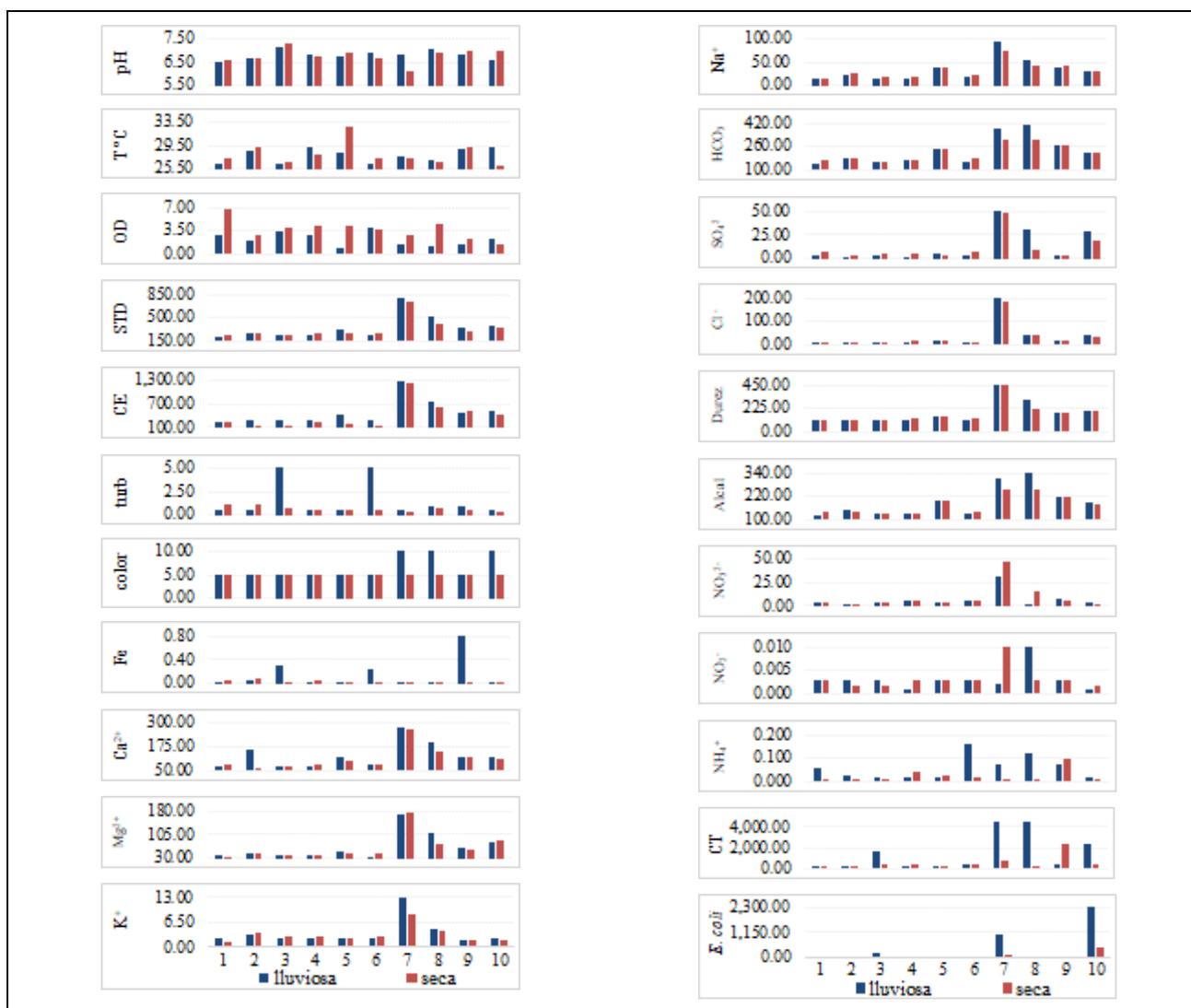


Figura 6. Resultados del análisis físicoquímico y bacteriológico del muestreo de época lluviosa (nov-13) y época seca (mar-14) de los 10 puntos seleccionados. pH (unidades de pH); T °C; CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$); Color ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (Pt-Co)); Turbidez (UTN); Dureza, Ca^{++} , Mg^{++} en $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ de CaCO_3 ; OD, STD, Fe-total, K, Na, HCO_3^- , SO_4 , Cl^- , Alcalinidad, NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ en $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$. CT y *E. coli* NMP.100ml⁻¹.

identificaron veintitrés pozos de treinta pozos inventariados.

En la parte media-baja de la microcuenca, en el material andesita-basáltica considerado medio fracturado únicamente se identificaron siete pozos excavados y uno perforado; con disponibilidad de agua para abastecer a 175 personas (35 viviendas). A pesar de ser medios fracturados (Fenzel, 1989; Losilla, M. et al., 2001), almacenan agua a través de la porosidad secundaria en diferentes fallas y fracturas, considerándolos como potenciales fuentes de agua (Díaz et al., 2009), ya que las fallas son los principales

conductos de flujo de agua en rocas con bajas permeabilidad (Ettazarini, 2007).

El brote de manantiales en la roca basáltica es característico de los medios fracturados (Jacobson & Langmuir, 1974; Manga, 1999; Vargas, 2002). Los manantiales son de régimen permanente, conservan su caudal durante todo el año y constituyen la principal fuente de agua que brinda abastecimiento a 1,190 personas (238 viviendas que representan el 57 % de la población) asentadas en la parte alta de la microcuenca. Según la clasificación de manantiales de acuerdo a su caudal por el

método de Menizer citado por Vargas (2002), el caudal de los manantiales identificados se clasifican entre la tercera (28.3 a 283 l.s⁻¹) y quinta (0.631 a 6.31 l.s⁻¹) categoría, es decir, de bajos caudales; sin embargo, presentan disponibilidad para el abastecimiento de la población establecida en el área de estudio.

Nivel freático y piezometría

El comportamiento de los niveles freáticos del agua, tanto en oct-13 como en mar-14, es característico del tipo de acuíferos fracturados, discontinuos y pocos profundos de esta zona (Arumí, Rivera, Muñoz, & Billib, 2012; Fenzel, 1989). En el flujo de lava piroclástica, los niveles de agua (con niveles hasta 10.31 m en mar-14) se comportan similares a los del medio poroso, debido a que contienen los mejores depósitos de agua en el país (Losilla, M. et al., 2001).

El movimiento del agua se encuentra condicionado por la topografía del terreno y por las características del material coluvial, considerado homogéneo y con mayor permeabilidad (Losilla, M. et al., 2001). Se puede observar que el flujo es local y se concentra hacia el centro de la caldera. En el centro identificado como TQlc (lava) en la Figura 5, las líneas de flujo se distorsionan, esto se debe al efecto de una barrera hidráulica que ejerce la lava compacta (Calder, 2002; Pujades, López, Carrera, Vázquez-Suñé, & Jurado, 2012). En general se puede observar en la Figura 5 que las líneas de flujos (oct-13 y mar-14) no presentan significativa variación estacional (Vouillamoz, Valois, Lun, Caron, & Arnout, 2016).

Disponibilidad de agua subterránea

Considerando que los manantiales representan la fuente más importante de abastecimiento y a la vez suministran agua a 1,190 personas (238 viviendas), se realizó un análisis de cómo podrían los manantiales abastecer a la población, contemplando: ubicación de los manantiales, caudal promedio entre el mes con mayor y menor caudal (oct-13 y mar-14); y el número de personas que habitan en las comunidades cercanas. Para determinar

la demanda total se calculó la demanda por consumo humano, más la demanda por el ganado. La demanda de consumo humano se estimó a partir de la dosis recomendada por la OMS de 100 l. persona⁻¹.día⁻¹ (ONU, 2010) equivalente a 0.100 m³.persona⁻¹.día⁻¹. Para la demanda de agua del ganado se consideraron los datos de la Tabla 2, que corresponde a 90 m³. año⁻¹ equivalente a 21,422 m³. Año⁻¹. vivienda⁻¹. En el análisis no se incluyó a la población que se abastece de pozos (generalmente ubicados dentro del terreno de las viviendas o cercanas a ellas) puesto que se observaron condiciones satisfactorias de acceso al agua.

Se puede observar que el abastecimiento de la población de consume agua de los manantiales corresponde al 27 % (65,217 m³. año⁻¹) de la capacidad de descarga de los mismos, quedando una reserva de agua después de la demanda de 172, 325 m³. año⁻¹ (Tabla 3). Esto significa que existe una disponibilidad de agua en el área de estudio que podría abastecer a la población con la dosis recomendada por la OMS (ONU, 2010) para cubrir sus necesidades básicas. Con excepción de la comunidad de Las Lajas (MN-1, MN-2 y MN-5), que presentó un déficit de 7,225 m³. año⁻¹. Sin embargo, este déficit se cubriría con la disponibilidad después de la demanda (28,865 m³. año⁻¹) de MN-3 y MN-4. La distribución podría ser a través de obras de captación por gravedad que permitan llevar el agua por tuberías hasta los terrenos de las viviendas. Por otra parte, se encuentra una disponibilidad de los manantiales ubicados en la comunidad El Aguacate (MN-21, MN-22 y MN-23) que son fuentes potenciales de abastecimiento de agua.

Calidad del agua para consumo humano

En términos generales, el agua subterránea en el área es apta para consumo humano de acuerdo a los parámetros fisicoquímicos evaluados con las Normas CAPRE (1994) a excepción de algunos parámetros que presentaron concentraciones por encima de los valores recomendados en los puntos 7, 8, 9 y 10.

Los valores de CE arriba de los $400 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ sugieren que es debido al aumento en las sales disueltas (Hem, 1985), reflejado en el valor de STD, principalmente en el punto 7 (Figura 6). Otro indicador del aumento de este parámetro está asociado a los desechos sólidos provenientes de la ganadería y antropogénicos (UNESCO, 1985), debido a que estos pozos se encuentran ubicados cercanos a corrales o letrinas (Izabá-Ruiz, 2016).

Con relación a la dureza total (Figura 6), los altos valores encontrados están relacionados con la composición mineralógica de la roca predominante (basaltos), en vista de que son rocas ricas en Ca^{+2} y Mg^{+2} (Appelo & Postma, 2005; Gíslason, Arnórsson, & Armannsson Halldór, 1996). A pesar de que los valores de dureza se encuentran dentro de los recomendados por la Norma CAPRE (1994), las aguas duras a muy duras representan peligro para la salud, puesto que, en otros estudios se ha demostrado que el consumo de aguas con valores de durezas superiores a $120 \text{mg}\cdot\text{l}^{-1} \text{CaCO}_3$ podría aumentar el riesgo de padecer de cálculo en las vías urinarias (D., Alfaro, N., Portugués, C., & Peinador, 2000). En el caso de los puntos 7, 8 y 10 que presentaron agua duras a muy duras, se determina que no son aptas para consumo humano, por tal razón se recomienda utilizar fuentes potenciales de abastecimiento más cercanas. Las concentraciones de OD se pueden considerar aceptables en agua subterránea. En otros estudios se han encontrado valores de OD en acuíferos libres entre $1\text{-}7 \text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (Chen & Liu, 2003); por otro lado, los altos valores de alcalinidad están relacionados con la presencia del HCO_3^- , que es el anión predominante con valores de pH entre 6,0 y 8,5 unidades de pH (Appelo & Postma, 2005). Estos valores concuerdan con el tipo hidroquímico prevalente en la zona Bicarbonatada-Cálcico-Magnésico ($\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$) y Bicarbonatada-Cálcica-Sódica ($\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$) encontradas en Izabá-Ruiz (2016) y en Mapa hidrogeológico e Hidrogeoquímicos del Pacífico de Nicaragua (Krásný & Hecht, 1989). El tipo hidroquímico Bicarbonatada-Cálcica-Sódica ($\text{HCO}_3\text{-Ca-Ma}$), probablemente está relacionado con los valores de CE

mayores a $400 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (Hilberg, 2016) encontrados en los puntos 7, 8, 9 y 10 respectivamente (Figura 6). Aunque las concentraciones de NO_3^- en el punto 7 se encuentran un poco por debajo del valor máximo recomendado ($50 \text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$), por lo que sugieren la influencia de actividades antropogénicas en el acuífero (Hilberg, 2016). En este caso la ubicación de corrales para ganado y letrinas aguas arriba del pozo, considerando que el nivel freático promedio de este pozo es de 2.58 m; es un factor que indica que el pozo está expuesto a la contaminación por lixiviados (Canter, 1997).

Esto representa problemas para la salud, principalmente en los bebés, puesto que podría aumentar el riesgo de padecer de metahemoglobinemia o síndrome del bebe azul (Canter, 1997; Majumdar & Gupta, 2015).

Las concentraciones de NO_2^- encontradas en este estudio son comunes en agua subterránea, normalmente más bajas que las de NO_3^- (Appelo & Postma, 2005; Canter, 1997). A pesar de que las concentraciones de NH_4^+ en algunos puntos de muestreo son mayores que el valor máximo admisible de la Norma CAPRE (1994), no representa problemas de contaminación. Se consideran como riesgo de contaminación en agua subterráneas, las concentraciones de NH_4^+ en el orden de $1\text{-}10 \text{mmol}\cdot\text{l}^{-1}$ equivalentes a $18\text{-}180 \text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (Böhlke, Smith, & Miller, 2006). Las concentraciones de Cl^- en ambos muestreos en el punto 7, podrían estar asociadas al incremento de las sales disueltas por la evapotranspiración en la zona no saturada (Jacobson & Langmuir, 1974), debido a que la evapotranspiración en el área de estudio representa la mayor pérdida de agua que corresponde al 75 % de la precipitación (Izabá-Ruiz & García, 2018).

La presencia de bacterias en el agua subterránea de los puntos monitoreados indica que las aguas no son aptas para consumo humano de acuerdo a las Normas CAPRE (1994). La presencia de *E. Coli* es un indicador de contaminación de origen fecal y es abundante en heces de animales y humanos (OMS, 2006). De acuerdo a la caracterización socio-ambiental en Izabá-Ruiz (2016), del

10 % de la población que no tiene letrina, el 36 % practica el fecalismo al aire libre. Otra causa de la contaminación bacteriológica es la ubicación de las letrinas con respecto a las fuentes de agua, el 36 % de las viviendas tienen ubicadas las letrinas aguas arriba de la fuente principal y un 10 % tienen ubicadas las letrinas paralelas a las fuentes de agua. Una consecuencia de la contaminación por bacterias en los pobladores del área de estudio es la incidencia de diarrea (33 %) de las enfermedades relacionadas con el agua (Izabá-Ruiz, 2016).

Por otro lado, se observó que las principales fuentes de abastecimiento de agua no presentaban cercas de protección adecuadas, por lo que la fuente de agua está expuesta a la contaminación por bacterias.

Los resultados de As se presentaron menores que el límite de detección ($2.02 \mu\text{g. l}^{-1}$) para este parámetro. Según la Norma CAPRE (1994), el valor máximo admisible de As en agua para consumo humano es de $10 \mu\text{g. l}^{-1}$. Por lo general, el As se presenta de manera natural en agua entre 1 y $2 \mu\text{g. l}^{-1}$, estas concentraciones son aceptables, sin embargo, concentraciones mayores que

Tabla 3. Distribución de la disponibilidad hídrica en los manantiales identificados en el periodo de junio 2013 a marzo 2014.

Comunidad de ubicación manantial	Comunidad (Total de viviendas que abastece) [Total de habitantes]	Manantial inventariado	N	E	Caudal promedio $\text{m}^3. \text{año}^{-1}$	Demanda Total $\text{m}^3. \text{año}^{-1}$	Disponibilidad después de la demanda $\text{m}^3. \text{año}^{-1}$
La Pita	La Pita (20) [100]	MN-3	638867	1363007	34,315	5,450	28,865
		MN-4	638935	1363051			
	Las Lajas (107) [535]	MN-1	638741	1363262	21,933	29,158	-7,225
		MN-2	638864	1363024			
		MN-5	638805	1363204			
El Aguacate	El Aguacate (41) [205]	MN-12	639589	1361756	27,501	11,173	16,328
		MN-13	639700	1361690			
		MN-14	639913	1361565			
		Mn-15	640048	1361722			
		MN-16	640151	1361549			
	El Caribe (45) [225]	MN-18	640385	1361490	44,665	12,263	32,402
		MN-21	640488	1361366	27,371		27,371
		MN-22	639391	1362023			
		MN-23	639223	1362044			
Las Guabas	Las Guabas (1) [5]	MN-7	636067	1361553	3,434	633	2,802
La Güebe	La Güebe (8) [40]	MN-8	636037	1360722	60,595	2,180	58,415
		MN-9	636042	136720			
		MN-10	635964	1360374			
		MN-25	636055	1360712			
La Uva	La Uva (16) [80]	MN-19	638967	1358689	17,726	4,360	13,366
		MN-20	639091	1358670			
Total	(238) [1,190]	21			237,542	65,217	172,325

12 $\mu\text{g. l}^{-1}$ se consideran perjudiciales para la salud humana (Gorchev & Ozolins, 2011).

A pesar de que en la caracterización socio-ambiental de Izabá-Ruiz (2016), la cipermetrina tiene el 24 % de los agroquímicos más utilizados en el área de estudio, no se detectó en el análisis de aguas subterráneas. Las razones probables de no detectar piretroides (cipermetrina) es por su baja solubilidad en agua, por ser extremadamente hidrofóbica y por su fuerte absorción en la superficie del suelo (Akbar, Sultan, & Kertesz, 2014; Jones, 1995).

Conclusiones

La geología predominante encontrada es característica de la hidrodinámica de la roca fracturada, ya que permite el almacenamiento del agua a través de fallas y fracturas (porosidad secundaria), manifestándose principalmente en la formación o descarga de manantiales, que son la fuente principal disponible para el abastecimiento de agua en el área de estudio.

La microcuenca presenta una disponibilidad hídrica subterránea que puede suministrar agua a la población con la dosis óptima propuesta por la OMS de 100 l. persona⁻¹. día⁻¹ (0.100 m³. persona⁻¹. día⁻¹) para cubrir principalmente las necesidades básicas de consumo humano, así como para el ganado, siempre que se practiquen medidas de gestión de los recursos hídricos

En cuanto a la calidad, el agua subterránea es apta para consumo humano en los parámetros recomendados por la Normas CAPRE, siempre que se protejan las fuentes de agua de la contaminación bacteriológica a través de obras de captación y potabilización básica (clorado), con excepción de los puntos 7, 8 y 10, principalmente por su alta dureza y contaminación por lixiviados (punto 7), donde la población podría abastecerse de las fuentes alternativas más cercanas.

Agradecimientos

Al CIRA/UNAN-Managua y al Programa de Maestría Regional Centroamericana en Ciencias del Agua

con énfasis en Calidad del Agua, bajo el marco del proyecto: “Manejo Comunitario de Agua en Nicaragua y Centroamérica”, por haber financiado y apoyado la presente investigación de tesis de maestría; en especial a mi tutora la MSc. Valeria Delgado Quezada y a mi asesora MSc. Selvia Flores Sánchez, por su incondicional apoyo y colaboración.

Referencias

- Akbar, S., Sultan, S., & Kertesz, M. (2014). Determination of Cypermethrin Degradation Potential of Soil Bacteria Along with Plant Growth-Promoting Characteristics. *Current Microbiology*, 70(1), 75–84. <https://doi.org/10.1007/s00284-014-0684-7>
- Appelo, C. a J., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, Groundwater and Pollution* (2ND Editio). Amsterdam, the Netherlands: A.A. Balkema Publishers, Leiden, The Netherlands a member of Taylor & Francis Group ple.
- Arumí, J., Rivera, D., Muñoz, E., & Billib, M. (2012). Interacciones entre el agua superficial y subterránea en la región del Bío Bío de Chile. *Obras y Proyectos*,
- Böhlke, J. K., Smith, R. L., & Miller, D. N. (2006). Ammonium transport and reaction in contaminated groundwater: Application of isotope tracers and isotope fractionation studies. *Water Resources Research*, 42(5), 1–19.
- Calder, I. R. (2002). Forests and Hydrological Services: Reconciling public and science perceptions. *Land Use and Water Resources Research*, 2, 1–12.
- Calderón, H., Flores, Y., & Delgado, V. (2009). Evaluación de la Disponibilidad y Calidad de los Recursos Hídrico en San Juan del Sur. *Universidad y Ciencia*, 53–59.
- Candel, J., Brooks, E., Sánchez-Murillo, R., Grader, G., & Dijkma, R. (2016). Identifying groundwater

- recharge connections in the Moscow (USA) sub-basin using isotopic tracers and a soil moisture routing model. *Hydrogeology Journal*, 24(7), 1739–1751.
- Canter, L. W. (1997). *Nitrate in groundwater*. Lewis Publisher.
- CAPRE. (1994). *Normas de Calidad del Agua para Consumo Humano*. (P. y república D. Comité Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centroamerica, Ed.) (Primera ed).
- Chen, W. F., & Liu, T. K. (2003). Dissolved oxygen and nitrate of groundwater in Choshui Fan-Delta, western Taiwan. *Environmental Geology*, 44(6), 731–737.
- CIRA/UNAN-Managua, & MARENA-PINCHAS. (2013). *INFORME FINAL Estudio de Calidad y Disponibilidad de los Recursos Hídricos en la Subcuenca del Río Viejo*. Managua, Nicaragua.
- D., Alfaro, N., Portugués, C., & Peinador, M. (2000). Cálculos en las vías urinarias y su relación con el consumo de calcio en el agua de bebida en Costa Rica.e. *Revista Costarricense Salud Pública*, 61–70.
- Díaz, E., Contreras, N., Pinto, J., Velandia, F., Julio, C., & Hincapie, G. (2009). Evaluación Hidrogeológica preliminar de las unidades geológicas de la mesa de Los Santos, Santander. *Boletín de Geología*, 31, 61–70.
- Ettazarini, S. (2007). Groundwater potentiality index: A strategically conceived tool for water research in fractured aquifers. *Environmental Geology*, 52(3), 477–487.
- FAO. (2015). TABLA 9 Extracción de agua por origen del agua e indicador de agua de los ODM Water withdrawal by source of water and MDG water indicator Agua dulce primaria y secundaria Primary and secondary freshwater Total región Total region.
- Fenzel, N. (1989). Nicaragua- Geografía, Clima, Geología e Hidrología.pdf.
- Gíslason, S., Arnórsson, S., & Armannsson Halldór. (1996). Chemical Weathering of basalt in Soutwest Iceland: Effect of runoff, age, of rocks and vegetative/glacial cover. *American Journal of Science*, 296, 837–907.
- Gorchev, H. G., & Ozolins, G. (2011). WHO guidelines for drinking-water quality. *WHO Chronicle*, 38(3), 104–108.
- GWP. (2006). *Situación de los Recursos Hídricos en Centroamérica: Hacia Una Gestión Integrada* (3 ed). San José, Costa Rica. Retrieved from www.gwpcentroamerica.org
- GWP. (2017). La situación de los recursos hídricos en Centroamérica: Hacia una gestión integrada, 79–88.
- Hem, J. D. (1985). *Study and Interpretation the Chemical of Natural of Characteristics Water*. (USGS, Ed.).
- Hilberg, S. (2016). Review: Natural tracers in fractured hard-rock aquifers in the Austrian part of the Eastern Alps—previous approaches and future perspectives for hydrogeology in mountain regions. *Hydrogeology Journal*, 24(5), 1091–1105.
- Hudson, N. . (1997). *Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía*. *Boletin de Suelo FAO N°68*. Roma: FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Izabá-Ruiz, R. (2016). *Potencial hídrico y calidad del agua asociado con las condiciones socio-ambientales en la microcuenca del río Mapachá,municipio de San Lorenzo, departamento de Boaco*. CIRA/UNAN-Managua.
- Izabá-Ruiz, R., & García, D. (2018). Estimación de la diponibilidad hídrica superficial en la microcuenca

- del río Mapachá, San Lorenzo , Boaco. *Agua y Conocimiento*, 1–22.(Artículo aceptado).
- Jacobson, R., & Langmuir, D. (1974). Controls on the quality variations of some carbonate spring water. *Journal of Hydrology*, 23, 247–265.
- Jones, D. a. (1995). Environmental Fate of Cypermethrin. *Environmental Monitoring and Pest Management Branch, Department of Pesticide Regulation, Sacramento, California, USA*, 1–10.
- Kevern, R. N. (1899). *Alkalinity water, classification systems* (volume par). The Michigan.
- KÖPPEN, W. (1936). *Das geographische System der Klimate. Handbuch der Klimatologie.* (G. Bornträger, Ed.). Berlyn.
- Krásný, J., & Hecht, G. (1989). *Estudios hidrogeológicos e hidroquímicos de la Región del Pacífico de Nicaragua.* (G. COSUDE, INETER, Ed.). Managua, Nicaragua.
- Losilla, M; Rodríguez, H; Schosinsky, G; Stimson, J; Bethune, D. (2001). *Los Acuíferos Volcánicos y el DD Sostenible en América Central.* (E. de la U. de C. Rica, Ed.). Ottawa, Canadá.
- Majumdar, D., & Gupta, N. (2015). Nitrate pollution of groundwater and associated human health disorders. *Environmental Health*, 3(November), 28–39.
- Manga, M. (1999). On the timescale s characterizing groundwater discharge at springs. *Journal of Hydrology*, 219(1–2), 56–69.
- OMS. (2006). Guidelines for Drinking-water Quality. *Atención Primaria*, 23(Vdv), 7.
- ONU. (2010). El derecho humano al agua y al saneamiento. *28 De Julio De 2010*, 1–7. Retrieved from <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/pdf>.
- Pujades, E., López, A., Carrera, J., Vázquez-Suñé, E., & Jurado, A. (2012). Barrier effect of underground structures on aquifers. *Engineering Geology*, 144–145, 41–49.
- Taniguchi, M., Tsujimura, M., & Tanaka, T. (1996). Significance of stemflow in groundwater recharge 1: Evaluation of the stemflow contribution to recharge using a mass balance approach. *Hydrological Processes*, 10(1), 71–80.
- Vammen, K., Hurtado, I., Flores, Y., Calderón, H., Delgado, V., Flores, S., Sáenz, R. (2012). *Diagnóstico del agua en las Américas: Nicaragua.* (IANAS, Ed.), *Red Interamericana de Academias*.
- Vargas, A. (2002). Manantiales de una parte del Valle Central de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 39–52.
- Vouillamoz, J. M., Valois, R., Lun, S., Caron, D., & Arnout, L. (2016). Can groundwater secure drinking-water supply and supplementary irrigation in new settlements of North-West Cambodia? *Hydrogeology Journal*, 24(1), 195–209.
- WHO-UNICEF. (2017). *Joint Monitoring Programme for Water Supply, Sanitation and Hygiene: Nicaragua.*

Anuncios

Del 21 al 23 de noviembre del año 2018 se desarrolló, en la ciudad de Cobán, el III Congreso Guatemalteco de Geociencias Ambientales. Este congreso fue organizado por la Asociación Guatemalteca de Geociencias Ambientales, ASGA, y la Carrera de Geología del Centro Universitario del Norte de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

La temática estuvo enmarcada en dos grandes componentes: 1. Amenaza Natural y Simposio del Volcán de Fuego, y 2. Recursos Hídricos.

El III Congreso Guatemalteco de Geociencias Ambientales contó con la participación de expositores provenientes de Guatemala, México, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica y Honduras, y se desarrolló gracias a la colaboración de:



REVISTA GUATEMALTECA DE CIENCIAS DE LA TIERRA

NORMAS PARA AUTORES

La **Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra** publicará artículos originales preferentemente en español y excepcionalmente en inglés relacionados con las Ciencias de la Tierra.

TEXTO: Documento mecanografiado en procesador de textos estandarizado (ficheros tipo .doc) con extensión máxima de 20 páginas tamaño carta (incluidas referencias, figuras y tablas) con tamaño de letra de 10 pt (fuente *Times New Roman* o similar), espaciado interlineal de 1,5 y márgenes de 2 cm. El comité editorial se reserva el derecho de solicitar, en determinados casos, modificar la cantidad de páginas de los artículos. El **título** del artículo se redactará con mayúsculas, con tamaño de letra de 12 pt, será breve e informativo sobre sus contenidos. Los originales en español deberán llevar el título también en inglés y viceversa. Los **autores** aparecerán en minúsculas (con mayúscula inicial) con un tamaño de 10 pt, en el orden en que deseen ser citados. Primero el nombre seguido del apellido o apellidos. Se indicará el lugar de trabajo de cada uno de los autores, con la dirección de su centro de investigación y de correo electrónico, con un tamaño de letra de 8 pt. Se incluirá un **resumen** en español y en inglés (*abstract*), con una extensión mínima de 100 palabras y máxima de 250 palabras en cada idioma, con un tamaño de letra de 9 pt. El resumen debe ser conciso e indicativo del contenido y aportaciones del conjunto del artículo y no debe incluir ecuaciones o referencias. Seguidamente se pondrán hasta cinco **palabras clave** (*key words*) en ambos idiomas, por orden alfabético. Después del resumen, el *abstract* y las palabras clave, se desarrollará el texto a dos columnas con un espaciado entre columnas de 0.5 cm. Los diferentes **apartados del texto** se titularán con inicial mayúscula y negrita, sin numeración, con un tamaño de letra de 11 pt. Se recomienda incluir los apartados de Introducción, Metodología, Resultados, Discusión de resultados y Conclusiones. El último apartado será el de Referencias Bibliográficas, precedido, si se estima oportuno, de los Agradecimientos. No se admiten notas a pie de página ni al final del texto, por lo que cualquier comentario deberá incluirse en el cuerpo principal del manuscrito. En las referencias bibliográficas incluidas en el cuerpo del texto, se consignarán con inicial mayúscula, los apellidos que usen los autores en el trabajo correspondiente y el año de publicación, y deberá citarse además de forma completa en el apartado final de Referencias Bibliográficas. En el caso de tres o más autores se utilizará "*et al.*" (en cursiva). Para las citas de un trabajo de dos autores, sus apellidos irán relacionados con la conjunción "y". Las **referencias de los trabajos citados serán incluidas en el apartado final** de Referencias Bibliográficas, siguiendo un formato específico. A modo de ejemplo para los diferentes tipos de documentos:

Artículos de revistas: Heredia, M. y Baltuille, J.M. 1997. Las posibilidades mineras de Cuba en el sector de las rocas ornamentales. *Boletín Geológico y Minero*, 108 (6), 47-52; **Libros:** Didier, J. 1973. *Granites and their enclaves*. Elsevier, Amsterdam, 393 pp. **Capítulos de libros:** Quesada, C. 1983. El Carbonífero de Sierra Morena. En: Martínez, C. (ed.), *Carbonífero y Pérmico de España*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 243-278. **Actas de congresos:** Delgado, F., Ovejero, G. y Jacquin, J.P. 1971. Localización estratigráfica y medio paleogeográfico de las mineralizaciones (galena y fluorita) de Sierra de Baza (Granada, España). / *Congreso Hispano-Luso-Americano de Geología Económica*, Madrid, 2, 119-128. **Informes y trabajos inéditos:** Se citará el autor o autores, año de la realización y ubicación de dicho trabajo: Baltuille, J.M. 1998. *Estudio estadístico tras la revisión de la totalidad de los artículos publicados en el Boletín Geológico y Minero durante el decenio 1989-1998*. Informe inédito. Comité de Redacción del Boletín Geológico y Minero, Centro de Documentación del IGME, Madrid, 13 págs.+19 págs. (anexos). **Páginas web:** Se citará el título de la página, el autor o autores de la misma, organismo o institución editora, fecha de acceso a la información y dirección electrónica tanto de la página como del directorio raíz, ejemplo: Kluwer Academic Publishers Information Service (KAPIS), 24/03/99, <http://www.wkap.nl>

TABLAS: Las tablas y cuadros que contengan texto o datos numéricos organizados en filas y columnas, aparecerán citados todos como tablas, y se prepararán para ocupar un ancho de una o dos columnas (80 ó 170 mm), y el alto proporcional; el máximo serán las dimensiones de la caja de una página completa, e incluso dos páginas completas. El texto o números que contengan, si es el caso, deberán leerse claramente al tamaño elegido, no siendo nunca el tamaño de los caracteres inferior a 8 pt. El formato de la tabla deberá evitar, siempre que sea posible, el uso de cuadrícula con líneas verticales y horizontales para separar filas y columnas. Se recomienda la utilización sólo de algunas líneas horizontales. Las tablas deberán enumerarse de 1 en adelante y citarse dentro del texto con esa numeración e inicial mayúscula, por ejemplo: Tabla 1. El título de la tabla debe consignarse en la parte superior de la misma con un tamaño de letra de 10 pt.

FIGURAS: Las ilustraciones originales (dibujos, mapas, esquemas, diagramas, fotografías, etc.), serán citadas el texto y numeradas correlativamente todas como figuras, y se prepararán para ocupar un ancho de una o dos columnas (80 ó 170 mm), y el alto proporcional; el máximo serán las dimensiones de la caja de una página completa, admitiéndose, solamente en caso de que sea

necesario, figuras que ocupen dos páginas completas. El texto o numeración que contengan, si es el caso, deberá leerse correctamente al tamaño elegido, no empleando caracteres de tamaño inferior a 8 pt. Por regla general se prepararán para aparecer en blanco y negro o escala de grises, aunque pueden publicarse en color siempre y cuando esté justificado por la necesidad de ilustrar un elemento de colores singulares o disponer de una paleta amplia de colores. En estos casos, los autores las enviarán en color, y el editor principal decidirá sobre el formato final de publicación. Además, se entregarán siempre aparte del texto, indicando en éste su posición; en ficheros individuales de imagen (formato TIFF o JPG), a una resolución mínima de 300 ppp para el tamaño de edición final. Las ilustraciones deberán ser originales y propiedad de los autores y, en caso de tener derechos de edición o reproducción, es responsabilidad de los autores el tramitar la autorización de su cesión para publicación en la Revista. En cualquier circunstancia, se deben citar expresamente las fuentes de las que fueron extraídas, modificadas o adaptadas dichas ilustraciones. Las figuras deberán enumerarse de 1 en adelante y citarse dentro del texto con esa numeración e inicial

mayúscula, por ejemplo: Figura 1. El título de la figura debe consignarse en la parte inferior de la misma con un tamaño de letra de 10 pt.

FÓRMULAS Y ECUACIONES: Las fórmulas y ecuaciones a incluir en el texto, deben ser insertadas mediante la utilización de un editor de ecuaciones, quedando la posición de las mismas a disposición del autor.

REMISIÓN DEL MANUSCRITO: Se enviará en formato digital (archivos informáticos) por cualquiera de los siguientes medios:

Por correo electrónico dirigido a moran_sergio@usac.edu.gt, vasquez_osmin@usac.edu.gt, siempre que el tamaño de los ficheros adjuntos no supere los 10 Mb por mensaje. Cuando los ficheros de las figuras o tablas sean de gran tamaño, se podrá utilizar el correo postal o mensajería, con los ficheros grabados en soporte digital (CD-ROM, DVD), dirigido a Carrera de Geología, a la dirección del Centro Universitario del Norte CUNOR.

COBERTURA TEMÁTICA Y PÚBLICO

La Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra es una publicación anual, cuyo objetivo es la difusión de estudios y trabajos de investigación relacionados con las **Ciencias de la Tierra**, dirigidos a la comunidad científica nacional e internacional, y cuya cobertura temática abarca disciplinas como:

Estratigrafía, sedimentología y paleogeografía

Geología histórica y regional

Tectónica y geología estructural

Geofísica

Geomorfología

Hidrología e hidrogeología

Edafología y ciencias del suelo

Mineralogía, cristalografía, metalogenia y yacimientos minerales

Petrología endógena y sedimentaria

Geoquímica

Paleontología

Sistemas de información geocientífica y cartografía geológica

Geología ambiental, paleoclimatología y cambio global

Geología aplicada, geotecnia, ingeniería geológica y del terreno

Prospección e investigación minera y explotación de recursos minerales

Historia y epistemología de las disciplinas de las Ciencias de la Tierra

Divulgación y cultura geocientífica

Geodiversidad, patrimonio geológico y minero, y geoconservación

Riesgos geológicos

Aspectos económicos de las Ciencias de la Tierra

Otros temas afines

El contenido fundamental de la revista son artículos originales e inéditos de investigación científica y aplicada que supongan un avance en el conocimiento. Además, se incluyen reseñas de publicaciones recientes en relación con la temática de la Revista, prólogos y presentaciones en números monográficos, y cartas del equipo editorial. De forma justificada en forma y fondo se admiten escritos de comentario o respuesta a artículos publicados y cartas al Editor.

La correspondencia referente al envío de originales a la Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra deberá dirigirse a: Carrera de Geología, Centro Universitario del Norte CUNOR. Km. 210, ruta Las Verapaces, Finca Sachamach, Cobán, Alta Verapaz
Correo electrónico: moran_sergio@usac.edu.gt, vasquez_osmin@usac.edu.gt

La presente publicación se realizó gracias al patrocinio de:
This publication was possible through the sponsorship of:



Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra, vol. 5, núm. / Issue 1
Guatemalan Journal of Earth Sciences

Sumario / Contents

- Modelación hidrológica del escurrimiento base en el cauce principal de la cuenca hidrográfica del río Chixoy, Guatemala. *Hydrological modeling of base runoff in the main cauce of the hydrographic basin of the Chixoy River, Guatemala.* J.C. Fuentes, R.W. Figueroa 3
- The Sierra de Santa Cruz in Eastern Guatemala: A giant gravity slide triggered by the K-Pg Chixulub bolide impact.* La Sierra de Santa Cruz de Guatemala oriental: Un gigantesco deslizamiento gravitacional provocado por el impacto del bólido K-Pg Chixulub. J.H. Rosenfeld 9
- Acuíferos: Diseño y análisis de pruebas escalonadas de bombeo. *Aquifers: Design and analysis of step-drawdown pump tests.* R. Machorro 14
- Cartografía de zonas de inundación, evento O-56 y tormenta tropical Nate, en Cobán, Alta Verapaz, Guatemala. *Cartography of flooding zones, event O-56 and Nate tropical storm, in Cobán, Alta Verapaz, Guatemala.* S. Morán, J. Requena, F. Monterroso, O.J. Vásquez, L. Laj 20
- Caracterización litológica de la secuencia Palo Amontonado, El Progreso, Guatemala. *Lithological characterization of Palo Amontonado sequence, El Progreso, Guatemala.* K. Chun, S. Morán 32
- Caracterización hidrogeológica y calidad del agua para abastecimiento a comunidades rurales ubicadas en la microcuenca del río Mapachá, Boaco, Nicaragua. *Hydrogeological characterization and water quality for supply of rural communities located in the Mapachá River micro-basin, Boaco, Nicaragua.* R. Iزابá-Ruiz 42

ISSN 2410-728X

