



## ARTÍCULO ORIGINAL

### Evaluación de la recarga potencial hídrica de la cuenca baja del río Paz, Ahuachapán, El Salvador

#### Evaluation of the potential water recharge of the lower basin of the Paz River, Ahuachapán, El Salvador

César Alvarado<sup>1</sup>, Natalia Santamaría<sup>2</sup> Fernando Menjívar<sup>3</sup>

*fecha de recepción: agosto 2025/fecha de aceptación noviembre 2025*

#### Resumen

**Introducción:** El balance hídrico de suelos es un tipo de estudio cuya metodología permite evaluar los elementos del ciclo hidrológico para obtener la variación del almacenamiento del agua en el subsuelo respecto al tiempo y la cuenca hidrográfica de interés. **Objetivo:** Evaluar la recarga potencial hídrica de la cuenca baja del río Paz, así como elaborar un modelo conceptual del agua subterránea para comprender la dinámica y dirección del flujo del acuífero. **Método:** La recarga potencial hídrica obtenida a través de la metodología se calculó en 441 mm/año, implicando un caudal que infiltra en el suelo de la cuenca de 23 347,972.6

<sup>1</sup> Universidad de El Salvador, Facultad de ciencias Naturales y matemáticas. [cesar.alvarado2@ues.edu.sv](mailto:cesar.alvarado2@ues.edu.sv);  
 <https://orcid.org/0000-0002-8501-4852>

<sup>2</sup> Universidad de El Salvador, Facultad de ciencias Naturales y matemáticas. [nataliasantamaria12@gmail.com](mailto:nataliasantamaria12@gmail.com);  
 <https://orcid.org/0009-0002-7573-3658>

<sup>3</sup> Universidad de El Salvador, Facultad Multidisciplinaria de Occidente. [fernandomenjivares98@gmail.com](mailto:fernandomenjivares98@gmail.com);  
 <https://orcid.org/0009-0005-6693-6113>

m<sup>3</sup>/año. Los cambios de uso de suelos en los últimos años han modificado la capacidad de recarga hídrica en la zona, disminuyendo está un 8% ( $\approx$  2 millones de metros cúbicos al año).

**Resultados:** El modelo conceptual muestra que el acuífero de la zona de estudio presenta una condición natural de dirección de flujo y descarga del agua subterránea predominantemente hacia el mar, mientras la recarga se lleva a cabo en la zona montañosa situada al norte de la cuenca. **Conclusión:** La cuenca baja del río Paz presenta una disminución significativa en su capacidad de recarga hídrica debido a los cambios de uso de suelo, principalmente por la expansión de la caña de azúcar. Las áreas con mayor potencial de infiltración corresponden a pastos y granos básicos. El estudio concluye que es necesario implementar estrategias integrales de manejo y protección del recurso hídrico, considerando también los efectos del cambio climático y el incremento en la extracción de aguas subterráneas para garantizar la sostenibilidad del acuífero.

**Palabras clave:** acuífero, agua subterránea, balance hídrico, infiltración, modelo conceptual, recarga potencial hídrica, uso de suelos.

## Abstract

**Introduction:** A soil water balance is a type of study whose methodology allows for the evaluation of the components of the hydrological cycle in order to determine how water storage in the subsurface varies over time and across the watershed of interest. **Objective:** To evaluate the potential water recharge of the lower Paz River basin, as well as to develop a conceptual groundwater model to understand the dynamics and direction of aquifer flow. **Method:** The potential water recharge obtained through the methodology was calculated at 441 mm/year, implying a flow rate infiltrating the basin's soil of 23,347,972.6 m<sup>3</sup>/year. Land-use changes in recent years have altered the area's groundwater recharge capacity, reducing it by 8% ( $\approx$  2 million cubic meters per year). **Results:** The conceptual model shows that the aquifer in the study area has a natural flow direction and groundwater discharge predominantly toward the sea, while recharge occurs in the mountainous area located to the north of the basin. **Conclusion:** The lower Paz River basin exhibits a significant decrease in its groundwater recharge capacity due to land-use changes, primarily the expansion of

sugarcane cultivation. The areas with the greatest infiltration potential are pastures and basic grain crops. The study concludes that it is necessary to implement comprehensive strategies for the management and protection of water resources.

**Keywords:** aquifer, conceptual model, groundwater, infiltration, land use, potential water recharge, water balance.

## **Introducción**

Este trabajo de investigación consiste en la aplicación del método del balance hídrico de suelos en la cuenca baja del río Paz, localizada al occidente de la República de El Salvador, en el departamento de Ahuachapán, para generar el cálculo de la recarga potencial hídrica y posteriormente, estimar la recarga del acuífero de la zona de estudio y así, tener una cifra que indique la cuantificación del recurso hídrico. En la zona de estudio se han identificado cambios drásticos del uso de suelos y afectaciones a la calidad y disponibilidad del agua subterránea a lo largo de los años, debido a diversos factores, destacando entre estos el crecimiento de la industria azucarera según la Unidad Ecológica Salvadoreña (UNES, 2016).

Respecto a lo planteado, es necesario cuantificar los principales elementos involucrados en el ciclo hidrológico según Marini y Piccolo (2000), y como se ven influenciados por las afectaciones anteriormente especificadas, en especial, al almacenamiento de aguas subterráneas en el acuífero existente en la zona.

En esta investigación, el acuífero a estudiar contenido en la cuenca baja del río Paz es de tipo poroso costero, los cuales están caracterizados por tener como contorno una interfaz continente-mar, a través de la cual, en condiciones naturales se da la descarga de aguas dulces continentales al mar, así como también se propicia la descarga a través de la evaporación, ya que el nivel freático, a comparación de acuíferos continentales está próximo a la superficie o hay encharcamiento según Bocanegra y Custodio (1994), siendo estos factores que se deben tener en cuenta cuando se evalúa el riesgo de contaminación superficial en estos acuíferos en específico.

El recurso hídrico está siendo constantemente amenazado principalmente por la incidencia antrópica, considerando que una parte de los asentamientos humanos se ubica en zonas costeras, donde las actividades turísticas, poblacionales y agrícolas necesitarán ser suplidas intensivamente con elevadas cantidades de agua dulce, lo cual pone en riesgo la disponibilidad de las aguas subterráneas (Bocanegra y Custodio, 1994). Descrita la situación, es preciso aplicar herramientas para realizar la evaluación de los elementos del ciclo hidrológico, siendo los balances hídricos de suelos, métodos capaces para evaluar la evolución y comportamiento hidrológico de acuíferos (Santillán et al., 2013).

Por lo tanto, es necesario estimar el potencial de estos acuíferos, definido como el máximo volumen de aguas subterráneas para extraer de un acuífero sin que este sea explotado, a través del cálculo de la recarga al acuífero por medio de un balance hídrico de suelos (Schosinsky, 2006). En esta investigación, la metodología utilizada para llevar a cabo el balance hídrico de suelos es la desarrollada por Schosinsky (2006), la cual implica la realización de pruebas de permeabilidad hidráulica para el cálculo de la capacidad de infiltración del suelo por medio del permeámetro de Guelph, así como el uso de datos de precipitación y evapotranspiración mensual provenientes de estaciones meteorológicas y estimación de distintos parámetros concernientes a propiedades físicas del suelo.

### **Metodología**

A partir de la revisión, recopilación y análisis de antecedentes, localización de zonas de interés, capacitación y preparación logística, se analizaron los materiales y métodos apropiados para recabar información para el cálculo de la recarga potencial hídrica y caudal que recarga al acuífero, así como para la elaboración del modelo conceptual.

### **Objetivo Ubicación del Área de Estudio**

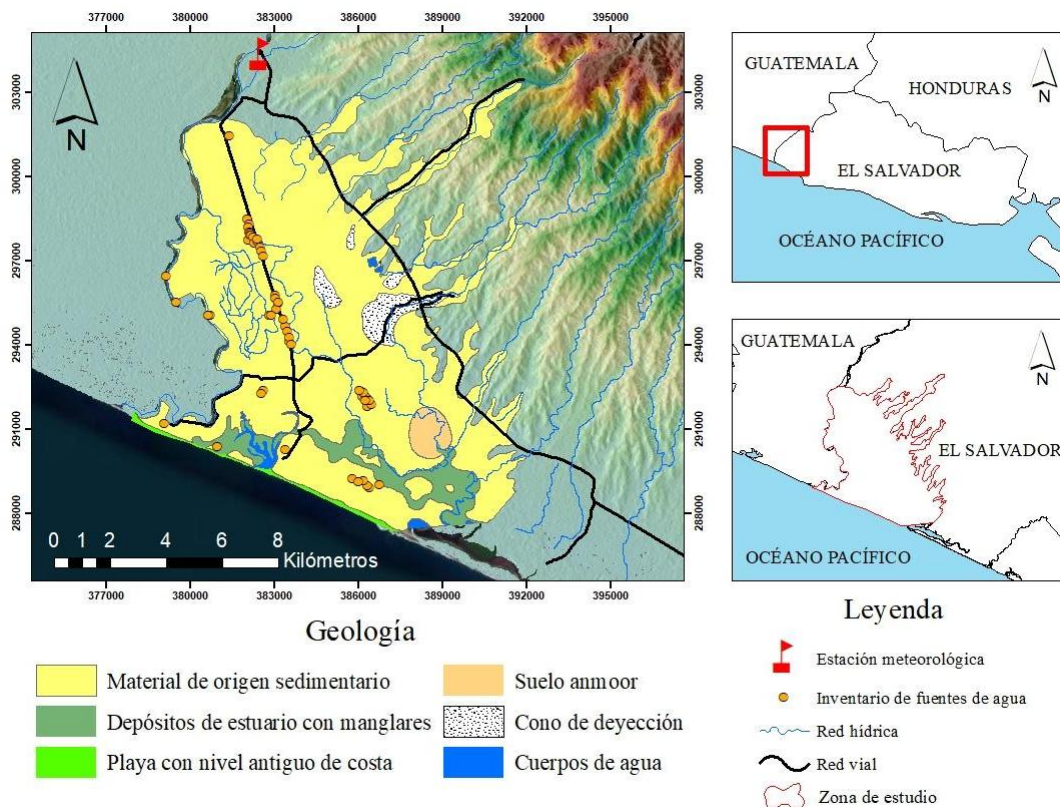
El área de estudio corresponde a la cuenca baja del río Paz (Figura 1) perteneciente a la República de El Salvador, localizada en el municipio de San Francisco Menéndez, en el departamento de Ahuachapán. El área limita al norte con el municipio de Tacuba y la República de Guatemala, al este con los municipios de Tacuba y Jujutla, al sur con el océano Pacífico y al oeste con la República de Guatemala. La delimitación oficial de la cuenca del

río Paz alcanza un área total de 2,647 km<sup>2</sup>, de los cuales 925 km<sup>2</sup> (34%) corresponden a territorio salvadoreño y los restantes 1,722 km<sup>2</sup> (66%) son parte del territorio guatemalteco y tiene una longitud de 134 km (OEA, 1998, como se citó en Rodríguez Herrera, 2010).

Acorde al Plan Maestro de Desarrollo y Aprovechamiento de los Recursos Hídricos (PLAMDARH, s.f.) se citó en Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET, 2005), la zona de estudio está ubicada en la región o cuenca hidrográfica Paz, con un área de 919.93 km<sup>2</sup>, colindando al este con la región Cara Sucia–San Pedro. La delimitación de la zona de estudio está basada en la geología que compone únicamente a materiales sedimentarios.

**Figura 1**

*Mapa de ubicación de la zona de estudio.*



Fuente: Elaboración propia.

## Generalidades de la Zona de Estudio

La investigación indica que la geología de la zona de estudio está clasificada según Wiesemann (1975), como Depósitos Sedimentarios del Cuaternario (Q'f), constituida por depósitos de aluviones con intercalaciones de materiales piroclásticos, sedimentos volcánicos detríticos con materiales piroclásticos y corrientes de lava andesíticas y basálticas intercaladas.

Determinadas por sus materiales constituyentes, las características hidrogeológicas están definidas en esta zona a través de la unidad Acuífero Poroso de Gran Extensión y Productividad Media según el mapa hidrogeológico elaborado por la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA, 2008), cuyos materiales tienen una distribución granulométrica de varía de fina a gruesa y por el grado de compactación de los materiales constituyentes, las conductividades hidráulicas varían de medias a bajas. Esta unidad puede tener un espesor de más de 50 m.

Respecto al clima de la zona de estudio, está clasificado como Sabanas Tropicales Calientes–Tierra Caliente–Planicies Internas de 200 a 800 m.s.n.m., de acuerdo con la Clasificación Climática de Köppen-Geiger (1936). Según mapas del Sistema de Información Hídrica (SIHI) del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador (MARN), la precipitación promedio anual de la zona de estudio varía entre 1,142 mm a 1,768 mm de lluvia. La red hídrica de la zona está constituida por los ríos Zanjón El Aguacate, Zanjón El Chino, Zanjón La Danta, entre otros, mediante los cuales se lleva a cabo la escorrentía superficial de la zona de estudio (Campos, 2016).

La recarga hídrica en la zona se realiza en la zona norte de la cuenca, en específico, en la cadena montañosa de la cordillera Apaneca-Ilamatepec, desde la cual se genera el drenaje superficial y, por consiguiente, se da un drenaje subterráneo que converge predominantemente hacia el acuífero poroso costero en el sector sur (Campos, 2016). Con base en la información contenida en el Mapa de Uso de Suelos de El Salvador del Centro Nacional de Registros (1996) se tiene que los principales usos de suelo de la zona de estudio

son: Bosque natural, bosque salado o de mangle, caña de azúcar, cuerpos de agua, pastos y granos básicos, musáceas, centros turísticos y tejido urbano.

Sin embargo, en la zona se han podido distinguir áreas significativas de palmeras oleíferas, platanales, bananeras y cultivos varios, que se confirma con base en lo observado durante la campaña de campo realizada (Alvarado et al., 2021). Asimismo, se identifica un aumento progresivo de la extensión del uso de suelo correspondiente a la caña de azúcar, de acuerdo con la variación de los mapas de uso de suelos a lo largo de 20 años, aproximadamente. Con toda esta información anteriormente especificada, uno de los alcances que permite la investigación es el de elaborar un modelo conceptual, el cual describe la dinámica de las aguas subterráneas de la cuenca baja del río Paz.

### **Recarga Potencial Hídrica al Acuífero**

Para estimar la recarga potencial hídrica, se utiliza el método del balance hídrico de suelos de Schosinsky (2006), el cual se basa en el principio de conservación de la materia, es decir, que el agua que entra al suelo es igual al agua que se almacena en el suelo más el agua que sale de él. Las entradas, de acuerdo a Schosinsky (2006) son debidas a la precipitación y posterior infiltración del agua hacia el suelo y las salidas se deben a la evapotranspiración de las plantas y a la descarga de ríos y acuíferos.

Este método determina el caudal de agua lluvia que recarga al acuífero, una vez sucedidos los procesos de la infiltración, extracción de agua por plantas y la evapotranspiración (Alvarado y Barahona, 2017). Para llevar a cabo la metodología de Schosinsky (2006) se requieren datos de distintos parámetros, entre los cuales, de acuerdo a Alvarado (2020) se involucran precipitación, evapotranspiración, geología, vegetación, uso de suelo, topografía y textura e infiltración del suelo.

Para el cálculo del balance hídrico se relacionó la información meteorológica de la estación más cercana, ubicada en el municipio de San Francisco Menéndez. Toda la información mencionada y posteriormente recopilada, fue ingresada en una hoja electrónica de Excel elaborada por Schosinsky (2006), denominada “Balance hídrico de suelos” para el

procesamiento de los datos y obtención de la recarga potencial hídrica de la zona de estudio y, teniendo el área de esta se obtiene el caudal que recarga al acuífero.

La elección de este método radica en que, a comparación de otros, no presenta muchas limitaciones técnicas y está sujeto a que se realicen mediciones y recolección de muestras de suelo en campo, de lo contrario, se recurre a estimaciones provenientes de distintas fuentes bibliográficas, debido a la limitación de equipo especializado. A su vez, existen mapas que muestran distintas zonas a lo largo del país con sus correspondientes valores de recarga hídrica, sin embargo, no se les brinda una actualización para reflejar cambios en la recarga a lo largo del tiempo.

### **Pruebas de Permeabilidad Hidráulica**

Se realizaron ocho pruebas de permeabilidad hidráulica distribuidas en la zona de estudio para calcular la capacidad de infiltración del suelo por medio del permeámetro de Guelph, de acuerdo con los tipos de uso de suelo identificados, dado que una prueba de permeabilidad hidráulica debe ser representativa del uso de suelo en el lugar en la que se lleva a cabo. El permeámetro de Guelph es utilizado para el cálculo de la conductividad hidráulica saturada de campo en la zona no saturada  $K_{fs}$  (Reynolds y Elrick, 1986).

El permeámetro consiste en la base del principio físico del tubo de Mariotte, donde se mantiene una carga constante de agua en un pozo cilíndrico, y el ensayo consiste en medir el caudal de infiltración necesario para mantener constante el nivel de la carga (Macías et al., 2018). En campo, para realizar las mediciones correspondientes, se perfora un agujero en el suelo no mayor de 50 cm de profundidad donde se introduce el extremo inferior del permeámetro por donde el agua ingresará al suelo y se miden los descensos de nivel de agua en el interior del permeámetro respecto al tiempo.

La información obtenida en campo fue procesada en la hoja electrónica de Excel elaborada por Soilmoisture Equipment Corp denominada “Guelph Permeameter Quick Calculator” la cual permite ingresar además de los datos obtenidos en campo, estimaciones de propiedades físicas del suelo para brindar la conductividad hidráulica saturada. El dato proporcionado después del procesamiento de los datos obtenidos a partir del método será



usado en el apartado de infiltración básica en la metodología de Schosinsky. La utilización en campo de este método radica en la sencillez de la técnica, rápida adquisición de datos y menor cantidad de operarios (una persona basta) (Alvarado y Barahona, 2017).

### **Inventario de Fuentes de Agua**

Se llevó a cabo un inventario de fuentes de agua, con el fin de medir la profundidad de niveles freáticos que, mediante un procesamiento de los datos obtenidos se permitirá visualizar la red de flujo y dinámica del agua subterránea, así como para la identificación de las zonas de recarga y descarga de la cuenca. El inventario está constituido por pozos excavados y sistemas de extracción de fuentes de agua somera (punteras), con su respectiva identificación y georreferenciación en campo. Se identificaron 15 fuentes de agua correspondientes a pozos excavados que son monitoreados por organizaciones locales, así como 42 fuentes de agua entre pozos excavados y punteras en la campaña de campo realizada.

La profundidad del nivel freático es obtenida por medio de la introducción al pozo o puntera de una sonda de nivel aferrada al extremo de un carrete graduado en centímetros, donde el sensor de la sonda emite un sonido al entrar en contacto con el agua. También se registraron, además de la distancia del broquel de pozos excavados y punteras al agua, la profundidad del broquel al suelo, cuya diferencia brinda como resultado la profundidad del nivel freático, respecto a la superficie del suelo.

### **Sistemas de Información Geográfica**

La información recopilada y georreferenciada en campo se almacena, procesa y analiza mediante el software de Sistemas de Información Gráfica (SIG) ArcGIS, dado el fácil manejo de los datos, la sencillez de su interfaz y la variedad de herramientas de geo procesamiento que ofrece, donde en su entorno se visualiza la integración de datos georreferenciados, tales como las locaciones del inventario de fuentes de agua y las pruebas de infiltración.

Para generar el mapa de la red de flujo del agua subterránea, a partir de los datos de niveles estáticos proporcionados por el inventario de fuentes de agua, se utiliza el software Surfer, especializado en la generación de mapas en 2 o 3 dimensiones a través de los cuales

se permite visualizar la distribución espacial de un determinado parámetro medido en campo, en este caso, la profundidad del nivel freático. Por tanto, se realizó la interpolación de los datos obtenidos a través del software, lo que permitió interpretar, además de la red de flujo y la dirección del agua subterránea, la identificación zonas de recarga y descarga de la cuenca.

## Resultados

Los resultados de la investigación se dividen en los siguientes apartados: pruebas de permeabilidad hidráulica, balance hídrico de suelos y modelo conceptual de agua subterránea de la cuenca baja del río Paz.

### Pruebas de Permeabilidad Hidráulica

Por medio del desarrollo de las pruebas de permeabilidad hidráulica, se determina la capacidad de infiltración del suelo y a partir de ello se determina la recarga al acuífero en la zona, las cuales se muestran a mayor detalle en el apartado balance hídrico de suelos. En la Figura 2 se ilustra el permeámetro de Guelph.

#### Figura 2

*Permeámetro de Guelph.*



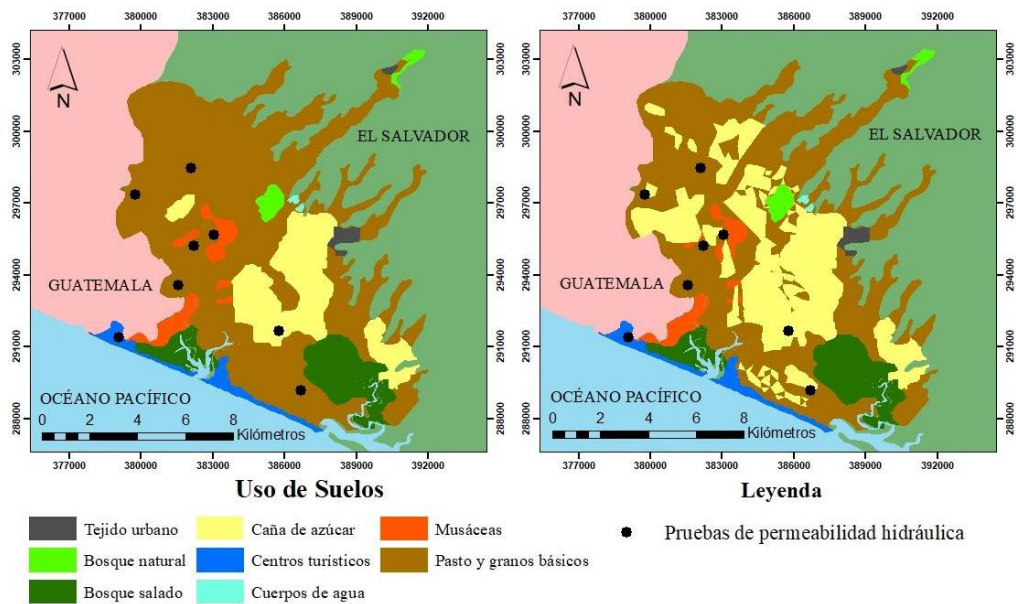
Fuente elaboración propia

En la Figura 3 se observa el mapa de ubicación y distribución espacial de las pruebas de permeabilidad hidráulica realizadas en el área de estudio, así como el uso de suelo que

corresponde a cada uno de los sitios medidos y en la Tabla 1, se muestra el resumen de los resultados obtenidos del procesamiento del cálculo de infiltración por medio de la hoja electrónica de Soilmoisture.

Figura 3

Mapa de usos de suelo de los años 1996 (izq.) y 2016 (der.) y ubicación de pruebas de permeabilidad hidráulica.



Fuentes: Elaboración propia.

Tabla 1

Resultados de pruebas de permeabilidad hidráulica.

| Código de prueba | Ubicación              | K (cm/min) | Uso de suelo   |
|------------------|------------------------|------------|----------------|
| PP1              | Calle Santa Teresa     | 0.03107    | Pastos         |
| PP2              | Calle para El Diamante | 0.11516    | Caña de azúcar |
| PP3              | Ruta del Castaño       | 0.03007    | Pastos         |

|     |                       |         |                |
|-----|-----------------------|---------|----------------|
| PP4 | Manglar Bola de Monte | 0.00062 | Bosque salado  |
| PP5 | Rancho San Marcos     | 0.19892 | Pastos         |
| PP6 | Hacienda El Diamante  | 0.00014 | Caña de azúcar |
| PP7 | Zanjón El Chino       | 0.00052 | Bosque natural |
| PP8 | Caserío El Porvenir   | 0.01768 | Pasto          |

### Balance Hídrico de Suelos

La estimación de la recarga potencial hacia el sistema acuífero poroso costero se fundamenta en el modelo analítico propuesto por Schosinsky y Losilla (2000), donde calcula y describe varios factores que influyen y son de importancia para analizar y poder estimar la recarga potencial hacia el acuífero con base en la lluvia mensual.

### Metodología de Schosinsky

Con la información recopilada se divide en el cálculo de balance hídrico por los tipos de uso de suelo más representativos en la zona: caña de azúcar, pastos y granos básicos, bosque natural y bosque salado. La Tabla 2 resume los valores más importantes del balance de Schosinsky en la zona de estudio en mm/año, obtenidos del procesamiento de los datos a través de este.

**Tabla 2**

*Variables obtenidas del balance de suelos por el método de Schosinsky, en mm/año.*

| Precipitación | Infiltración | Escurrecimiento | Evapotranspiración | Retención<br>follaje | Recarga<br>potencial |
|---------------|--------------|-----------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| 1526          | 1042         | 252             | 2015               | 233                  | 441                  |

Fuente elaboración propia a partir Schosinsky (2006).

La recarga potencial total que representa la altura de la columna de agua que infiltra en el área de estudio es de 441 mm/año y teniendo el área de la cuenca, se obtiene el caudal que infiltra en el suelo para recargar el acuífero de 23 347,972.6 m<sup>3</sup> anualmente, de los cuales

de esta cifra el 68.5% es aportado por pastos y granos básicos mientras que el cultivo de caña aporta un 25%. Es de tomar en cuenta que el cultivo de caña ha crecido 2.65 veces más desde el siglo pasado, por lo que la posibilidad de recarga puede haber disminuido significativamente.

### **Modelo Conceptual de Agua Subterránea de la Cuenca Baja del Río Paz**

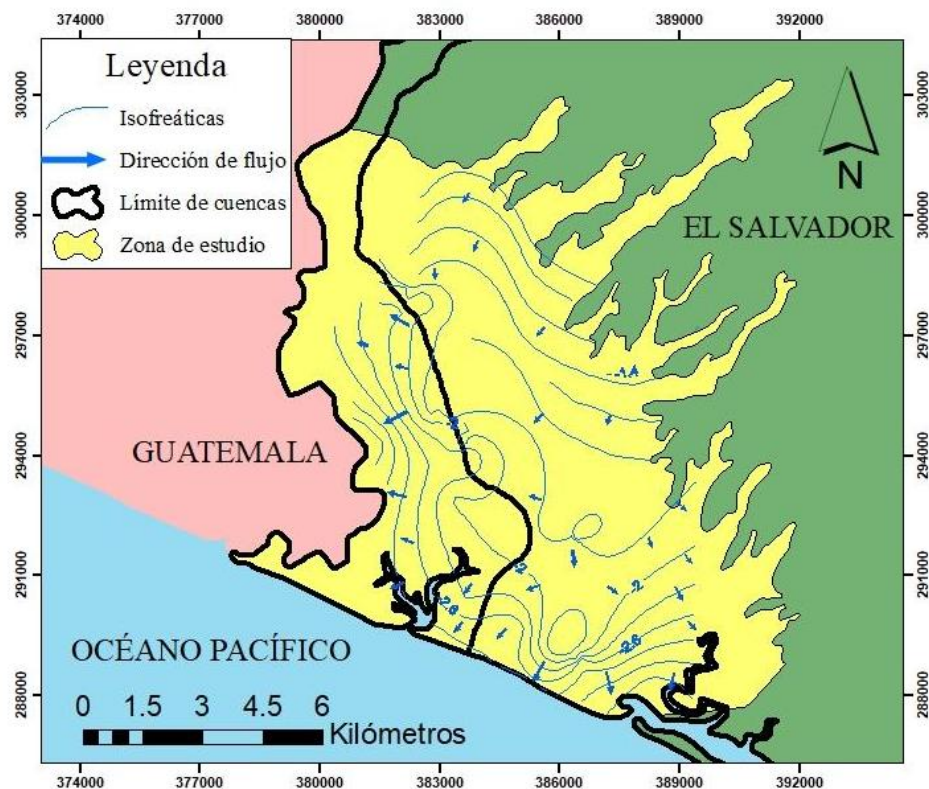
A partir de la información geológica e hidrogeológica que se ha recolectado, se describe el modelo conceptual de agua subterránea de la cuenca baja del río Paz.

En la zona de estudio geológicamente predominan materiales sedimentarios, tales como depósitos acuáticos con intercalaciones de piroclastitas (Q'f), incluyendo en zonas depósitos de estuarios con o sin manglares y playa barra costera, los cuales pertenecen al periodo Cuaternario de la era Cenozoica (Campos, 2016). Hidrogeológicamente, el área de estudio está constituida por la Unidad Acuífero Poroso de Gran Extensión y Productividad Media (ANDA, 2008).

Las propiedades hidráulicas que caracterizan el acuífero poroso costero de la zona de estudio lo definen como un acuífero libre y según Campos (2016), la conductividad hidráulica varía de 1.22 a 54.83 m/d. En cuanto a la dirección del flujo de agua subterránea, se puede observar según la Figura 4, que el acuífero estudiado presenta una condición natural de descarga; en primer lugar, la dirección del flujo es predominante hacia el mar en la parte este, es decir, lo que corresponde al acuífero de la región hidrográfica Cara Sucia–San Pedro; mientras que el acuífero que corresponde a la región hidrográfica Paz, la dirección del flujo tiene una mayor tendencia hacia el río Paz que hacia el mar, y las profundidades observadas son muy someras y varían desde 40 cm hasta 2.7 m de profundidad.

**Figura 4**

*Mapa de equipotenciales y dirección de flujo.*



Nota: Al oeste de la zona de estudio se ubica la región hidrográfica Paz y al este se ubica la región hidrográfica Cara Sucia-San Pedro. Elaboración propia.

## Discusión

A continuación, se realiza un análisis de resultados que permiten discutir los datos obtenidos, comparar con otros registros y elaborar posibles descripciones y posteriores conclusiones de la dinámica del agua subterránea y cuantificación del recurso hídrico.

## Infiltración

Para los valores de infiltración obtenidos se observa una variación muy importante basado en el tipo de uso de suelo. Cabe destacar que los valores de las pruebas de

permeabilidad hidráulica están relacionados con la cuantificación de la recarga potencial, dado que sirven de diagnóstico para identificar zonas donde se propicia la recarga de agua en el suelo de acuerdo con el tipo de uso de suelo.

El bosque salado y el bosque natural tienen valores muy bajos de infiltración básica, lo que se relaciona con zonas de poca posibilidad de recarga acuífera, mientras que las zonas de suelo relacionadas con pastos y granos básicos y caña de azúcar tienen valores relativamente elevados de infiltración. La Tabla 3 brinda los datos de infiltración y el tipo de permeabilidad asociado al uso de suelo donde se llevaron a cabo las pruebas.

**Tabla 3**

*Valores de infiltración básica obtenidos en la campaña hidrogeológica.*

| Código de prueba | Ubicación              | Infiltración (cm/hora) | Uso de suelo   | Tipo de permeabilidad |
|------------------|------------------------|------------------------|----------------|-----------------------|
| PP1              | Calle Santa Teresa     | 4.50                   | Pastos         | Alta                  |
| PP2              | Calle para El Diamante | 4.10                   | Caña de azúcar | Alta                  |
| PP3              | Ruta del Castaño       | 1.60                   | Pastos         | Alta                  |
| PP4              | Manglar Bola de Monte  | 0.10                   | Bosque salado  | Baja                  |
| PP5              | Rancho San Marcos      | 8.70                   | Pastos         | Alta                  |
| PP6              | Hacienda El Diamante   | 0.02                   | Caña de azúcar | Muy baja              |
| PP7              | Zanjón El Chino        | 0.06                   | Bosque natural | Muy baja              |
| PP8              | Caserío El Porvenir    | 4.50                   | Pastos         | Alta                  |

*Fuente elaboración propia*

## Uso de suelo

En el caso del uso de suelo, es común observar el cambio de tipo de uso de suelo a lo largo de los años, en este caso particular el tejido urbano ha incrementado relativamente poco, sin embargo, el cultivo de caña se ha visto aumentado significativamente. Esto se relaciona directamente con los valores de infiltración analizados y se enlaza con el balance hídrico, donde se espera que haya cambios significativos en la recarga potencial del agua subterránea. Por otro lado, existen algunos cambios de uso de suelos que no existían en la zona hace más de 30 años, entre ellos el cultivo de plátano y maní, pero que todavía no son áreas considerables para modificar la recarga potencial del acuífero (Alvarado et al., 2021).

Algunos factores como las características meteorológicas y de los tipos de suelo condicionan el consumo de agua para satisfacer el requerimiento hídrico de la caña de azúcar, la cual ha experimentado un incremento de la extensión de suelo ocupada en la zona de estudio, estando las características climáticas influyendo a través de variables como la temperatura y la evapotranspiración potencial, y por parte del tipo de suelo, la textura, permeabilidad y capacidad de retención de humedad, que juegan un papel importante en el desarrollo vegetativo de las plantas, siendo este último factor del que depende el aprovechamiento de agua de estas.

La zona costera está caracterizada por presentar elevados valores de temperatura y evapotranspiración potencial, aunado a esto, el tipo de suelo que predomina de origen aluvial, con texturas franco arenosas y abundante arcilla y materia orgánica, confiriéndole moderada a buena permeabilidad y capacidad de campo en el orden del 24% de humedad y punto de marchitez en el orden del 12% de humedad, lo cual provee una disponibilidad de humedad resultante para el aprovechamiento de los cultivos en el orden del 12% (UNES, 2016). En síntesis, estos factores impiden que el agua pueda ser aprovechada por la caña de azúcar, necesitándose un mayor suministro de agua para satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos de la zona de estudio a través del riego. En la zona de estudio esta demanda de agua es abastecida por medio de pozos perforados y si la modificación del uso de suelo incrementa, los niveles de extracción de agua subterránea tendrán que aumentar.



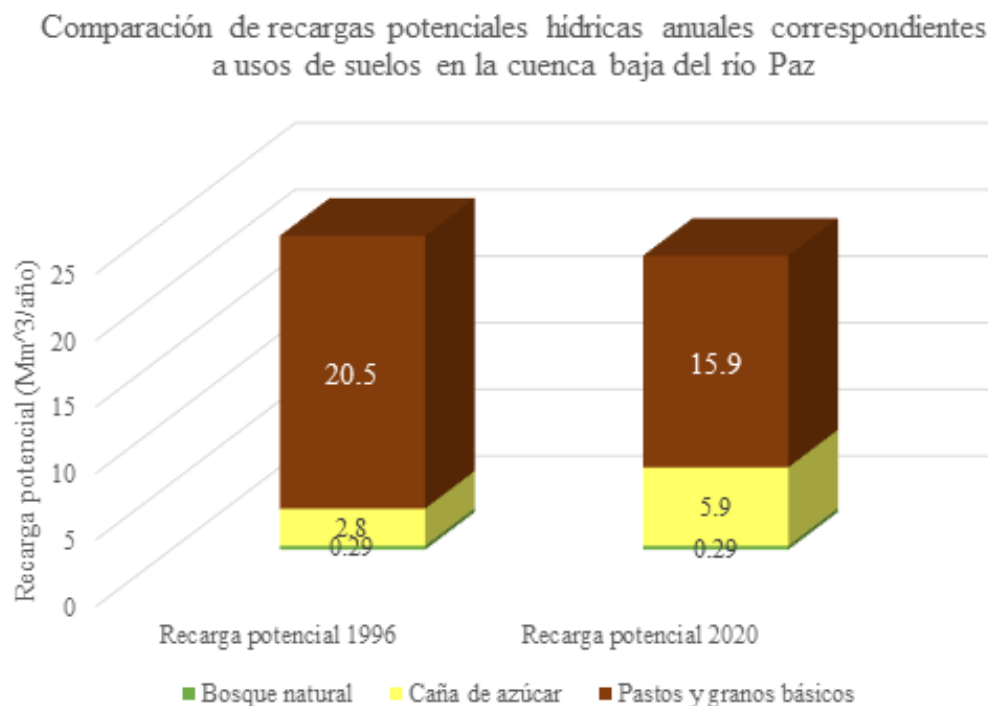
## Balance Hídrico de Suelos

El Sistema de Información Hídrica de El Salvador del MARN expone un mapa de recarga potencial hídrica a nivel nacional y en la zona de estudio oscila entre 130 mm hasta 580 mm anuales, siendo un intervalo en el que se encuentra el valor de la recarga potencial hídrica brindado en esta investigación.

Se realiza el ensayo de determinar el balance hídrico en el periodo que el cultivo de caña era mucho menor en extensión (1996) comparando dicho resultado con el obtenido en el período de tiempo en el que se realizó el presente estudio en 2020, como se presenta en la Figura 5, la cual solo incluye los tipos de suelo más representativos por su extensión e influencia en la recarga potencial total.

**Figura 5**

*Comparación de recarga potencial estimada entre el año 1996 y 2020.*



Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar claramente que la disminución de área de uso de suelo de pastos y granos básicos contribuye significativamente a la disminución de la recarga potencial total de la zona de estudio en casi 2 millones de metros cúbicos al año.

### **Modelo Conceptual**

El modelo que se determina en esta investigación detalla de forma más precisa los aspectos presentados por investigaciones previas, tales como dirección de flujo de agua, profundidad del nivel freático y recarga potencial hídrica. La influencia del río Paz en la dirección del flujo de agua subterránea se puede apreciar por medio de este modelo, a diferencia de otros estudios que no identificaban de forma clara esta contribución.

### **Conclusiones/recomendaciones**

La recarga potencial total del área de estudio es de 23 347,972.6 m<sup>3</sup> anualmente, de los cuales el 68.5% es aportado por pastos y granos básicos, mientras que el cultivo de caña aporta un 25%, considerando que el cultivo de caña ha crecido 2.65 veces más desde el siglo pasado, por lo que la posibilidad de recarga ha disminuido significativamente. Las áreas que presentan mayor potencial de recarga son las correspondientes a las asignadas para pastos y granos básicos, dado que, son las que presentan valores más altos de infiltración básica.

Respecto al modelo conceptual, se puede concluir que la dirección del flujo de agua subterránea de la cuenca presenta una condición natural de descarga predominante hacia el mar en la parte este del área de estudio, es decir lo que corresponde a la región hidrográfica Cara Sucia-San Pedro, mientras que las aguas subterráneas del acuífero que corresponden a la región hidrográfica Paz poseen una dirección del flujo que tiene una mayor tendencia hacia el río que hacia el mar.

En vista de las afectaciones que implica la disminución de la recarga en el suelo, se recomienda diseñar un plan de manejo integral del recurso hídrico, en conjunto con todos los involucrados del uso y mantenimiento del agua, para una intervención eficaz ante los cambios que se han llevado a cabo. A partir de estas conclusiones se recomienda que gestión del recurso hídrico en la zona debe implementar también medidas de protección ante el cambio climático, ya que la demanda de agua subterránea se ha visto incrementada y sin regulación

alguna, colocando a la población en una situación muy vulnerable a las alteraciones de regímenes de lluvia, sequías, así como también, a los efectos de la contaminación.

## Referencias

- Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA). (2008). Mapa hidrogeológico. ANDA. Disponible en: <https://www.anda.gob.sv/mapa-hidrogeologico/>
- Alvarado, C., & Barahona, M. (2017). Comparación de tres métodos de infiltración para calcular el balance hídrico del suelo, en la Cuenca del río Suquiapa, El Salvador. *Cuadernos de Investigación UNED*, 9(1), 23-33. doi: 10.22458/urj.v9i1.1674
- Alvarado, C. (2020). Análisis de la recarga potencial del acuífero superficial en Isla de Méndez, Jiquilisco, Usulután. *Minerva*, 3(2), 46-59. <https://revistas.ues.edu.sv/index.php/minerva/article/view/2506>
- Alvarado, C., Wildi, M., Castillo, L., Santamaría, N. y Menjívar, F. (2021). Informe hidrogeológico de la cuenca baja del río Paz del municipio de San Francisco Menéndez. Disponible en: <https://1library.co/document/q2700jpy-informe-hidrogeologico-cuenca-baja-municipio-francisco-menendez-ahuachapán.html>
- Bocanegra, E. y Custodio, E. (1994). Utilización de acuíferos costeros para abastecimiento. *Ingeniería del Agua*, 1(4), 49-78. doi: 10.4995/ia.1994.2649
- Campos, G. (2016). *Estudio de la salinidad del acuífero costero de la cuenca hidrográfica Cara Sucia, Ahuachapán* [Tesis de maestría no publicada], Universidad de El Salvador.
- Centro Nacional de Registros (CNR). (1996). *Mapa de Uso de Suelos*. Centro Nacional de Registros
- Köppen, W. y Geiger, R. (1936). *Das geographische System der Klimate*. Borntraeger Science Publishers.

- Marini, M. y Piccolo, M. (2000). El balance hídrico en la cuenca del río Quequén Salado, Argentina. *Papeles de Geografía*, (31), 39-53. ISSN: 0213-1781.
- Reynolds, W. D. y Elrick, D. E. (1986). A method for simultaneous in situ measurement in the vadose zone of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity-pressure head relationship. *Ground Water Monitoring Review*, 6 (1), 84-95. doi: 10.1111/j.1745-6592.1986.tb01229.x
- Santillán, E., Dávila-Vazquez, G., Anda, J. y Díaz, J. (2013). Estimación del balance hídrico mediante variables climáticas, en la cuenca del río Cazonas, Veracruz, México. *Ambiente & Agua*, 8(3), 104-117. doi: 10.4136/1980-993X
- Schosinsky, G. y Losilla, M. (2000). Modelo analítico para determinar la infiltración con base a la lluvia mensual. *Geológica de América Central*, 34-35, 43-55. doi: 10.15517/RGAC.V0I23.8579
- Schosinsky, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Geológica de América Central*, 34-35, 13-30. doi: 10.15517/RGAC.V0I34-35.4223
- Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET). (2005). Balance hídrico integrado y dinámico en El Salvador. Servicio Nacional de Estudios Territoriales.
- Unidad Ecológica Salvadoreña (UNES). (2016). *Impactos de la expansión en la Industria Azucarera en la zona Marino Costera de El Salvador: Caso Zona Baja río Paz*. Unidad Ecológica Salvadoreña.
- Rodríguez Herrera, E. (2010). Dinámica hidrológica en la cuenca baja del río Paz. *Wetlands International*
- Wiesemann, G. (1975). *Remarks on the geologic structure of the Republic of El Salvador*. Mitt. Geol.-Palaont.