



REMI
Revista Multidisciplinaria
de Investigación

Revista Multidisciplinaria de Investigación, REMI | Vol. 4 Núm.
1, enero- junio | 2025, pp. 32-58
ISSN-L 3006-7715
Universidad de El Salvador
<https://revistas.ues.edu.sv/index.php/remi>

Artículo Original



<https://hdl.handle.net/>

EVALUACIÓN DE IMPACTOS EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA MICROCUECNA DEL RÍO EL MOLINO: RECARGA POTENCIAL, USO DE SUELO, CONTAMINACIÓN URBANA, ABASTECIMIENTO Y PERCEPCIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

IMPACTS ASSESSMENT ON THE WATER RESOURCES OF THE EL MOLINO RIVER MICROWATERSHED: POTENTIAL RECHARGE, LAND USE, URBAN POLLUTION, SUPPLY AND WATER QUALITY PERCEPTION

Fecha de recepción 01/10/2025/ fecha de aceptación 05/15/2025

Óscar Figueroa¹, Madelline Morán², Tania Lemus³ & César Alvarado⁴

RESUMEN

Introducción: La microcuenca del río El Molino, en el departamento de Santa Ana, El Salvador, presenta contaminación en sus recursos hídricos, según estudios previos y observaciones de campo. Aunque se ha identificado la presencia de fuentes y actividades potencialmente contaminantes, la falta de un inventario oficial de estas fuentes agrava la situación. **Objetivo:** de esta investigación fue determinar la afectación de la urbanización y agricultura en la recarga potencial de la microcuenca del río El Molino, en Santa Ana, El Salvador, hasta el año 2023. Para ello, se determinó la recarga potencial hídrica, a través de la metodología de Schosinsky; se realizó un análisis del uso del suelo mediante sistemas de

¹ Universidad de El Salvador Facultad Multidisciplinaria de Occidente

fa19011@ues.edu.sv 0009-0004-2638-6025

² Universidad de El Salvador Facultad Multidisciplinaria de Occidente

mg19050@ues.edu.sv 0009-0001-8163-2389

³ Universidad de El Salvador Facultad Multidisciplinaria de Occidente

lm19039@ues.edu.sv 0009-0006-4013-4777

⁴ Universidad de El Salvador Facultad Multidisciplinaria de Occidente

cesar.alvarado2@ues.edu.sv 0000-0002-8501-4852

Departamento de Física, Facultad Multidisciplinaria de Occidente, Universidad de El Salvador

información geográfica y reconocimiento en campo; también, se realizaron entrevistas a los habitantes que viven al rededor del río El Molino con el fin de conocer su percepción sobre el recurso hídrico, además, se ejecutaron pruebas hidráulicas en diversos tipos de suelo y la elaboración de un inventario detallado de fuentes potencialmente contaminantes reconocidas.

Método: Se lleva a cabo un cálculo de la recarga potencial de acuífero utilizando un método con base en el balance hídrico de suelos, propuesta por Schosinsky (2006). Este proceso se realiza mediante el empleo de una hoja electrónica denominada BHS_Schosinsky y se aplicó a la microcuenca del río El Molino. Para dicho cálculo, se consideran varios parámetros fundamentales que incluyen el uso del suelo, la profundidad de las raíces, la tasa de infiltración, el rango de pendientes del terreno, la textura del suelo, así como datos de precipitación y evapotranspiración provenientes de estaciones pluviométricas cercanas.

Resultados: Se identificaron 14 fuentes potenciales de contaminación de tipo puntual, y extensiones grandes donde hay fuentes potenciales de contaminación de tipo difusa.

Conclusión: Se concluyó que hay cierta población perjudicada en cuanto al abastecimiento y calidad de agua. Los residuos urbanos fueron identificados como la principal fuente de contaminación de los recursos hídricos, así como los agroquímicos utilizados en el cultivo de café en el área identificada como la mayor zona de recarga de la microcuenca. Finalmente, aplicando la metodología de Schosinsky se calculó una recarga potencial de 12.50 Mm³ de agua en el área correspondiente a la microcuenca (29.30 km²).

Palabras Clave: Calidad de agua, contaminación, balance hídrico, recarga de acuíferos, cuenca hidrográfica.

ABSTRACT

Introduction: The El Molino River micro-basin in the department of Santa Ana, El Salvador, suffers from water resource pollution, according to previous studies and field observations. Although potentially polluting sources and activities have been identified, the lack of an official inventory of these sources exacerbates the situation. **Objective:** The objective of this research was to determine the impact of urbanization and agriculture on the potential recharge of the El Molino River micro-basin in Santa Ana, El Salvador, until the year 2023. To this end, the potential water recharge was determined using Schosinsky's methodology. an analysis of land use was carried out using geographic information systems and field reconnaissance; interviews were also conducted with residents living around the El Molino

River to learn about their perceptions of water resources; in addition, hydraulic tests were performed on various soil types and a detailed inventory of recognized potential sources of pollution was compiled. **Method:** A calculation of the potential aquifer recharge is carried out using a method based on soil water balance, proposed by Schosinsky (2006). This process is performed using a spreadsheet called BHS_Schosinsky and was applied to the El Molino River micro-basin. Several fundamental parameters are considered for this calculation, including land use, root depth, infiltration rate, terrain slope range, soil texture, and precipitation and evapotranspiration data from nearby rain gauge stations. **Results:** Fourteen potential point sources of pollution were identified, as well as large areas where there are potential sources of diffuse pollution. **Conclusion:** It was concluded that there is a certain population that is adversely affected in terms of water supply and quality. Urban waste was identified as the main source of water resource pollution, as were the agrochemicals used in coffee cultivation in the area identified as the largest recharge zone of the micro-watershed. Finally, applying Schosinsky's methodology, a potential recharge of 12.50 Mm³ of water was calculated in the area corresponding to the micro-watershed (29.30 km²).

Keywords: water quality, pollution, water balance, aquifer recharge, watershed.

Introducción

La microcuenca del río El Molino, en el departamento de Santa Ana, El Salvador, presenta contaminación en sus recursos hídricos, según estudios previos y observaciones de campo. Aunque se ha identificado la presencia de fuentes y actividades potencialmente contaminantes, la falta de un inventario oficial de estas fuentes agrava la situación. La problemática se incrementa por la ausencia de medidas de protección, como plantas de tratamiento de agua, para abordar los vertidos urbanos. Además, el cultivo intensivo en la zona sur contribuye significativamente.

Adicionalmente, la carencia de información específica sobre el modelo conceptual hidrogeológico de la zona y la recarga acuífera dificulta la evaluación de las posibles consecuencias de la contaminación del agua recargada en los diversos usos de suelo de la microcuenca hacia los acuíferos locales.

Hasta la fecha, no se ha llevado a cabo una investigación actualizada en la microcuenca del río El Molino que evalúe los diferentes impactos en los recursos hídricos.

La ausencia de esta información impide una comprensión completa de la situación. Debido al elevado nivel de contaminación, la microcuenca ha experimentado graves daños, evidenciados en sus aguas por el vertido de desechos sólidos, aguas residuales, así como por el mal olor generado. Algunas industrias contribuyen a la problemática al no realizar ningún tratamiento a sus vertidos. A pesar de los esfuerzos de ONG, comunidades aledañas y voluntarios, para dar a conocer esta situación mediante denuncias ambientales y campañas de limpieza, no se ha logrado una solución definitiva hasta el momento.

Aunque el marco legal y regulatorio de este tipo de problemáticas está prevista en la recién aprobada Ley General de Recursos Hídricos en el artículo 13 que contempla que es función de la Autoridad Salvadoreña de Agua solucionar el uso de vertidos de agua. Así mismo, el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales y el Ministerio de Salud también tienen la responsabilidad de la calidad del agua en la población salvadoreña (Art. 49 de la Ley de Medio Ambiente y Art. 56 del Código de Salud). Por el momento no se realiza ningún tipo de sanción o actividades de mejoramiento al recurso hídrico del río El Molino.

El objetivo principal de esta investigación es determinar la afectación de la urbanización y la agricultura en la recarga potencial de la microcuenca; para ello ha sido necesario determinar el balance hídrico de suelos por medio de la metodología de Schosinsky y para evaluar los efectos adversos de contaminación, se realiza la identificación de fuentes potenciales de contaminación y la ejecución de entrevistas estructuradas a la población que vive en la microcuenca del río El Molino.

A fin de conocer el estado actual de la microcuenca se revisan investigaciones hidrogeológicas previas y se recalca entre ellas la realizada por Alvarado (2015; 2018) quién realizó una caracterización del agua subterránea en la cuenca del río Suquiapa, donde se confirmó la existencia de un acuífero somero ubicado entre los 25 y 40 metros de profundidad y de un acuífero profundo ubicado entre los 80 y 120 metros de profundidad, también se identificó que la mayor tasa de infiltración y las mayores zonas de recarga se centran en lavas fracturadas recientes de complejo volcánico de Santa Ana. Además, menciona que la cuenca del río Suquiapa, es la más importante del departamento de Santa Ana, ya que contiene el

principal acuífero de abastecimiento de agua en la ciudad; tanto para consumo humano, como para la agricultura y la industria. Dentro de esta cuenca se encuentra la microcuenca del río El Molino.

Además, muchos afluentes, al igual que el río El Molino, se han convertido en sitios de descarga de contaminantes del agua, organismos vivos, bacterianos, virales, fúngicos y parasitarios; además de sustancias químicas simples y complejas. Entre las sustancias que más daño causan a la salud se encuentran: los metales pesados, las sustancias radiactivas, insecticidas, fertilizantes, residuos tóxicos industriales, los jabones, entre otros lixiviados que afectan tanto aguas superficiales y freáticas. (Gómez et al., 2018).

Según Pérez y Zambrano (2019), uno de los problemas que provocan un mayor impacto a los recursos hídricos es el vertido de residuos urbanos: desechos sólidos, aguas residuales y desechos industriales, cuya presencia en las aguas superficiales aumenta la demanda de oxígeno que se necesita para degradar algunas sustancias inorgánicas, aceite, grasa y sólidos que impiden la entrada de O₂ al agua y la salida de CO₂, además de contaminantes muy tóxicos en altas concentraciones tales como el fósforo, arsénico y cadmio, de difícil remoción incluso con plantas de tratamiento especializado.

En adición, las aguas negras son una fuente potencial de contaminación característica de las zonas urbanas, por lo que según Bain (2014), se estima que 180 millones de personas en el mundo consumen agua contaminada con coliformes fecales. En ellas habitan grandes cantidades de bacterias patógenas y virus, como estreptococos, estafilococos, Salmonella, Shigella, Vibrio, virus de la hepatitis y la poliomielitis, que representan un riesgo para la salud por la propagación de enfermedades infecciosas. (Cortés, 2003) En la investigación de Grande et al. (2015) se menciona un punto de interés, A09MOLIN, este se encuentra dentro de la zona de este estudio, donde la calidad del agua del río llega a ser clasificada por el software WQMCAL como contaminada.

Dicho esto, según Quiñonez (2019), ningún país de las Américas tiene un éxito total en la gestión de la calidad del agua, los principales problemas de la calidad del agua se encuentran directamente asociados al bajo nivel de tratamiento de las aguas residuales e industriales y a la reducida utilización de las aguas tratadas. Por otro lado, se considera importante destacar que, en la búsqueda de asignarle un valor a los recursos naturales, es necesario tomar en cuenta la percepción que la sociedad tiene acerca de estos recursos y sobre los innumerables beneficios que estos proveen (Álvarez, et al., 2016).

Por otro lado, M. Guevara (2006) presenta un marco general sobre el estado de las aguas subterráneas de El Salvador concluyendo que siendo la cuenca del río Lempa la más grande de El Salvador, se pueden diferenciar tres áreas: una ubicada agua arriba del embalse Cerrón Grande, con agua subterránea en las subcuencas del Sucio, Acelhuate, Suquiapa y Taxis; el área comprendida entre los embalses Cerrón Grande y 15 de septiembre; y el área comprendida desde el último embalse hasta el Océano Pacífico. El autor recalca la vulnerabilidad a la contaminación puntual de las aguas subterráneas mediante fosas sépticas, granjas, establos o por contaminación difusa, como la aplicación de fertilizantes y pesticidas, además del caso más preocupante por el mal manejo de aguas domésticas y el vertido de basura incontrolados.

Materiales y método

Área de Estudio

El área de estudio está comprendida entre las coordenadas UTM de latitud norte 1534000 y 1550000 y de longitud este 218000 y 226000 en la zona occidental de El Salvador en el departamento de Santa Ana, al este del centro histórico de la ciudad que lleva el mismo nombre; posee una elevación máxima de 1680 msnm en su cuenca alta y una elevación mínima de 560 msnm. El área delimitada por la microcuenca del río El Molino, presentada en la **Figura 1**, posee una extensión de 29.30 km^2 , perteneciente en su totalidad al municipio de Santa Ana, siendo afluente al río Apanchacal o El Sauce.

Características de la Microcuenca

Las captaciones de precipitaciones hechas dentro de la microcuenca hidrográfica en estudio contribuyen al flujo del río El Molino. Esto es así, ya que, el agua de escorrentía se desplaza a favor de la pendiente en dirección a puntos de menor altura como consecuencia de la gravedad, conduciendo los flujos de agua hacia un canal principal (Ibáñez et al., 2011). El río El Molino tiene una longitud de recorrido de 6.60 km en el cauce más largo, el mayor valor de elevación del río en la microcuenca es de 680 msnm, correspondiente a la zona suroeste de la microcuenca y un valor menor de elevación de 560 msnm en la zona noreste de esta misma.

En el área predominan los depósitos pertenecientes a la formación San Salvador, como se muestra en la **Figura 2**, constituyendo el 97.17 % del área total, así como también depósitos de la formación Bálsamo en la zona sur y norte, constituyendo el 2.83% restante. De acuerdo con Baxter (1984), la formación San Salvador se divide en los siguientes miembros: s1, s2, s3'a y s5'b, de los cuales solo el miembro s3'a y s1, están presente en la zona de estudio. El miembro s3'a se puede describir como una secuencia de piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas (tobas color café), en parte contemporáneas con los miembros s2 y s3'b. Como segundo más predominante se encuentra el miembro b1 de la Formación Bálsamo, constituida por epiclastitas volcánicas, piroclastitas e ignimbritas; localmente efusivas básicas-intermedias intercaladas, "facies claro" (con lapilli de pómez) y limo rojo, ubicados al sur del Río Lempa.

Figura 1.

Mapa de ubicación de la microcuenca del río El Molino.

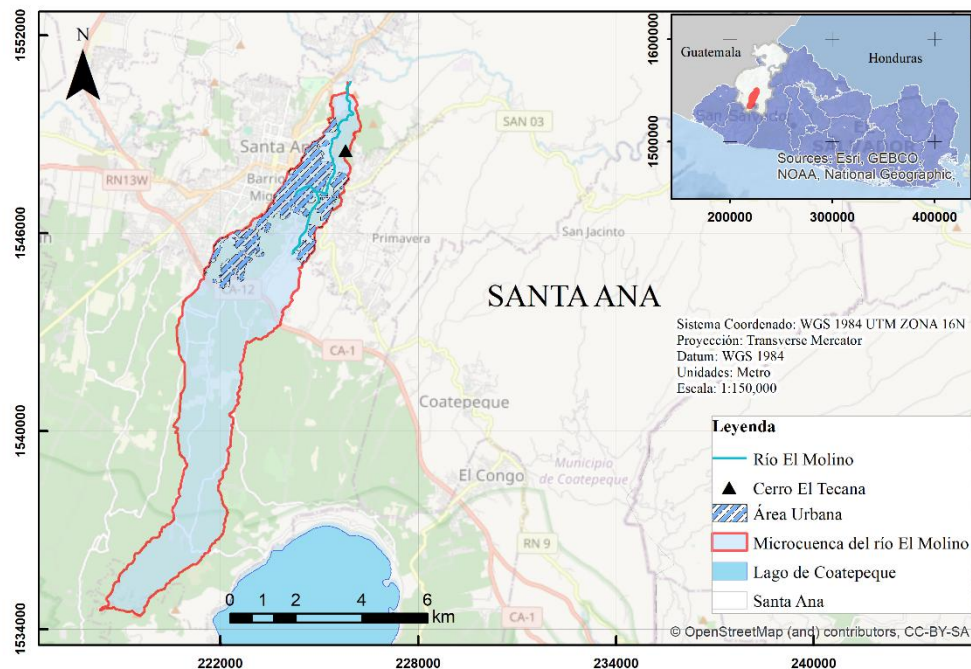
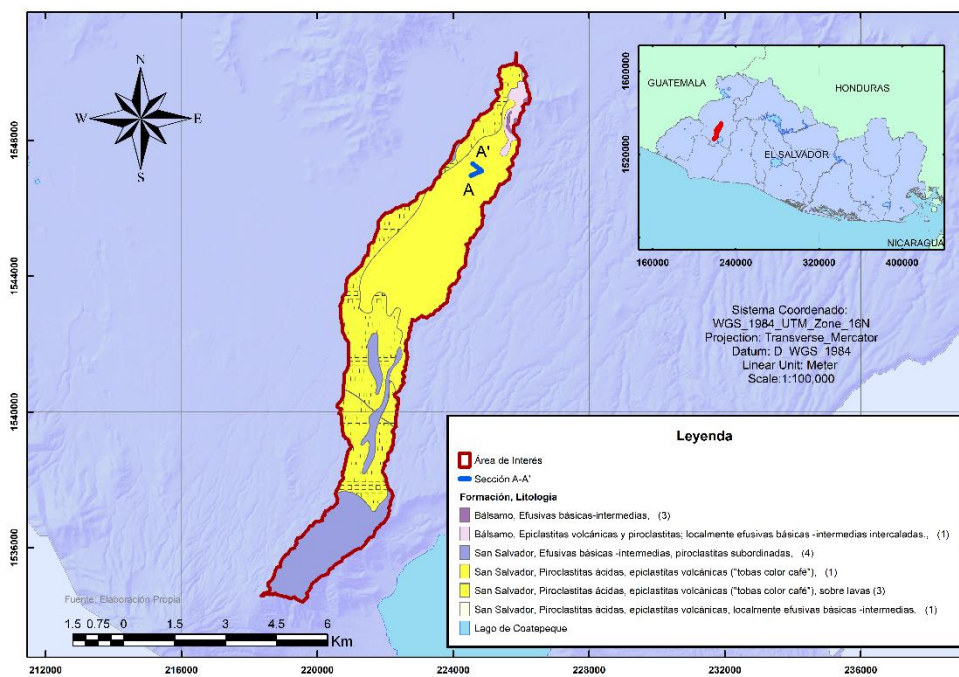


Figura 2

Mapa geológico de la microcuenca del río El Molino.

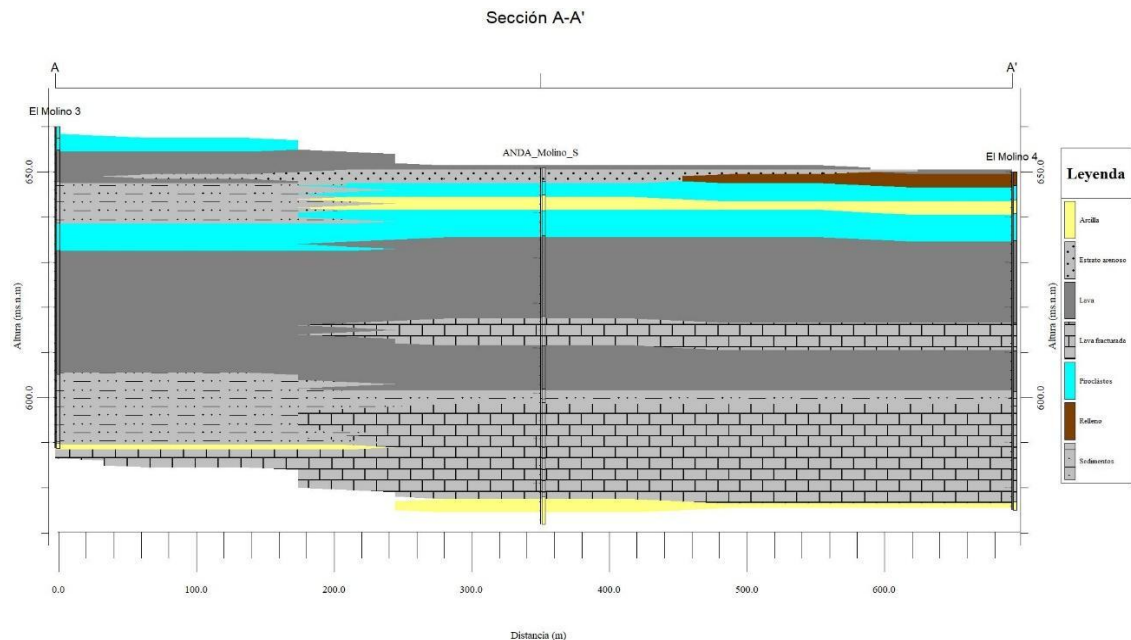


La información litológica de la zona revela la predominancia de cuatro elementos que constituyen las columnas litológicas, las cuales poseen en su mayoría semejanza en los estratos depositados, ubicándose en la parte más superficial material piroclástico entre los 5 y 40 m aproximadamente, con diferentes espesores, le siguen lavas de tipo basáltica, andesíticas, lavas fracturadas y escoria. También se encuentran intercalaciones de sedimento aluvial y arcillas a mayores profundidades.

Se procesó y analizó la litología de 12 pozos, y con la ayuda del software RockWorks se presenta la disposición de los materiales, tal como se muestra en la **Figura 3**, en la cual se evidencia material piroclástico entre los 5 y 35 m de profundidad, con diferentes espesores que contienen intercalaciones de arcillas y estratos arenosos, en algunos tramos a partir de los 15 hasta los 70 m de profundidad, se encuentran lavas escoriáceas y andesíticas, algunos tramos con fracturas e intercalaciones de sedimentos, alcanzando hasta una capa de arcilla.

Figura 3

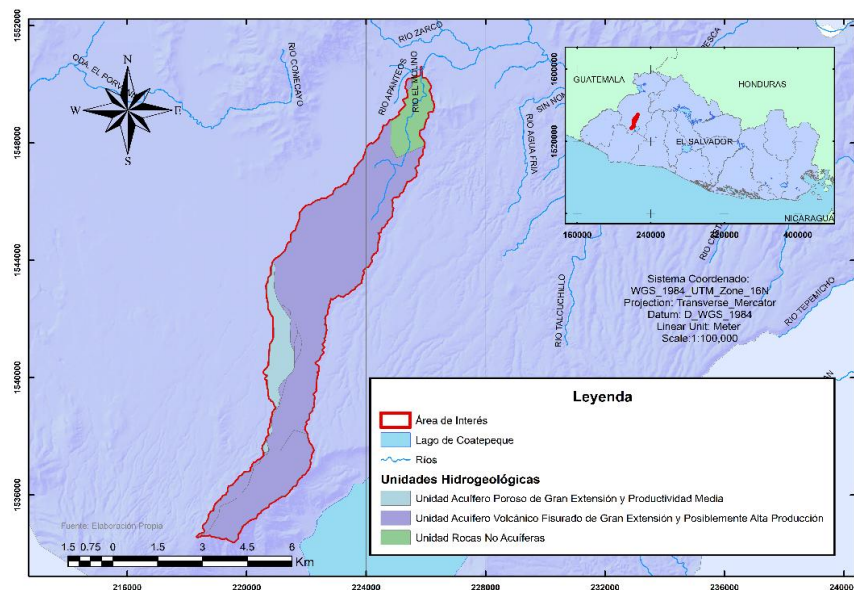
Sección litológica generada a partir de la información de los pozos: El Molino 3, ANDA_Molino_S y El Molino 4.



En función de las características geomorfológicas, geológicas, estructurales y las propiedades hidráulicas intrínsecas de las rocas, se han identificado tres unidades hidrogeológicas existentes en el área investigada y se muestran en la **Figura 4**, estas fueron identificadas con base en la información del “Mapa Hidrogeológico de El Salvador”.

Figura 4

Unidades hidrogeológicas en la microcuenca del río El Molino.



Según la **Figura 4**, las unidades hidrogeológicas son descritas por sus características como:

Unidad Acuífero Volcánico Fisurado de Gran Extensión y Posiblemente Alta Producción

Esta unidad la constituyen, principalmente, rocas volcánicas de carácter andesítico y basáltico, con ciertas intercalaciones de materiales piroclásticos. Entre las rocas volcánicas se pueden distinguir flujos y coladas de lava que provienen de los centros volcánicos. Dichos materiales pueden presentar conductividades hidráulicas de medianas a altas, como consecuencia de su porosidad secundaria (fallamiento existente).

Unidad Acuífero Poroso de Gran Extensión y Productividad Media

Los materiales de esta unidad consisten principalmente en materiales piroclásticos aglomerados y retrabajados (pómez, lapilli y tobas), teniendo una distribución granulométrica que varía de fina a gruesa. Las conductividades hidráulicas pueden variar de medianas a bajas, como consecuencia al grado de cementación o compactación que pueden

tener los granos de los materiales que la constituye. Esta unidad puede tener más de 50 m de espesor.

Unidad De Rocas No Acuíferas

Los materiales de esta unidad están compuestos por flujos o macizos de lavas, intercalados con tobas aglomeradas y brechosas, además de lahares cementados, presentando conductividades hidráulicas muy bajas o casi nulas, debido a su baja porosidad o a su alto grado de compactación y cementación. Se considera que constituyen el basamento de los acuíferos identificados en la zona de estudio. La profundidad a la que se encuentra esta unidad puede superar los 100 metros.

Recarga Potencial

Se lleva a cabo un cálculo de la recarga potencial de acuífero utilizando un método con base en el balance hídrico de suelos, propuesta por Schosinsky (2006). Este proceso se realiza mediante el empleo de una hoja electrónica denominada BHS_Schosinsky y se aplicó a la microcuenca del río El Molino. Para dicho cálculo, se consideran varios parámetros fundamentales que incluyen el uso del suelo, la profundidad de las raíces, la tasa de infiltración, el rango de pendientes del terreno, la textura del suelo, así como datos de precipitación y evapotranspiración provenientes de estaciones pluviométricas cercanas.

La microcuenca se divide en polígonos, cada uno con valores distintos de precipitación, uso de suelo y rango de pendientes, con el propósito de realizar un balance hídrico en cada uno. Esto permite obtener cálculos más específicos de la recarga potencial. Los valores de los parámetros se introducen en la hoja de cálculo, y como resultado, se obtienen datos de recarga potencial.

Se toma en cuenta el área de cada polígono y su respectivo valor de recarga potencial, esto se utiliza para determinar un volumen de recarga potencial de agua por polígono. Estos valores se utilizan para calcular el volumen total de recarga potencial en toda la microcuenca y también según los diferentes usos del suelo.

En total, se calculó un balance hídrico con base en 15 polígonos en la microcuenca del río El Molino, con un área de 29.30 kilómetros cuadrados. Es importante destacar que se considera una recarga nula en el área destinada al uso de suelo urbano.

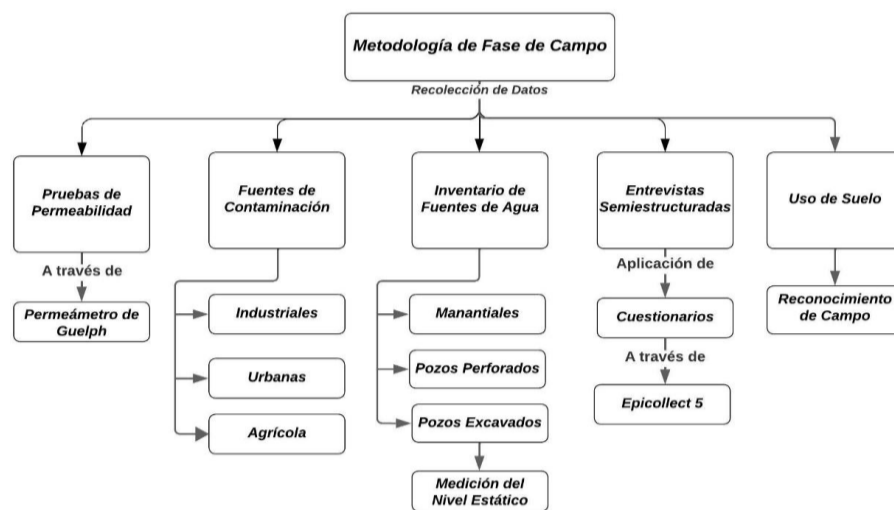
Metodología de Campo

Se realiza una metodología por etapas con el objetivo de facilitar la obtención de la información: recopilación de datos, procesamiento y análisis de información. Además, se destaca la importancia de la recopilación de información existente, obtenida del Sistema de Información Hídrica (SIHI), datos de prospección geofísica, información de las diferentes variables hidrogeológicas, información de los distintos mapas de geología e hidrogeología de El Salvador y de información previamente gestionada, proveniente de acuerdos de las instituciones que estén involucradas en la zona de estudio, tales como: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), Alcaldía Municipal de Santa Ana, comunidades y otros.

Luego, se planifican las visitas para corroborar la geomorfología y los diferentes usos de suelos de la microcuenca del río El Molino con el propósito de manejar información actualizada frente a los posibles cambios presentados. Posterior al reconocimiento del área, se planifica la obtención de la información presentada en la **Figura 5**.

Figura 5

Diagrama de flujo de la metodología seguida en la fase de campo.



Fuente elaboración propia.

La fase de campo se ejecutó entre los meses de febrero y marzo, con el apoyo de representantes de la Alcaldía Municipal de Santa Ana, estudiantes de la carrera de Licenciatura en Geofísica de la Universidad de El Salvador y tutor del trabajo de investigación.

Procesamiento de Información

El procesamiento de información se realiza con la utilización de diferentes softwares que tienen el propósito de ofrecer una vista simplificada de la información obtenida en campo. Se construyen mapas temáticos, se procesan mediciones hidrogeológicas, características de suelo, etc., mediante software como Surfer 16, ArcGIS y otros. Además, la utilización del método de Schosinsky para el cálculo de la recarga potencial. Para la recolección de la información de las entrevistas se utilizó el software y aplicación Epicollect5 con el fin de reducir tiempo a la hora de realizar las entrevistas y para su posterior procesamiento se utilizó Atlas.ti para la codificación de las respuestas obtenidas por la población y mostrarlos en un diagrama conceptual.

Resultados y discusión

Recarga Potencial

Los valores calculados en el balance hídrico de suelos para la microcuenca del río El Molino, se resumen en la **Tabla 1**.

El volumen de recarga potencial calculado para la microcuenca es de 12.50 Mm³ de agua. Para analizar con mayor detalle la distribución de esta recarga potencial en función del uso de suelo, se calcularon los volúmenes específicos de recarga potencial por categoría. El resultado revela que el uso de suelo denominado café bajo sombra constituye la mayor contribución, representando el 93.38 % del volumen total de recarga potencial. En segundo lugar, se encuentra el uso de suelo, sistemas agroforestales, con un 4.32 %, seguido por bosque, con un 2.30 % del volumen total de recarga hídrica.

La alta recarga hídrica en el área de café bajo sombra se debe principalmente a su extensa cobertura, que abarca un 77.29% de la superficie de la microcuenca. También es importante destacar que en los usos de suelo, sistemas agroforestales y café bajo sombra, se

infiltra una cantidad similar de agua por unidad de terreno. Sin embargo, en el caso del uso de suelo bosque, la recarga potencial hídrica es menor.

Tabla 1

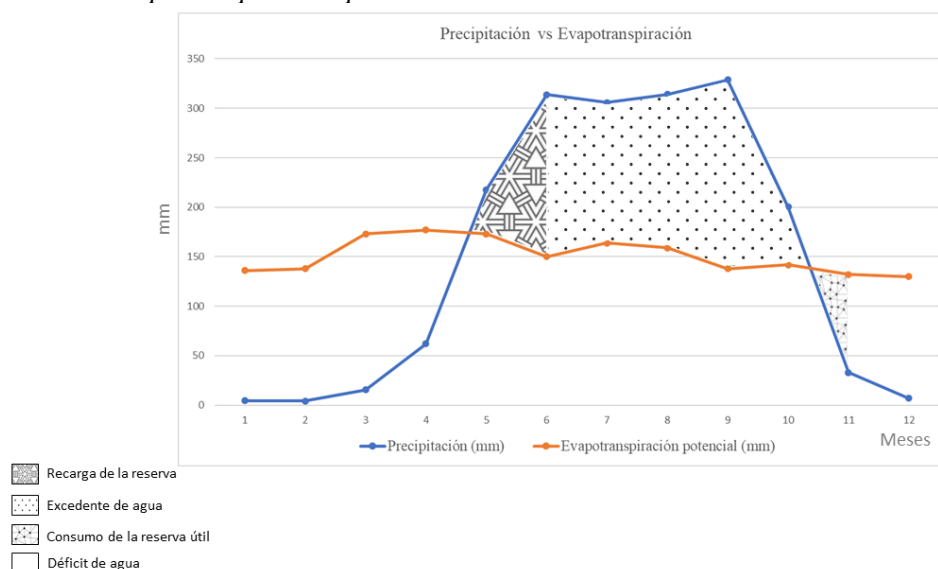
Valores obtenidos del cálculo de balance hídrico según uso de suelo.

Uso de suelo	Recarga potencial acuífera (m)	Área (km ²)	Volumen de recarga potencial (m ³)	Área de cuenca (%)	Volumen de recarga potencial (%)
Bosque	0.91	0.93	28.758E4	3.16	2.30
Sistemas Agroforestales	1.98	1.06	53.95E4	3.60	4.32
Café bajo sombra	4.24	22.65	11.67E6	77.29	93.38
Urbano	0.00	4.67	0.00	15.94	0.00
Total		29.30	12.50E6	100.00	100.00

El gráfico de precipitación vs evapotranspiración, presentado en la **Figura 6**, permite identificar los períodos del ciclo hidrológico en los cuales existe mayor probabilidad de la recarga al acuífero, excedentes de agua, el consumo de la reserva útil y el déficit de agua. En este caso, el período de recarga al acuífero se produce entre los meses de abril y mayo, hasta junio. En junio se alcanza la saturación del terreno y comienza el período de excedente de agua que se convierte en escorrentía, este período dura hasta octubre. En octubre la evapotranspiración potencial supera a la precipitación e inicia el proceso del consumo de la reserva útil, este dura mientras existan precipitaciones en el área. En diciembre las precipitaciones tienden a cero y los valores de evapotranspiración potencial siguen una tendencia constante, este período es llamado déficit de agua y dura hasta que comienza de nuevo la recarga de la reserva, entre abril y mayo.

Figura 6

Análisis gráfico del estado de la recarga basado en área de estudio, basado en el análisis de la precipitación vs. evapotranspiración potencial.



Usos del Suelo

De la información recopilada en campo se obtuvo como resultado un mapa de usos del suelo actual de la microcuenca del río El Molino mostrado en la **Figura 7**, constituido por cuatro tipos predominantes: cultivo de café, sistemas agroforestales, bosques y tejido urbano, los cuales se detallan a continuación:

Cultivo de Café

Es el uso de suelo más representativo de la microcuenca que incluye aproximadamente el 77% del área total y se extiende en dirección noreste del volcán de Santa Ana con zonas donde dicho cultivo se encuentra bajo sombra.

Tejido Urbano

En la microcuenca del río El Molino, la mayor parte está conformada por viviendas y urbanizaciones, siendo de gran extensión, con un aproximado de 15% del área total. Actualmente, se ha realizado una extensión del tejido urbano en la ciudad de Santa Ana, principalmente en los alrededores de la microcuenca.

Sistemas Agroforestales

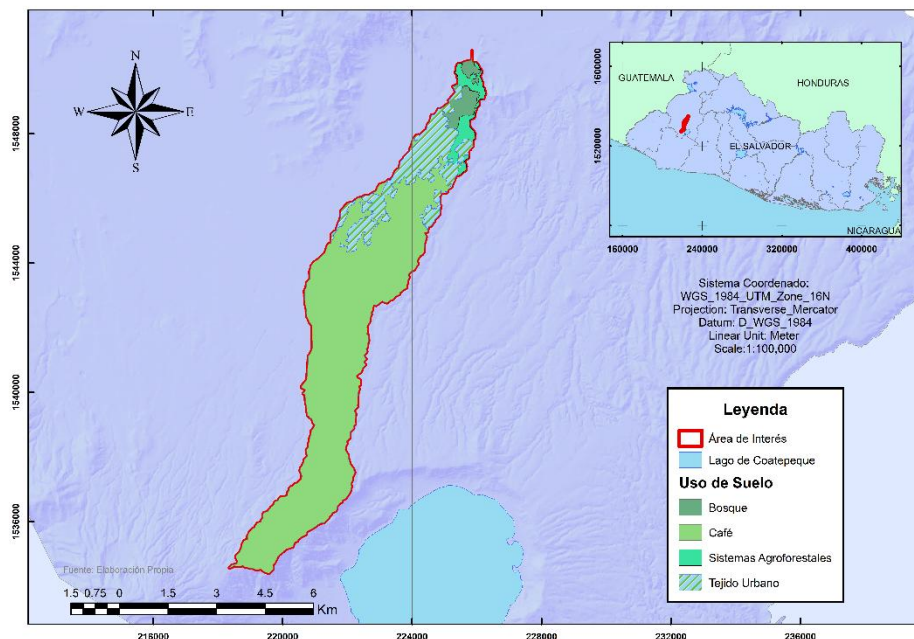
Representan un 5% del área total y se encuentran en su mayoría en la parte noreste de la microcuenca en estudio, considerando zonas que incluyen árboles, ganadería y cultivos.

Bosque

Es el uso de suelo con menor extensión de la microcuenca del río El Molino, está representado por un 3% del área total y está conformado por árboles de especies variadas, hiervas y vegetación arbustiva cuyo follaje varía con los cambios en la época seca y lluviosa. Este uso de suelo resultó de la reclasificación a partir de datos recopilados en campo.

Figura 7

Cobertura de suelo de la microcuenca del río El Molino.



Puntos Potenciales de Contaminación

Durante la fase de campo se identificaron 37 fuentes potenciales de contaminación, de los cuales 35 se clasifican como contaminación puntual, entre ellos se encuentran servicios diversos e industrias como: hospitales, centros penales, beneficios de café, balnearios, tenerías, industrias, gasolineras, granjas, moteles y ganadería. Por otro lado, se clasifican como contaminación difusa los cementerios, sistemas agroforestales y cultivos de café por el uso de agroquímicos y los residuos urbanos. De los 37 puntos identificados, 14 de ellos

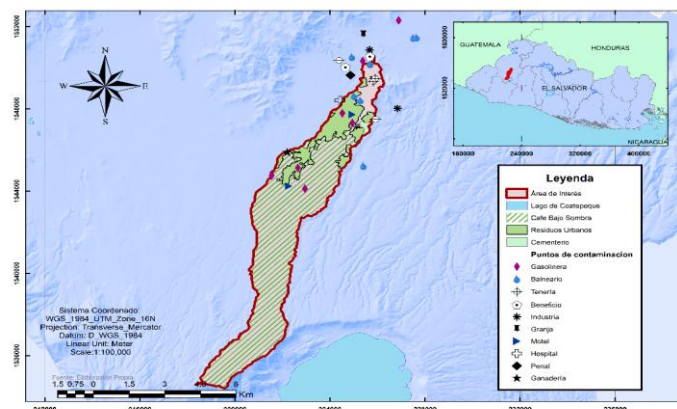
corresponden a servicios diversos e industrias que se encuentran en el interior de la microcuenca.

Las fuentes potenciales de contaminación se ubicaron en el mapa correspondiente a la **Figura 8** situados en su mayoría al norte de la microcuenca, sin embargo, cabe la posibilidad de la existencia de más sitios potenciales de contaminación no reconocidos en campo. De las fuentes potenciales de contaminación que abarcan una mayor extensión de la microcuenca se encuentran, los cementerios Santa Isabel y Parque Jardín Las Flores, las áreas de cultivo de café que se extienden desde el sur hasta la parte media de la microcuenca, y los residuos urbanos producto de la ciudad de Santa Ana, siendo estos últimos los que tienen una influencia apreciable en el recurso hídrico superficial con el mal manejo de aguas residuales.

En relación con las fuentes puntuales de contaminación, se determinó que existe una mayor existencia de gasolineras, haciendo un total de 5 gasolineras y 3 balnearios. En segundo lugar, se identificaron 2 moteles y 2 tenerías, donde se pudo observar que algunas de ellas vertían sus residuos directamente al río sin ningún tipo de tratamiento. De los sitios mencionados anteriormente, se prevé que podrían tener una incidencia importante en el área de interés con respecto a otras fuentes de contaminación identificadas con menor presencia en la zona, tal es el caso de las granjas e industrias, donde se pudo identificar un sitio para cada clasificación respectivamente.

Figura 8

Mapa de ubicación de fuentes potenciales de contaminación en el área de estudio.



La **Tabla 2** resume la información de las fuentes potenciales de contaminación identificadas dentro de la microcuenca.

Tabla 2

Resumen de resultados de fuentes potenciales de contaminación dentro del área de estudio.

Fuente de contaminación	potencial	Cantidad de fuentes localizadas	Factor de peligro	Tipo de contaminación
Servicios industriales	diversos	e 14	Efluentes sanitarios e industriales	Puntual
Cementerio		2	Lixiviación	Difusa
Cultivo de café			Lixiviación de plaguicidas y nitratos	Difusa
Zonas agrícolas			Lixiviación de agroquímicos y nitratos	Difusa
Residuos urbanos			Vertidos de agua sin tratamiento, no alcantarillado (fosas, letrinas, etc.) y fugas en alcantarillados	Difusa

Nota. Modificado de “Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas”, por S. Foster & R. Hirata, 1991, *Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente*, segunda edición, p. 80.

Cabe destacar que los sitios anteriores identificados como fuentes potenciales de contaminación no tienen un estudio determinado que especifique el grado de influencia de cada uno al recurso hídrico de la zona, ya que este hecho se encuentra fuera del alcance de esta investigación.

Abastecimiento y Percepción de la Calidad de Agua

Para determinar la afectación que está recibiendo tanto las aguas superficiales como subterráneas se realizaron entrevistas a las personas de la comunidad para determinar la apreciación que tienen al respecto. La zona en cuestión ocupa el 7.32 % del área del municipio de Santa Ana, donde según la Dirección General de Estadísticas y Censos (DIGESTYC) en el *Boletín Estadísticas Vitales 2007 – 2011 Departamento de Santa Ana* la cantidad de habitantes era de 245,421 según el censo 2007, debido a que no ha habido otro censo, el Banco Central de Reversa (BCR) de El Salvador ha realizado *Proyecciones de*

Población Municipal 2020 – 2030 (Rev. 2021), donde se espera que la cantidad de habitantes para el año 2023 sea de 250,318 personas; por lo cual se estima que el número de habitantes dentro de la microcuenca es de 3000 personas.

Se tomó una muestra de cuarenta entrevistas las cuales tenían que cumplir con la condición de habitar cerca al río El Molino, dicha entrevista eran estructuradas donde podían brindar sus diferentes puntos de vista. Para la recolección de la información se utilizó el programa Epicollect5 el cual cuenta con la facilidad de recoger datos a través de los dispositivos móviles, este permitió tomar videos, grabar audios y capturar fotografías, además, de tomar las coordenadas del sitio. Para el análisis de los datos obtenidos se utilizó Atlas.ti con el fin de realizar una codificación de las respuestas y mostrarlos en diagramas de Sankey y conceptuales.

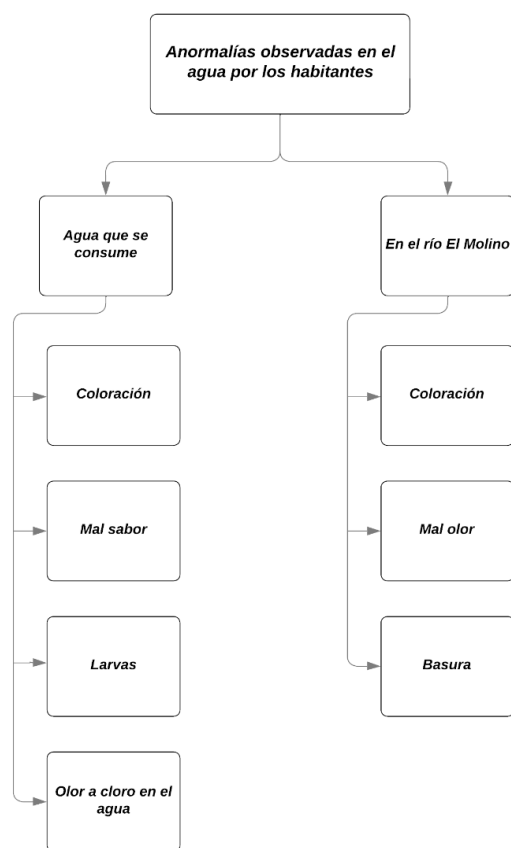
El recurso hídrico de los sitios aledaños al río El Molino, se comporta de dos maneras según la información recolectada a través de las entrevistas, una engloba las anomalías observadas en el agua y la otra la distribución en los hogares. Las anomalías que son observables en el agua del río El Molino se muestran en la **Figura 9** y según la población entrevistada son: coloración, aumento del nivel del agua en la época lluviosa y basura en diferentes puntos de este, esta última en su mayoría en los trayectos abandonados donde no se cuenta con el servicio de recolección de basura, teniendo en cuenta que solo el 63% de las personas encuestadas suele transitar cerca del río.

La población expresa que, las causas de las anomalías vistas en el agua abastecida son el cloro para el tratamiento del agua, las reparaciones y un evento sísmico, para esta última exponen que luego del evento sísmico se produjo un mal sabor y coloración del agua. También expresan que los factores biológicos que perciben como anomalía son materia orgánica y larvas.

El 95% de los entrevistados tienen abastecimiento en sus hogares por la cual pagan una tarifa de agua, sin embargo, se distribuye el agua de forma restringida, más frecuentemente por la tarde y noche. Además, el 50% de la población entrevistada reconoce que es una distribución desigual del recurso hídrico, por otro lado, el 30% expresa que no ha percibido una desigualdad de ello, cabe destacar que esta parte de la población es la que cuenta con abastecimiento permanente en sus casas, gracias a las instituciones dedicadas a la distribución de agua como ANDA y proyectos de comunitarios localmente conocidos como terreno Magaña y colonia San José, por último, el otro 15% desconocen si existe tal problema.

Figura 9

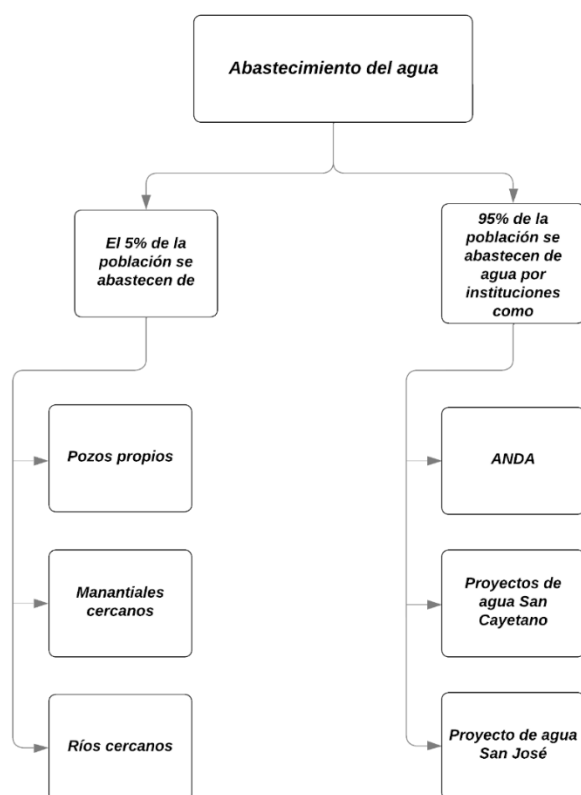
Anomalías observadas por la población entrevistada.



A través de la **Figura 10** se analiza que el 5 % de la población no cuenta con abastecimiento de agua potable en sus casas, para solucionar dicha problemática mencionaron que se abastecen por medio de otras viviendas (vecinos o familiares),

manantiales (Apanteos, Amayito y San José), tanques comunitarios, compra de agua a pipas, pozo propio y quebradas. Adicional a esto, exponen que no utilizan ningún tipo de tratamiento en el agua antes de ser bebida y que nunca se han enfermado por el consumo de esta. Dichas personas habitan en las colonias ubicadas en zonas de difícil acceso que se tenían como zonas rojas debido a la delincuencia como lo expuso un habitante. Estas colonias están al este de la microcuenca del río El Molino, donde su actividad económica principal se basa en la agricultura. **Figura 10**

Esquema de abastecimiento de agua en la población cercana al río El Molino.



Modelo Conceptual

En la microcuenca del río El Molino afloran las formaciones geológicas Bálsamo y San Salvador. En la mayoría de la microcuenca predominan depósitos piroclásticos de la formación San Salvador, siendo piroclastitas ácido-básicas y básicas intermedias que rellenan el valle central, cubriendo un área aproximada de 22.39 km² dentro de la microcuenca. Por otro lado, en el norte se observan afloramientos de los miembros de la

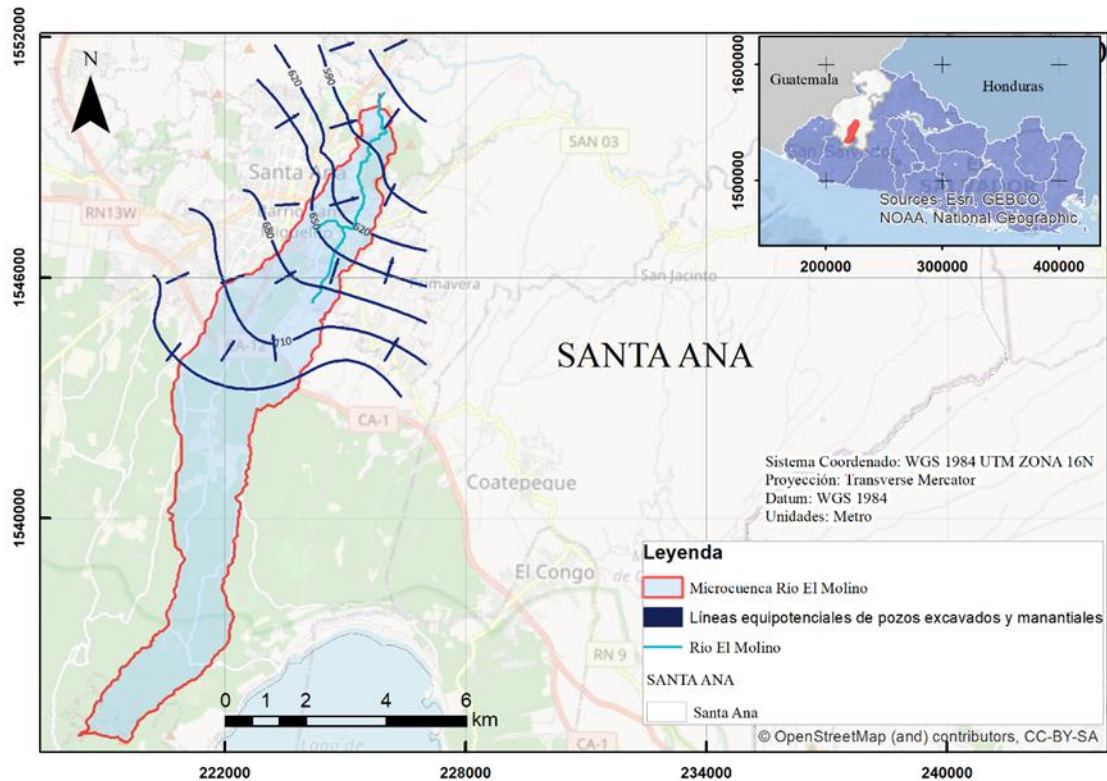
formación Bálsamo, en un área de 0.11 km², siendo epiclastitas volcánicas y piroclastitas, localmente efusivas, básicas-intermedias intercaladas.

También, se identifican tres unidades hidrogeológicas en la microcuenca, la que posee mayor extensión en la microcuenca es la unidad de acuífero volcánico fisurado de gran extensión y posiblemente alta producción, con un área de 24.62 km², esta se describe como mayormente constituida por lavas “andesíticas y basálticas, se encuentran junto a estratos alternados de escorias, lapilli, pómez y cenizas dacíticas” (Alvarado, 2018, p. 4). En la parte suroeste de la microcuenca está la Unidad hidrogeológica acuífero poroso de gran extensión y productividad media, con una extensión de 2.40 km² dentro de la microcuenca. Y al norte de la microcuenca se encuentra la unidad de rocas no acuíferas, constituyendo un área de 2.32 km² de la microcuenca, compuesta mayormente por la formación Bálsamo, que se caracteriza “por su abundancia de arcillas de baja conductividad hidráulica” (Alvarado, 2018, p. 4).

Además, se reconocen al menos dos acuíferos, un acuífero libre en materiales piroclásticos y lavas fracturadas en profundidades entre los 5 y 40 m, y un acuífero confinado más profundo en lavas fracturadas y sedimentos entre los 55 y 120 m. Se determinó un gradiente hidráulico de 0.028 y una dirección de flujo noreste, descrito por las líneas equipotenciales de la **Figura 11**. En la zona norte de la microcuenca se ubica el acuífero libre con coeficiente de almacenamiento de 0.1, con una transmisividad alrededor de 125,000.00 gpd/ft y el nivel freático a 5 m de profundidad. También esta constituye una zona de afloramiento de numerosos nacimientos.

Figura 11

Mapa de líneas equipotenciales a partir de pozos excavados y manantiales en el área de estudio.



Conclusiones

La recarga en la microcuenca del río El Molino, con una extensión de 29.30 km^2 , se da principalmente en la zona sur, constituida por extensión montañosa que es parte de la cordillera del volcán Ilamatepec, esta área es mayormente cubierta por cultivos de café bajo sombra. En la microcuenca existen dos acuíferos, uno superficial y otro más profundo, compuestos mayormente por materiales volcánicos de la formación San Salvador, siendo estos principalmente piroclastos para el más somero, y escoria y lavas fracturadas de tipo basálticas y andesíticas para el más profundo. El volumen de recarga potencial calculado a través de la metodología de Schosinsky es de 12.50 Mm^3 de agua. Las líneas equipotenciales muestran la dirección de flujo de aguas subterráneas en sentido noreste, desde las mayores elevaciones en el sur del área, hacia las más bajas en el norte de la microcuenca.

Con base en la actualización de la clasificación del uso de suelos, se concluye que la microcuenca del río El Molino ha sufrido ligeros cambios en los últimos 10 años, principalmente con la extensión del área urbana correspondiente a la ciudad de Santa Ana, dicha expansión es apreciada en los alrededores del área de estudio, no así en el interior de la microcuenca, por otro lado, se clasificaron usos de suelos constituidos por sistemas agroforestales, así también zonas conformadas por cultivo de café que se han mantenido casi invariantes en los últimos años y un área compuesta por bosque que no muestra cambios relevantes en cuanto a su extensión.

La principal fuente de contaminación difusa identificada y que causa mayor afectación al recurso hídrico son los residuos urbanos, ya que, dicha influencia es perceptible tanto en la coloración y olor en distintas secciones del río El Molino, destacando que, a pesar de ser una fuente potencial difusa, hay puntos a lo largo de este, donde se vierten sin ningún tipo de tratamiento debido a la no existencia de plantas de tratamiento en la zona. Además, se consideró como otra fuente potencial de contaminación difusa a los agroquímicos utilizados para el cultivo de café en la zona de recarga de la microcuenca, cuya área de extensión abarca más de la mitad del área total de esta. Se considera a los cementerios como la tercera fuente de mayor contaminación difusa debido a la lixiviación de materia orgánica. Por último, se encuentran los servicios diversos e industrias, constituyendo 14 puntos identificados dentro de la microcuenca y 21 a los alrededores de esta, que podrían incidir en el recurso hídrico de la zona.

Del 95% de los entrevistados que pagan una tarifa por el servicio, un 50% de estos disponen del abastecimiento de agua de forma restringida, debido a que existe un horario donde es común que se surtan por las tardes y noches. La población más perjudicada cuando se trata del abastecimiento y percepción de la calidad de agua está ubicada al noreste de la zona de estudio, una de las razones es que la zona no posee red de distribución de agua potable y es una localidad con difícil acceso, lo que agrava aún más la situación, dichos habitantes se ven en la obligación de buscar otros medios para obtener el recurso vital, haciendo uso de pozos comunitarios. Además, este mismo grupo de la comunidad Hacienda La Reforma, conoce la ubicación del río El Molino y sufre las consecuencias de la

contaminación que existe en este, ya que no se puede utilizar para riego o la crianza de animales, asimismo perciben los cambios y anomalías en el río.

Se recomienda más investigación de análisis de aguas de tipo físicoquímicos, evaluación de la vulnerabilidad acuífera ante contaminantes, así como la puesta en acción de instituciones correspondientes ante el tratamiento de agua y procurar que el agua de abastecimiento cumpla los requerimientos exigidos por la ley.

Referencias

- ANDA. (2008). *Mapa Hidrogeológico de El Salvador, escala 1:100,000*.
- Alvarado, C. A. (2015). *Modelo conceptual de la parte oeste de la cuenca del río Suquiapa, Santa Ana, El Salvador*. San José: Universidad de Costa Rica.
- Alvarado, C. A. (2018). Caracterización del agua subterránea de la cuenca del río Suquiapa, Santa Ana, El Salvador. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 13(1), 2-7.
- Álvarez-Salas L., Gómez-Aguirre A. y Cano-López W. (2016). Percepciones de los servicios ecosistémicos en el complejo de páramos Frontino-Urrao, departamento de Antioquia, Colombia. *Biota Colombiana*, 17(2), 137–147.
<https://doi.org/10.21068/C2016v17s02a08>
- Amaya, L., Arriola, D., y Cerna, Z., (2015), *Modelación de la calidad físicoquímica de las aguas del río Suquiapa*. Repositorio Institucional de la Universidad de El Salvador.
<https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/8502/1/Modelaci%C3%B3n%20de%20la%20calidad%20f%C3%ADsicoqu%C3%ADmica%20de%20las%20aguas%20del%20r%C3%ADo%20Suquiapa.pdf>
- Bain, R., Cronk, R., Hossain, R., Bonjour, S., Onda, K., Wright, J., . . . Bartram, J. (2014). Global assessment of exposure to faecal contamination through drinking water based on a systematic review. *Tropical Medicine and International Health*.

- Banco Central de Reserva (BCR) de El Salvador y Dirección General de Estadísticas y Censos. (2021). *El Salvador Proyecciones de Población Municipal 2020 – 2030* .
[https://www.bcr.gob.sv/documental/Inicio/vista/El_Salvador_Proyecciones_de_Poblacion_Municipal_2020-2030\(rev2021\).pdf](https://www.bcr.gob.sv/documental/Inicio/vista/El_Salvador_Proyecciones_de_Poblacion_Municipal_2020-2030(rev2021).pdf)
- Baxter, S. (1984). *Léxico Estratigráfico de El Salvador* (pp. 108). Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa; Programa Exploración de Hidrocarburos de El Salvador. San Salvador, El Salvador.
- Código de Salud. (1988, 11 de mayo). Asamblea Legislativa de la República de El Salvador. Artículo 56.
<https://www.transparencia.gob.sv/institutions/minsal/documents/506576/download>
- Cortés, M. (2003). Importancia de los coliformes fecales como indicadores de contaminación en la Franja Litoral de Bahía de Banderas, Jalisco-Nayarit. *Revista Biomédica*, 14(2), 121-123.
- Foster, S. e Hirata, R. (1991). *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- Gómez, O. (2018). Contaminación del agua en países de bajos y medianos recursos, un problema de salud pública. *Revista de la Facultad de Medicina*, 66(1), 7-8.
- Guevara, M., Hernández, W., Rivas, C., y Márquez, E. (2006). Estado de las aguas subterráneas en El Salvador. *Boletín Geológico y Minero*, 117(1), 75-88.
https://www.igme.es/boletin/2006/117_1_2006/Art.6.PDF
- Ibáñez, S., Moreno, H., y Gisbert, J. (2011). *Morfología de las cuencas hidrográficas*. Universitat Politècnica de València. Obtenido de Unidad de Documentación Científica de la Biblioteca:
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10782/Morfolog%c3%ada%20de%20una%20cuenca.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ley del Medio Ambiente. (1998). Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Artículo 49.
<https://www.transparencia.gob.sv/institutions/marn/documents/1538/download>

- Ley General de Recursos Hídricos. (2022, 12 de enero). Autoridad Salvadoreña del Agua. Artículo No 13. <https://www.asa.gob.sv/download/ley-del-agua/>
- Ministerio de Economía y Dirección General de Estadísticas y Censos (DIGESTYC). (2011). *Boletín Estadísticas Vitales 2007 – 2001 Departamento de Santa Ana*.
- Pérez, L. C., & Zambrano, G. A. (2019). Contaminación por aguas residuales e indicadores de calidad. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(6), 1034-1036.
- Quiñonez J. C., (2019). Calidad del Agua en las Américas: El Salvador. En G. Roldán, J. Tundisi, B. Jiménez, K. Vammen, H. Vaux, y E. González. (Eds.). *Calidad del Agua en las Américas* (pp. 308–337). IANAS.
- Schosinsky N., G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista geológica De América Central*, 34(34-35). <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i34-35.4223>