

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LOS CUERPOS DE AGUA SUBTERRÁNEA A
PARTIR DE LA ADAPTACIÓN DE UN ÍNDICE DE SALUD GLOBAL PARA LOS
ACUÍFEROS.

CARLOS DANIEL PÉREZ GARCÍA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

BUCARAMANGA

2021

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LOS CUERPOS DE AGUA SUBTERRÁNEA A
PARTIR DE LA ADAPTACIÓN DE UN ÍNDICE DE SALUD GLOBAL PARA LOS
ACUÍFEROS.

Carlos Daniel Pérez García

Director:

David Joseph Auresy Serrano Suárez

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

BUCARAMANGA

2021

Dedicatoria

Dedico mi trabajo principalmente a Dios quien cuida de mi en la gloria y en las adversidades, y también a toda mi familia quienes me apoyaron en mis buenas y malas decisiones.

Agradecimientos

A Dios por ayudarme en mis peores situaciones y sacarme adelante pese a todas las adversidades que he vivido a lo largo de mi vida.

A toda mi familia quienes son mi talón de Aquiles, pero a la vez mi motivo para seguir adelante.

A mi padre, a mi madre, mi nona, mi madrastra, y mi hermano quienes han hecho hasta lo imposible por cumplir mis sueños y verme feliz.

A todos mis primos, tías y tíos les doy las gracias por todo lo que han hecho por mi familia.

A mis amigos Carlos Mayorga, Mateo Pinto, Diego Zarate, Camilo Bohórquez, Camilo Rodríguez, Cristian Roa, Jorge Parra y Julián Zúñiga quienes me acompañaron en mis mejores y peores situaciones solo me resta darle las gracias por la compañía que han sido para mí.

A mi amiga especial Sara Barón por ser una persona única y estar para mi cuando más necesite de alguien.

A quien fue mi pareja Jenifer Amado y me ayudo en el desarrollo de este proyecto le doy las gracias por todos los momentos vividos y por enseñarme tantas cosas.

Finalmente quiero agradecer al profesor David Joseph Auresy Serrano Suárez quien fue mi tutor, amigo, compañero y guía en el desarrollo de este proyecto, inmensas gracias por todo lo que hizo por mi profesor.

Tabla de Contenido

Introducción.....	1
Delimitación del problema.....	3
Alcance.....	5
Antecedentes	6
Metodologías para la evaluación de la incertidumbre	8
Justificación.....	11
Objetivos del proyecto	14
Objetivo General.	14
Objetivos Específicos.....	14
Marco teórico.....	15
Uso de los acuíferos.	15
Clasificación de acuíferos.	16
Clasificación de acuíferos según su litología.....	17
Metodología.....	19
Metodología del objetivo 1	19
Metodología del objetivo 2:	20
Metodología objetivo 3	21
Resultados Objetivo 1.....	22
Desarrollo de actividades	22
Metodología GOD.	22
Metodología DRASTIC.	23
Metodología SINTACS.....	24
Indicadores de calidad del agua (ICA).....	25
Resultados Objetivo 2.....	28
Desarrollo de actividades.	28
Selección de los acuíferos analizados.	29
Aplicación y modificación de la metodología DRASTIC.....	31
Incorporación de las nuevas variables a la metodología DRASTIC.....	36
Aplicación de la metodología DRASTIC WEFAS.	45
Resultados de la metodología DRASTIC-WEFAS.	48
Resultados objetivo 3.	49
Desarrollo de actividades	49
Conclusiones	52

Recomendaciones	54
Bibliografía	55
Anexos.....	58
Anexo 1.	58
Anexo 2.	60

Lista de tablas.

Tabla 1. Acuíferos transfronterizos seleccionados	28
Tabla 2. Clasificación de variables.....	30
Tabla 3. Pesos asignados a los factores de ponderación metodología DRASTIC.....	31
Tabla 4. Calificación de la vulnerabilidad metodología DRASTIC.....	31
Tabla 5. Metodología DRASTIC aplicada a los acuíferos transfronterizos.	33
Tabla 6. Vulnerabilidad de los acuíferos transfronterizos.	34
Tabla 7. Cálculo del factor de ponderación del índice de estrés de un acuífero por medio de la simulación Montecarlo	41
Tabla 8. Cálculo del factor de ponderación de la variable de la huella hídrica por medio de la simulación Montecarlo	42
Tabla 9. Cálculo del factor de ponderación de la variable de la huella ecológica por medio de la simulación Montecarlo	43
Tabla 10. Factores de ponderación de la metodología DRASTIC modificados.....	43
Tabla 11. Calificación de las variables de metodología DRASTIC modificada	44
Tabla 12. Metodología DRASTIC modificada aplicada a los acuíferos transfronterizos.	47
Tabla 13. Tabla comparativa de la vulnerabilidad de los acuíferos	48
Tabla 14. Cálculo de la incertidumbre para la variable del estrés de los acuíferos.	50
Tabla 15. Cálculo de la incertidumbre para la variable de la huella hídrica.	50
Tabla 16. Cálculo de la incertidumbre para la variable de la huella ecológica	51

Lista de figuras.

Figura 1. Tipos de acuíferos según sus características hidrodinámicas	17
Figura 2. Tipos de acuíferos según las características litológicas	18
Figura 3. Acuíferos transfronterizos	27
Figura 4. Mapa de elevaciones	35
Figura 5. Mapa de estrés de los acuíferos	38
Figura 6. Mapa de huella hídrica	39
Figura 7. Mapa de huella ecológica	40

Glosario

Acuífero: Depósito de agua subterránea.

Acuífero transfronterizo: Depósito de agua subterráneo que conecta con uno o más países.

Vulnerabilidad: Riesgo de una persona, sistema u objeto que puede sufrir peligros inminentes.

Conductividad hidráulica: Capacidad con la cual un medio deja pasar el agua por medio de una unidad de área transversal.

Actividad antrópica: Cualquier intervención realizada por el ser humano sobre el planeta.

Escorrentía: agua proveniente de las lluvias que fluye en la superficie de un terreno.

IGRAC: Centro Internacional de Evaluación de Recursos de Aguas Subterráneas

Huella hídrica: La huella hídrica es el volumen de agua dulce la cual es usada, consumida y contaminada de manera directa por las distintas actividades que se realizan a diario

Huella Ecológica: La huella total ecológica realiza la medición de cuánta demanda se genera por el consumo humano en la biosfera

Estrés de acuífero: El estrés hídrico hace referencia a la demanda de agua sobre la cantidad disponible en un periodo de tiempo determinado

ICA: Índice de calidad del agua.

Incertidumbre: La incertidumbre es el valor porcentual que refleja la calidad de una medición

DRASTIC: Herramienta para calcular la vulnerabilidad de los acuíferos según sus características físico-químicas.

DRASTIC-WEFAS: Herramienta para calcular la vulnerabilidad teniendo en cuenta el estrés del acuífero, la huella hídrica y la ecológica.

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LOS CUERPOS DE AGUA SUBTERRÁNEA A PARTIR DE LA ADAPTACIÓN DE UN ÍNDICE DE SALUD GLOBAL PARA LOS ACUÍFEROS.

AUTOR(ES): Carlos Daniel Pérez García

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR(A): David Joseph Auresy Serrano Suárez

RESUMEN

Las metodologías actuales para la evaluación de la calidad y vulnerabilidad de las aguas subterráneas son escasas, estas mayoritariamente determinan únicamente variables físico-químicas excluyendo las actividades antrópicas que ocurren en los cuerpos de agua. Este proyecto se enfocó en desarrollar una metodología la cual integró factores socioeconómicos, ecológicos y agrícolas para la evaluación del estado actual de los cuerpos de agua a partir de una adaptación de un índice de salud global para los acuíferos. Este proyecto se desarrolló teniendo en cuenta metodologías como DRASTIC, SINTAC, ICA y GOD, seleccionando la herramienta DRASTIC como la más favorable debido a que contiene una mayor cantidad de variables las cuales permitieron conocer la vulnerabilidad de los acuíferos. Preliminarmente se seleccionaron 22 acuíferos transfronterizos siendo estos los más grandes. Mediante una recopilación de información se logró establecer 3 nuevas variables las cuales son el porcentaje de estrés de un acuífero, huella hídrica y la huella ecología conformando así la metodología DRASTIC-WEFAS propuesta en este proyecto. Por medio de la simulación Montecarlo se generaron 100 valores aleatorios usados para el cálculo de factores ponderativos de cada variable con resultados de 3,49; 2,05 y 1,82 respectivamente. Una vez obtenidos, por medio de la desviación estándar, se calculó la incertidumbre obteniendo valores de 1,69; 1,44 y 1,072 respectivamente. Los datos anteriormente calculados garantizaron una homogeneidad en la información suministrada por la simulación Montecarlo disminuyendo la dispersión de los datos. La importancia del DRASTIC-WEFAS se basa en la incorporación de variables ligadas a la actividad antrópica. A partir de este trabajo se pretende dar continuidad a diversos proyectos que incentiven el análisis y la modificación teniendo en cuenta los factores de ponderación de la metodología DRASTIC-WEFAS, con el fin de dar un aporte a los distintos sectores que impacta la hidrogeología.

PALABRAS CLAVE: Aguas subterráneas, DRASTIC, Método Montecarlo, Desviación estándar, Vulnerabilidad, DRASTIC-WEFAS

Vº Bº DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: ASSESSMENT OF THE QUALITY OF GROUNDWATER BODIES A START FROM THE ADAPTATION OF A GLOBAL HEALTH INDEX FOR THE AQUIFERS.

AUTHOR(S): Carlos Daniel Pérez García

FACULTY: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR: David Joseph Auresy Serrano Suárez

ABSTRACT

Current methodologies for the assessment of groundwater quality and vulnerability are scarce; they mostly determine only physical-chemical variables, excluding anthropogenic activities that occur in water bodies. This project focused on developing a methodology that integrated socioeconomic, ecological and agricultural factors for the evaluation of the current status of water bodies based on an adaptation of a global health index for aquifers. This project was developed taking into account methodologies such as DRASTIC, SINTAC, ICA and GOD, selecting the DRASTIC tool as the most favorable because it contains a greater number of variables which allowed knowing the vulnerability of aquifers. Preliminarily, 22 transboundary aquifers were selected, these being the largest ones. Through a compilation of information, it was possible to establish 3 new variables, which are the stress percentage of an aquifer, water footprint and ecological footprint, thus conforming the DRASTIC-WEFAS methodology proposed in this project. By means of Monte Carlo simulation, 100 random values were generated and used for the calculation of weighting factors for each variable with results of 3.49, 2.05 and 1.82, respectively. Once obtained, by means of the standard deviation, the uncertainty was calculated obtaining values of 1.69, 1.44 and 1.072 respectively. The data previously calculated guaranteed a homogeneity in the information provided by the Monte Carlo simulation, reducing the dispersion of the data. The importance of DRASTIC-WEFAS is based on the incorporation of variables linked to anthropic activity. From this work it is intended to give continuity to various projects that encourage the analysis and modification taking into account the weighting factors of the DRASTIC-WEFAS methodology, in order to give a contribution to the different sectors impacted by hydrogeology.

KEYWORDS: Groundwater, DRASTIC, Monte Carlo method, Standard deviation, Vulnerability, DRASTIC-WEFAS

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

Introducción.

Un acuífero es esencialmente un depósito bajo la superficie el cual se encarga de almacenar agua, la cantidad que este puede almacenar depende del tamaño y la densidad de los poros y sus fracturas en las rocas (Ferdinand Quiñones, 1985). Estos depósitos son un recurso vital los cuales suministran agua para millones de personas; así mismo las aguas subterráneas juegan un papel importante en la agricultura y otras actividades antrópicas, es por esto que la salud de muchos ecosistemas se ha ido deteriorando. Distintos estudios se han centrado en el análisis de la calidad de aguas superficiales; sin embargo, el agotamiento de las aguas subterráneas ha sido recientemente documentado a una escala global y regional (Tom Gleeson, 2012) .

Una de las mayores fuentes de contaminación es causada por la agricultura debido a que las aguas son usadas para hacer riegos de manera extensiva, al momento de realizar esta práctica el líquido se infiltra en el suelo y finalmente llega a los acuíferos contaminándolos con distintas trazas de químicos provenientes de los fertilizantes; estos contaminantes también pueden viajar por los cuerpos de agua superficiales y finalmente terminar en los acuíferos debido a las conexiones que algunas aguas subterráneas tienen con las superficiales. (Jean Margat, 2013).

El presente proyecto fue constituido por tres objetivos específicos; el primero de ellos fue realizar un análisis de los métodos evaluativos para la calidad de agua subterránea mediante investigaciones y metodologías previas las cuales ya fueron establecida para la obtención de datos estadísticos. El segundo objetivo consistió en la proposición de una metodología la cual integró distintos componentes socioeconómicos, ecológicos y agrícolas para el desarrollo de un índice de salud, para esto se usaron los acuíferos de mayor tamaño o de

uso a nivel global. El tercer objetivo se basó en la evaluación de la incertidumbre de la asignación de los pesos a las distintas variables seleccionadas a través de dos de las 4 metodologías propuestas teniendo en cuenta el estado presente del acuífero y las limitantes de la información.

Delimitación del problema.

Los acuíferos son explotados con el fin de suministrar agua dulce a distintas poblaciones locales, esto fomenta de manera evidente el desarrollo regional y el bienestar de los pobladores. Los acuíferos son una fuente de agua fiable para un suministro de agua y para el riego de cultivos, teniendo un coste bastante bajo y que emplea tecnologías las cuales suelen estar disponibles en distintas regiones del país; así mismo el agua subterránea es un recurso hídrico valioso para aliviar la pobreza y mejorar la calidad de vida de los habitantes que se beneficien de este recurso. (E. Custodio, 2002) (Referencia Nueva)

Al momento de realizar algunas actividades antropológicas que involucran las aguas subterráneas, tales como la extracción del recurso, el uso intensivo, entre otras actividades que afecten el recurso vital, se modifica notablemente su régimen hidrogeológico causando impactos negativos de carácter, ambiental, político, económico y social.

Los cuerpos de aguas superficiales al momento de ser alterados por alguna actividad antrópica, retornan en lo posible a su estado inicial gracias a sus características auto depurativas. A diferencia de los impactos ambientales negativos significativos como la disminución del nivel de agua subterránea, su capacidad de almacenamiento, la interferencia con manantiales y ecosistemas dependientes del agua subterránea y el deterioro de la calidad de agua.

El uso intensivo de las aguas subterráneas se está convirtiendo en un tema de interés en distintas partes del mundo (Hoogesteger, 2009), debido a la importancia de conservar su calidad y así garantizar el acceso del agua potable a las diferentes regiones y sus

comunidades (Departamento Nacional de Planeación, 2014), especialmente a las zonas de carácter árido y semiárido, islas de pequeño tamaño y zonas costeras. (E. Custodio, 2002).

La variabilidad climática, y las presiones ambientales son cada vez mayores debido al uso de estas aguas en las zonas donde existe una poca disponibilidad; adicionalmente el empobrecimiento en la calidad de las aguas superficiales hace que se incremente la necesidad de explorar y usar las aguas subterráneas. (IDEAM, 2018), Hoy en día, existen distintas herramientas y metodologías que permiten el conocimiento de la calidad de aguas subterráneas; sin embargo, estas herramientas no se usan de forma integral, debido a las variables que se pueden encontrar en los distintos acuíferos del mundo (Albert T., 2006).

Este proyecto buscó el desarrollo de una metodología para establecer el índice de salud de los acuíferos, adaptando una metodología previamente establecida (Benjamin S. Halpern, 2012), mediante la recopilación de información disponible sobre las distintas actividades que se realizan en los acuíferos y cómo éstas los afectan de manera negativa o positiva. estableciendo distintas metas que permitan el conocimiento del estado actual del acuífero, implementado una puntuación otorgada a cada meta establecida. Igualmente, se establecieron ecuaciones para el cálculo del valor de importancia de cada meta.

Alcance

En este proyecto desarrolló una metodología para calcular el índice de salud de los acuíferos, realizando una adaptación de los distintos objetivos y componentes que se propusieron en las diferentes metodologías para establecer la calidad del agua subterránea. Se estudio por medio de información secundaria las diferentes metodologías ya establecidas que permitieron el análisis y cuantificación de la calidad de agua subterránea. Una vez recopilada y estudiada toda la información secundaria, se propuso la metodología por medio de objetivos y componentes con sus respectivos indicadores para el desarrollo del índice de salud de los acuíferos de forma global. Finalmente, se evaluó la incertidumbre de la metodología propuesta, determinando el peso de cada componente y objetivo propuesto.

Antecedentes

El agua subterránea es una de las formas de abastecimiento más económicas y de fácil acceso para las comunidades, pudiendo estar disponible este recurso vital para distintas poblaciones, impulsando las actividades económicas que logren el desarrollo de ciertas regiones, cubriendo un tercio de los riegos y el abastecimiento de la población mundial.

La explotación intensiva de este recurso y el posible agotamiento de las aguas subterráneas, han llevado al desarrollo de tecnologías que permiten hacer un análisis para la administración hidráulica de las aguas subterráneas; sin embargo, en muchos países estas herramientas no se consideran adecuadas. (HERRÁIZ, 2009).

Actualmente existen algunas herramientas, tecnologías y distintos datos que permiten determinar la calidad del agua subterránea de manera local y global, tales como:

- El índice de calidad del agua se usa para evaluar el estado del recurso vital, este, está desarrollado con el fin de ayudar a la gestión de los recursos hídricos y a la asignación para los distintos propósitos. Para la evaluación del índice de salud del agua se propone un marco teórico basado en el método Montecarlo el cual se utiliza para la generación de valores aleatorios ligada con la asignación de los valores ponderados para el índice de calidad del agua, asignando pesos aleatorios y ajustándolos a las distintas normativas ambientales. (Akram Seifi, 2020).
- El índice de salud de los océanos es una herramienta que permite evaluar el estado y la calidad de estos; mediante diez objetivos a los cuales se les asignaron distintos pesos de importancia, estos estudian distintos factores como lo son ecológicos,

sociales, económicos, culturales, los cuales giran en torno a lo que puede ofrecer el océano. (Benjamin S. Halpern, 2012)

- La huella hídrica es un indicador del uso del agua dulce el cual mide el volumen total del agua utilizada para la producción de bienes y servicios medidos en toda la cadena de suministro, esta herramienta muestra los volúmenes de consumo y fuente, y a su vez determina los volúmenes de agua por contaminante y fuente de contaminante.

Igualmente se han realizado estudios referentes a la calidad del agua subterránea como:

- Según la convención de Ramsar para el 2010 se destacó la importancia de analizar el cambio climático a escala regional y mundial, y el manejo de los acuíferos localmente ya que son efectos que pueden alterar los vínculos entre los cuerpos de agua subterráneos y los humedales; por consecuencia las recargas de estas se verán afectadas considerando así los humedales como un elemento esencial para la conservación de los acuíferos. (Arjen Y, 2011)
- Los estudios realizados sobre las rocas karst que se forman por medio de una dilución carbonatada indican que estas formaciones rocosas son una importante fuente de agua subterránea ya que constituye hasta la mitad del suministro total. Para algunos países europeos, existe una estrategia de confinamiento de parámetros prioritarios que observa variables relacionadas con la recarga de aguas subterráneas como la evapotranspiración en tiempo real y la humedad del suelo, permitiendo una simulación de recarga de acuífero en un periodo de tiempo, identificando incertidumbre en los parámetros del modelo usado. (A. Hartmann, 2015).

Diversas investigaciones han determinado que la remediación de aguas subterráneas es un sistema bastante complicado y costoso que requiere de tiempos prolongados y de manipulación cautelosa mediante una gestión adecuada de los acuíferos. Se desarrolló un método de optimización del manejo de la remediación de las aguas subterráneas por medio de la distribución de la contaminación y el manejo de múltiples propiedades de incertidumbre durante el proceso evaluativo de riesgos para la salud. (Hongwei Lu, 2018).

Generalmente el monitoreo de las aguas subterráneas se ejecuta a través de la química y los niveles de agua, lo cual proporciona de manera inmediata las condiciones superficiales del acuífero, esta investigación utilizó componentes bióticos y abióticos del ecosistema del acuífero con el fin de medir e identificar la salud del ecosistema, clasificando a las aguas subterráneas como impactada o no impactadas mejorando el índice de salud de los acuíferos. (K. Korbel, 2017).

Se desarrolló un índice de sostenibilidad del agua subterránea, el cual ofreció una combinación novedosa de distintas características de forma que incorporó distintos indicadores de calidad y cantidad del agua, empleando distintas metodologías de tendencia a largo plazo. (Sean W. Fleming, 2014).

La incertidumbre es una medida que refleja un error proveniente de distintas fuentes al momento de usar metodologías estadísticas.

Metodologías para la evaluación de la incertidumbre

La incertidumbre es una medida la cual refleja la falta de conocimiento sobre el valor verdadero de una metodología ya establecida, el resultado de usar esta herramienta tras aplicar distintas correcciones debidas a efectos sistemáticos, es una estimación; debido a la

incertidumbre la cual proviene de efectos aleatorios y la falta de conocimiento completo sobre las metodologías aplicadas.

Metodología GUM (Distribución gaussiana - TIPO A)

La evaluación de tipo A sobre la incertidumbre se utiliza cuando se hacen n observaciones independientes unas de las otras donde la toma de datos se realiza bajo las mismas condiciones de medida (Hernandez, 2012). Para calcular la incertidumbre por el método GUM se utiliza la siguiente ecuación:

$$s = \frac{\sqrt{\sum (x_i - x)^2}}{n - 1} \quad (1)$$

Donde:

X_i = Datos Ingresados, x = promedio de datos ingresados y n = No de datos ingresados.

Método Montecarlo

La metodología Montecarlo es un método de simulación el cual permite realizar el cálculo estadístico del valor final de una secuencia de procesos, los cuales están sujetos a la variabilidad. Este método consiste en ejecutar repetidas veces distintos sucesos variando de manera aleatoria los valores en función de la estadística que los define; dando como resultado final un conjunto de valores los cuales permiten calcular el valor promedio y la variabilidad para dicho conjunto (Cárdenas-Monsalve, Ramírez-Barrera, & Delgado-Trejos, 2018).

Método Bootstrap

Este método consiste en la generación de muestras de tamaño n , para poder obtener la función de distribución de la medida en todas las muestras que se generan. Para la estimación de la desviación típica $s(X)$ de dicha medida, se generan B muestras por medio de un conjunto de datos de n elementos constituyentes. Estas muestras obtenidas son llamadas muestras Bootstrap, con el número de muestras recolectadas, para calcular la incertidumbre se aplica la siguiente formula: (Hernández-Abreu & Martínez-Pérez, 2012).

$$P(X_j) = \frac{n!}{n_1! n_2! \dots n_k!} \left(\frac{1}{n}\right)^n \quad (2)$$

Inferencia Bayesiana

La inferencia bayesiana provee cantidades desconocidas como conocidas de datos estadísticos, lo que permite incorporar distinta información conocida dentro de la estimación de los parámetros dados inicialmente; de esta manera se logra un proceso más nutrido en información haciendo inferencias sobre las cantidades ya conocidas.

El teorema de Bayes es de vital importancia para el cálculo de la incertidumbre, debido a que vincula la probabilidad de un suceso A dado B con la probabilidad de B dado A (Ofelia M, 2011), estableciendo así la siguiente formula:

$$P(A|B) = P(B \cap A)/P(A) \quad (3)$$

Justificación

El agua es un recurso natural valioso para el desarrollo económico y social que cubre la mayor parte del planeta; sin embargo, el 97,5% del agua es salada y tan solo el 2.5% es agua dulce. De esta agua dulce el 69,7% pertenece a los glaciares, el 30% se encuentra en los acuíferos y el 0.3% están en los ríos y arroyos, por lo que se estima que el agua disponible para el consumo humano es de aproximadamente del 0.0007%. (Carrión, 2019)

Los acuíferos son una de las principales fuentes de agua para uso doméstico, urbano e industrial en distintos países. Se suministran aproximadamente 100 millones de hectáreas de agua para riego de los 300 millones de hectáreas que se encuentran esparcidas por el mundo. Al ser una fuente de agua dulce las aguas subterráneas se han convertido en un pilar importante de las socio-economías rurales y urbanas en todo el mundo. (Hoogesteger, 2009)

Existen varios acuíferos alrededor del mundo los cuales son fuente principal de abastecimiento de agua para distintos tipos de actividades económicas e incluso para consumo humano; sin embargo, en la mayoría de países no existen leyes o normas que protejan a los acuíferos, es por esto que se dificulta llevar un control o registro del estado que proteja el presente y futuro de las aguas subterráneas. La carencia de estas normas es compensada con algunas guías o estrategias de manejo para acuíferos, las cuales pueden variar dependiendo del país sin llegar a ser muy rigurosas. Estas guías establecen cómo debe ser el uso y monitoreo de las aguas subterráneas en distintos casos particulares (German Environment Agency, 2018).

El uso de los acuíferos ha cambiado las economías rurales mediante la diversificación de la productividad de los cultivos, mejorando los medios de subsistencia para garantizar la seguridad alimentaria de millones de hogares de comunidades agrícolas y pastorales. Sin embargo, el uso intensivo de las aguas subterráneas se ha ido popularizando por lo que ha comenzado a colapsar este sistema de extracción con graves consecuencias para las personas pobres y aquellas que dependen de estas aguas. (Jaime H, 2009)

Los pequeños estados insulares en desarrollo actualmente se enfrentan a distintos retos en común; como lo es el tamaño reducido en cuanto a superficie y población debido a condiciones geográficas que limitan los recursos naturales. El 71% de los estados insulares corren el riesgo de sufrir una escasez de agua, el 73% tienen una probabilidad de que las aguas subterráneas sean contaminadas por la penetración de aguas marinas y el 72% de los territorios insulares en el océano pacífico presentan una alta dependencia humana de las aguas subterráneas. (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2016)

La mayoría de las evaluaciones del recurso hídrico a escala global y local se han enfocado en las aguas superficiales; sin embargo, el agotamiento insostenible de las aguas subterráneas es algo nuevo que se ha ido documentando recientemente. La huella de agua subterránea es hasta el momento una de las herramientas más adecuadas para evaluar conscientemente el uso de la misma, la renovación y los requisitos del acuífero.

La huella de agua subterránea se define como el área que se requiere para poder sostener el uso de este recurso y los servicios ecosistémicos dependientes de los acuíferos de una región de interés. (Tom Gleeson, 2012)

Este proyecto planteó el aporte de una metodología capaz de evaluar la calidad de los acuíferos, mediante un análisis investigativo debido a la poca información existente sobre estas, y una revisión bibliográfica de las herramientas empleadas para evaluar la calidad de las aguas subterráneas con el fin de realizar una adaptación global, a partir de distintos componentes y objetivos que permitiesen conocer el estado actual de los acuíferos.

El principal aporte científico de este proyecto fue la modificación de la metodología DRASTIC para la creación de una nueva herramienta denominada DRASTIC-WEFAS, la cual permitió la evaluación de la calidad y vulnerabilidad de las aguas subterráneas teniendo en cuenta factores antrópicos tales como la huella hídrica y ecológica y el porcentaje de estrés de los acuíferos.

Objetivos del proyecto

Objetivo General.

- Evaluación de la calidad de los cuerpos de agua subterránea a partir de la adaptación de un índice de salud global para los acuíferos.

Objetivos Específicos.

- Analizar los métodos evaluativos de la calidad de agua subterránea mediante investigaciones y metodologías previas ya establecidas para la obtención de las tendencias estadísticas.
- Proponer una metodología integrando componentes socioeconómicos, ecológicos y agrícolas para el desarrollo del índice de salud para los acuíferos de mayor tamaño o uso a nivel global.
- Evaluar la incertidumbre de la asignación de pesos a las variables a través dos metodologías, teniendo en cuenta el estado actual de los acuíferos y los límites de la información.

Marco teórico

Uso de los acuíferos.

Los acuíferos aparte de ser grandes depósitos de agua y estar conectados a otros cuerpos acuáticos mantienen una dinámica de recargas y extracciones, estas interacciones son fundamentales en el abastecimiento del recurso vital, ya que distintas poblaciones se benefician de este ya sea parcial o totalmente; así mismo distintos sectores industriales especialmente la agroindustria se beneficia enormemente de los acuíferos, ya que el agua que se extrae de estos es principalmente usada para el riego de cultivos y para el mantenimiento del ganado y demás temas relacionados con la agricultura.

El crecimiento poblacional es inevitable y a su vez la industria agrícola ha hecho que los acuíferos de los cuales se está extrayendo el agua se vean afectados de manera significativa, de tal forma que las recargas de los acuíferos son inferiores a las extracciones causando un agotamiento prematuro de estos. Así mismo el riego de los cultivos hace que se produzca escorrentías hacia los acuíferos; estas escorrentías pueden contener trazas de distintos químicos provenientes de los fertilizantes y demás agroquímicos usados en la industria, empeorando la calidad de las aguas subterráneas.

Acuíferos Transfronterizos.

Algunas de las aguas subterráneas se encuentran depositadas en dos o más regiones las cuales están conectadas entre sí. A estos depósitos interconectados se le denomina acuíferos transfronterizos, formando una cadena de acuífero con mayor importancia debido a su gran tamaño y a la capacidad de estos para suministrar el agua a las distintas regiones.

(Programa Hidrológico Internacional, 2007)

Clasificación de acuíferos.

Acuíferos libres. Son aquellos depósitos en los que el nivel del agua se encuentra por debajo del techo de una formación permeable. Estos liberan el líquido por desaturación, es decir, el agua que cede es procedente de los drenajes que el mismo acuífero hace a través de sus poros.

Acuíferos Confinados. Son aquellos que están cubiertos por una capa impermeable donde el nivel de agua de estos está por encima del techo de la formación. El agua que estos ceden es proveniente de su expansión y de la descomposición de la capa permeable vertical cuando ocurre una pérdida de presión en el acuífero, a estos también se les denomina como cautivos.

Acuíferos semiconfinados. Estos se pueden considerar un caso especial, en los que el techo, muro o incluso ambos no son en su totalidad permeables, sino que permiten un flujo vertical de agua.

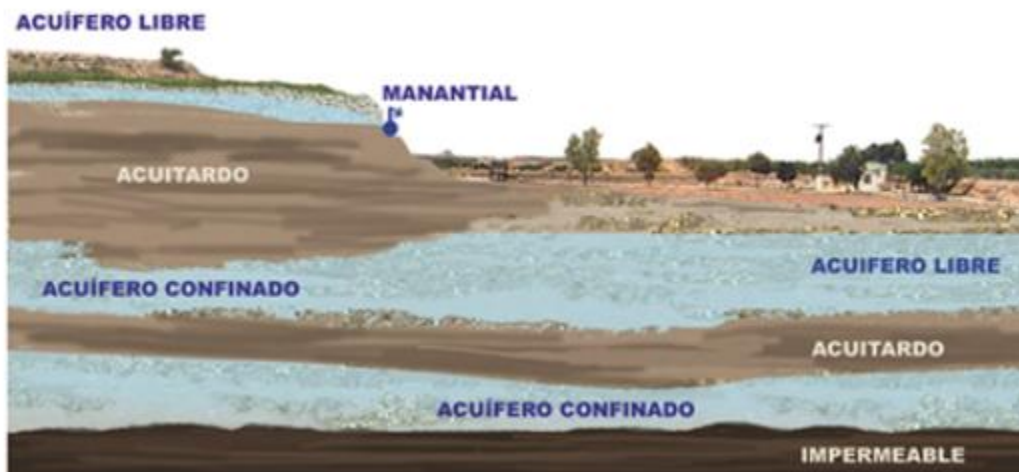
Acuíferos colgados. Estos acuíferos se producen de manera ocasional por el efecto de una recarga la cual asciende el nivel freático quedando así retenida una porción de esta por un nivel que es inferior e impermeable.

Acuíferos multicapas. Son un caso particular y bastante frecuente de acuíferos en los que ocurren distintos niveles de permeabilidad.

(Hispagua Sistema español de información sobre el agua, 2021)

Figura 1

Tipos de acuíferos según sus características hidrodinámicas.



Fuente: Tomado de (Hispagua Sistema español de información sobre el agua, 2021)

Clasificación de acuíferos según su litología.

Acuíferos Detríticos. Son acuíferos conformados por rocas o sedimentos de carácter detríticos. Su permeabilidad es debido a la porosidad intergranular. Si las rocas se encuentran parcialmente consolidadas o cementadas, su porosidad podría ser de tipo secundario. Son todos los materiales con tamaño de grano de arena: Arcosas, arenas, gravas, conglomerados, areniscas entre otras.

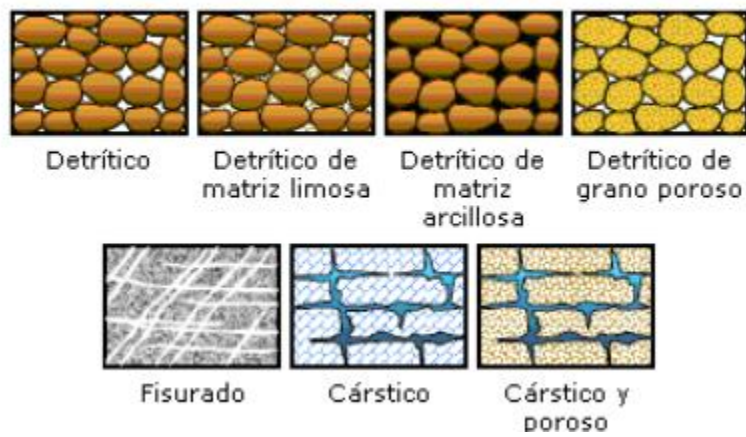
Acuíferos Fisurados o Kársticos. Corresponden a acuíferos conformados por rocas carbonatadas de tipo calizas/dolomías o también pueden estar estructurados con rocas que presentan fracturas, diaclasado o disolución (Rocas ígneas, detríticas, metamórficas). Estas estructuras tienen una permeabilidad causada por grietas y fisuras, de origen mecánico como de disolución.

Acuíferos Mixtos. Su porosidad se debe a un conjunto de los anteriores tipos, donde estos pueden ser las arenas calcáreas o calcarenitas.

(Hispagua Sistema español de información sobre el agua, 2021)

Figura 2

Tipos de acuíferos según las características litológicas.



Fuente: Tomado de (Hispagua Sistema español de información sobre el agua, 2021)

Metodología.

Metodología del objetivo 1: Se analizaron los métodos evaluativos de la calidad de agua subterránea mediante investigaciones y metodologías previas ya establecidas para la obtención de las tendencias estadísticas.

Para el desarrollo de este objetivo, se realizaron las siguientes actividades:

- 1) Se recopiló la información acerca de las metodologías establecidas para la evaluación de la calidad de las aguas subterráneas mediante investigaciones previas, artículos, base de datos, libros entre otras fuentes de información secundaria.
- 2) Se determinaron las metodologías más importantes para la evaluación de la calidad del agua subterránea.

Para la **actividad 1** en la recolección de información sobre las metodologías para la evaluación de calidad de las aguas subterráneas, se profundizó en los siguientes temas:

- Objetivos y componentes establecidos en las distintas metodologías para la evaluación de la calidad de las aguas subterráneas.
- Puntuación otorgada a cada objetivo y componente según su importancia.
- Ecuaciones establecidas para el cálculo de cada objetivo y componente.

En la **actividad 2** se tuvo en cuenta las metodologías que abarcaron la mayor cantidad de características, componentes y objetivos los cuales determinaron su relevancia.

Metodología del objetivo 2: Se propuso una herramienta que integró componentes socioeconómicos, ecológicos y agrícolas para el desarrollo del índice de salud para los acuíferos de mayor tamaño o uso a nivel global.

Para el desarrollo de este objetivo, se realizaron las siguientes actividades:

- 1) Se integraron las metodologías ya establecidas para calcular indicadores que permitieron conocer la salud de un cuerpo de agua.
- 2) Se establecieron los componentes y objetivos adaptables para los acuíferos.
- 3) Se analizaron los componentes (Estado actual, tendencia, presiones, resiliencia y puntos de referencia) de cada componentes y objetivos preseleccionado.
- 4) Se establecieron los indicadores y actividades que influyeron en los componentes y objetivos.
- 5) Se seleccionaron y se crearon los objetivos y componentes implementados en la metodología para el cálculo del índice de salud de los acuíferos.
- 6) Se formulo la metodología del índice de salud de los acuíferos.
- 7) Se realizo un análisis comparativo de los resultados entre la metodología desarrollada y la metodología ya establecida.

Metodología objetivo 3: Se evaluó la incertidumbre de la asignación de pesos a las variables a través de una metodología, teniendo en cuenta el estado actual de los acuíferos y los límites de la información.

Para el desarrollo de este objetivo, se realizaron las siguientes actividades:

- 1) Se Comparo la estructura de la metodología propuesta con las metodologías ya establecidas.
- 2) Se calculó la incertidumbre de cada puntaje del peso de los componentes y objetivos propuestos en la metodología desarrollada, teniendo en cuenta la comparación de dos de las siguientes metodologías: (1) *Montecarlo*, (2) *Inferencia Bayesiana*, (3) *Bootstrap*, (4) *GUM tipo A*.

Resultados Objetivo 1.

- Analizar los métodos evaluativos de la calidad de agua subterránea mediante investigaciones y metodologías previas ya establecidas para la obtención de las tendencias estadísticas.

Desarrollo de actividades

Metodología GOD.

La metodología GOD fue desarrollada por Foster en el año 1987, este es un método sencillo y sistemático, por lo que es esencial su uso en el momento en que se tienen pocos datos del acuífero; sin embargo, estos no cubren la totalidad del territorio que se estudia.

Gracias a su estructura simple y pragmática es uno de los métodos utilizados en primer lugar para la estimación de la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero, entre las desventajas se encuentra la simplificación de grandes componentes y el hecho de no tener en cuenta el tipo de suelo, la infiltración efectiva entre otras. (Fontecha, 2018)

Esta metodología tiene en cuenta las siguientes variables y se calcula la vulnerabilidad por medio de la siguiente ecuación:

$$(Vulnerabilidad)GOD = G.O.D \approx (0 - 1) \quad (4)$$

Variables:

G= Ground Water Occurrence (Ocurrencia del agua subterránea o tipo de acuífero)

O= Overall Aquifer Class (Litología de la zona no saturada)

D= Depth to Groundwater (Profundidad del agua subterránea o del acuífero)

- Los anteriores parámetros se multiplican para obtener una puntuación de la vulnerabilidad donde 0 es nula y 1 es extrema.

Metodología DRASTIC.

La metodología DRASTIC es un modelo empírico el cual fue desarrollado en 1987 por Aller Et Al, para la EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos).

Este método es uno de los más utilizados ya que suele ser muy útil cuando se necesita construir mapas de vulnerabilidad, con los distintos datos que este método utiliza ya que tiene en cuenta distintos factores que conforman a un acuífero, debido a que no discrimina una gran cantidad de datos.

Este método es usado tanto para la calificación como para el mapeo y se basa en la asignación de distintos índices que varían de 1 siendo la mínima vulnerabilidad hasta 10 siendo esta la máxima vulnerabilidad, de acuerdo con las distintas características y el comportamiento de las variables que considera este método. (Dipankar S, 2014)

Esta metodología tiene en cuenta las siguientes variables y se calcula la vulnerabilidad por medio de la siguiente ecuación:

$$DRASTIC = (Dr \cdot Dw) + (Rr \cdot Rw) + (Ar \cdot Aw) + (Sr \cdot Sw) + (Tr \cdot Tw) + (Ir \cdot Iw) + (Cr \cdot Cw) \quad (5)$$

Variables:

D: Depth. (Profundidad del agua subterránea.)

R: Recharge. (Recarga neta.)

A: Aquifer. (Litología del acuífero.)

S: Soil. (Tipo de suelo.)

T: Topography. (Topografía - Pendiente.)

I: Impact. (Naturaleza de la zona no saturada.)

C: Hydraulic conductivity. (Conductividad hidráulica del acuífero.)

- Los anteriores parámetros se multiplican por un factor de ponderación el cual ya se encuentra con un valor previamente definido y se suman para obtener la vulnerabilidad total la cual puede ir de 47 – 92 siendo la más baja y las más altas de 136-184.

Metodología SINTACS

Esta metodología es un derivado del método DRASTIC, ambos evalúan la vulnerabilidad de un acuífero de igual manera dividiendo el mismo en celdas o polígonos por los cuales se puede calcular un índice de vulnerabilidad a partir de un sistema de rangos que están ponderados. (Francisco E, 2013)

Esta metodología tiene en cuenta las siguientes variables y el cálculo de la vulnerabilidad se da por medio de la siguiente ecuación:

$$SINTACS = (Sr \times Sw) + (Ir \times Iw) + (Nr \times Nw) + (Tr \times Tw) + (Ar \times Aw) + (Cr \times Cw) + (Sr \times Sw) \quad (6)$$

Variables:

S: Profundidad

I: Infiltración

N: Zona no saturada

T: Tipo de suelo

A: Acuífero (Características del acuífero)

C: Conductividad hidráulica del acuífero

S: Superficie del suelo

- Los anteriores parámetros se multiplican por un factor de ponderación el cual ya se encuentra con un valor previamente definido y se suman para obtener la vulnerabilidad total la cual puede variar de 26 – 80 siendo la más baja y la más alta de 211-260.

Indicadores de calidad del agua (ICA).

Algunos acuíferos abastecen a distintas poblaciones para tener agua potable en zonas rurales e incluso algunas ciudades pequeñas para medir la calidad del agua se utiliza los indicadores ICA, este método para la evaluación de la calidad del agua es enfocada netamente si el agua será para abastecimiento.

Este sistema permite hacer una comparación de los niveles de contaminación en distintas áreas, el ICA se define como el grado de contaminación presente en el agua a la fecha que se realiza el muestreo, este es expresado como un porcentaje de agua.

Una vez que se obtienen los valores de las variables del ICA por medio de muestras, se comparan con tablas y factores de ponderación ya establecidos para finalmente hacer el cálculo del ICA. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2019)

Esta metodología tiene en cuenta las siguientes variables y el cálculo de la vulnerabilidad se da por medio de la siguiente ecuación:

$$ICA = N_{i=1}^n (Q_i^{W_i}) \quad (7)$$

Variables:

Demanda Bioquímica de Oxígeno, Oxígeno disuelto, Coliformes fecales, Coliformes totales, Sustancias activas al azul de metileno (Detergentes), Conductividad eléctrica, Fosfatos totales, Grasas y aceites, Nitrógeno amoniacal, Nitrógeno en nitratos, Alcalinidad, Color, Dureza total, Potencial de Hidrógeno (pH), Sólidos suspendidos, Cloruros, Sólidos disueltos, Turbiedad

- Este sistema evalúa de 0% a 100% la calidad del agua donde un ICA cercano a 0 indica que el agua está altamente contaminada, mientras que si el ICA arroja un valor del 100% indica que el agua se encuentra en excelentes condiciones.

De las anteriores metodologías para calcular la vulnerabilidad el método DRASTIC es uno de los más completos ya que tiene en cuenta los factores más importantes de un acuífero y de mayor variedad tal cual se presentan en las ecuaciones, en adición a esto este método permite realizar la elaboración de mapas geográficos mostrando las zonas más vulnerables.

El método GOD es un método que se utiliza de forma general para obtener una idea de la vulnerabilidad de la zona de referencia; sin embargo, esta metodología discrimina distintas variables de alta importancia por lo que obtener un veredicto final basado en esta podría incluir grandes porcentajes de error.

La metodología SINTAC es una variante del método DRASTIC la cual también es utilizada para la elaboración de mapas de vulnerabilidad; sin embargo, es un método relativamente nuevo el cual modifica algunos factores de ponderación y variables de estudio.

Los índices de calidad de agua nos ofrecen una aproximación bastante exacta para la calidad de agua; sin embargo, estos índices son usados de manera más específica para la potabilización y calidad de agua para ser consumida, por lo que no ofrece indicadores de vulnerabilidad, pero sí de calidad.

De las anteriores metodologías propuestas para la evaluación de la calidad o vulnerabilidad de las aguas subterráneas, se seleccionó la metodología *DRASTIC*, debido a que es una de las más completas y evalúa factores físico-químicos de un acuífero.

Resultados Objetivo 2.

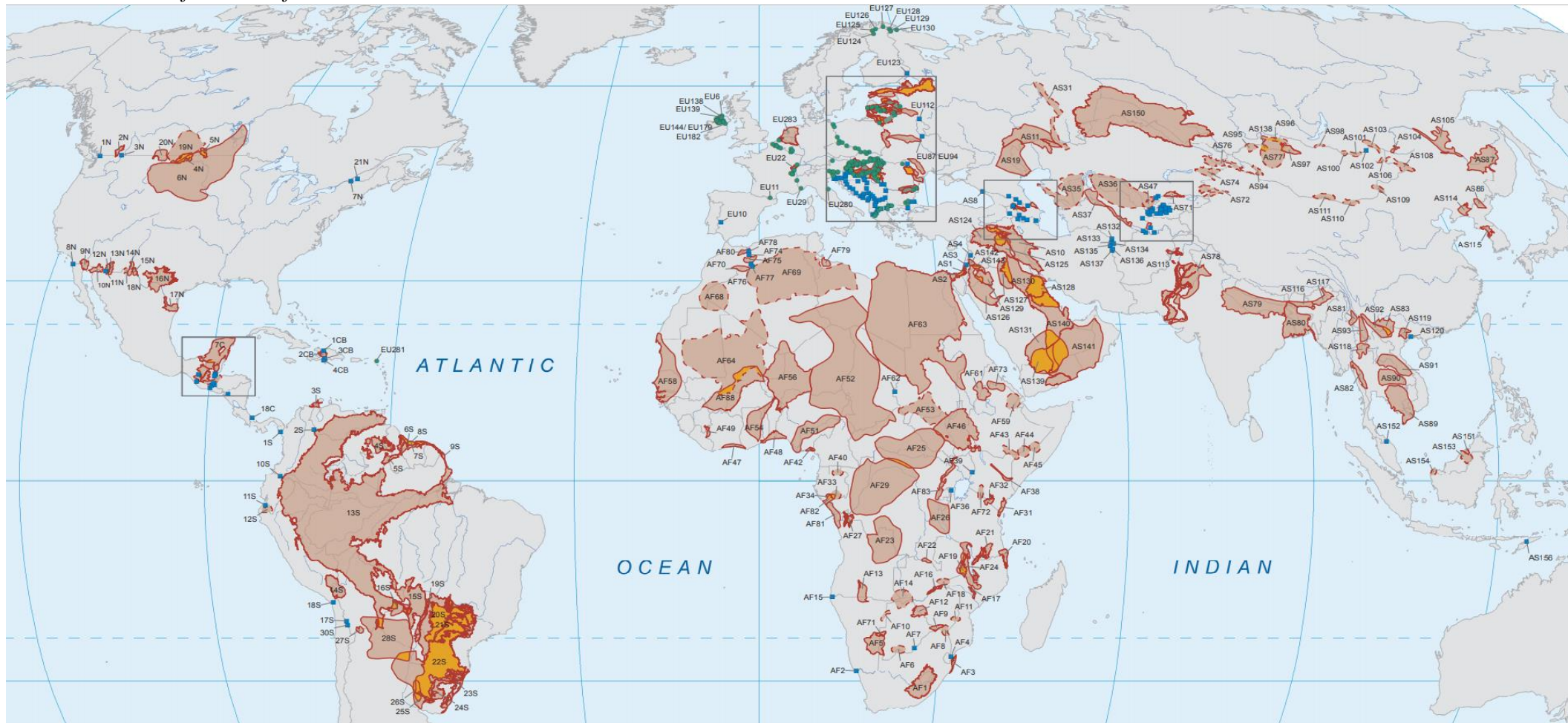
- Proponer una metodología integrando componentes socioeconómicos, ecológicos y agrícolas para el desarrollo del índice de salud para los acuíferos de mayor tamaño o uso a nivel global.

Desarrollo de actividades.

Para el desarrollo de este objetivo se investigaron 22 acuíferos transfronterizos grandes divididos por continentes con el motivo de tener una información sólida y diversa acerca de estos cuerpos de agua.

Figura 3

Acuíferos transfronterizos



Fuente: (IGRAC, 2015)

Tabla 1*Acuíferos transfronterizos seleccionados*

Código del acuífero	Nombre acuífero	Países conectados	Uso del acuífero
Suda América.			
21S	Guarani - Serra Geral	Brasil - Paraguay -Uruguay - Argentina	Abastecimiento e industria
20S	Caiua - Baru - Acaray	Brasil - Paraguay	Abastecimiento
5S	Boa Vista-Serra do Tucano- North Savanna	Brasil - Guyana	Abastecimiento
15S	Pantanal	Brasil - Bolivia - Paraguay	Abastecimiento
Norte América			
6N	Northern Great Plains	Canada - USA	Uso domestico
16N	Edwards-Trinity-El Burro	Mexico - USA	Abastecimiento
Ogallala	The High Plains aquifer	USA	Uso domestico
19N	Judith River	Canada, United States of America	Uso domestico
Centro América			
14N	Conejos Médanos-Bolsón de la Mesilla	Mexico - USA	Abastecimiento e industria
7C	Península de Yucatán Candelaria Hondo	Guatemala - Mexico - Belice	Abastecimiento e industria
3C	Ocosingo-a-Pocóm-Ixcán	Guatemala - Mexico	Domestico
Continente Europeo			
EU108	Ordivician - Cambrian Groundwater Body	Estonia - Rusia	Domestico
EU109	Cambrian - Vendian - Voronka Groundwater	Estonia - Rusia	Domestico
EU283	Belgian - Dutch - German Lowland Aquifer System	Belgium - Netherlands - Germany	Abastecimiento
EU99	Daugava	Latvia, Belarus, Lithuania, Russia	Abastecimiento
Continente Africano			
AF63	Nubian Sandstone Aquifer System	Chad, Egypt, Libya, Sudan	Abastecimiento

AF52	Lake Chad Basin	Chad, Nigeria, Cameroon, Central African republic, Algeria	Abastecimiento
AF64	Taoudeni Basin	Algeria, Mali, Mauritania	Domestico
Continente Asiático			
AS130	Umm er Radhuma-Dammam Aquifer System (North): Widyen-Salman	Iraq, Kuwait, Saudi Arabia	Abastecimiento
AS79	South of outer Himalayas Aquifer	India, Nepal	Domestico
AS140	Umm er Radhuma-Dammam Aquifer System (Centre): Gulf	Saudi Arabia, United Arab Emirates, Bahrain, Qatar	Domestico
AS141	Umm er Radhuma-Dammam Aquifer System (South): Rub' al Khal	Oman, Saudi Arabia, United Arab Emirates, Yemen	Domestico

Fuente: Elaborado por el autor.

Selección de los acuíferos analizados.

En la *tabla 1* se encuentran los acuíferos transfronterizos seleccionados para la aplicación de la metodología DRASTIC, estos cuerpos de agua fueron seleccionados debido a su tamaño e importancia y la disponibilidad de información acerca de ellos, esta herramienta permitió realizar el cálculo de la vulnerabilidad de los acuíferos de acuerdo a las características físico-químicas de estos. Mediante distintas fuentes de información y estudios que se han realizado a estos acuíferos fue posible obtener los distintos datos necesarios para realizar el cálculo de la vulnerabilidad.

Cada letra de la palabra **DRASTIC** es un índice la cual esta herramienta evalúa, donde la letra **D** es la profundidad a la cual se encuentra el acuífero, **R** son las recargas netas que recibe el acuífero, **A** es el tipo de acuífero según su litología, **S** el tipo de suelo predominante en la zona, **T** la topografía del terreno (Pendiente), **I** la zona vadosa o zona no saturada que corresponde a la parte superficial del suelo y **C** la conductividad hidráulica.

Estas variables se les asigna un rango el cual permitió conocer el valor de su calificación según sus características físico-químicas, estos rangos se encuentran en la *tabla 2*. Las variables se multiplican por un factor de ponderación (*tabla 3*) el cual fue previamente establecido por la metodología DRASTIC.

Tabla 2

Clasificación de variables

<i>Parámetro</i>	<i>Rango</i>	<i>Calificación</i>
<i>Dr (m)</i>	9-12	10
	12-15	9
	15-28	7
	18-21	5
	21-24	3
	24-30	2
	> 30	1
<i>Rr (m/día)</i>	3-5	1
	5-7	3
	7-9	5
<i>Ar</i>	Arena / arcilla	6
	Arena / grava	7
	Limo arenoso	8
<i>Sr</i>	Arcilla	4
	Franco arcilloso	5
	Franco arcilloso / limoso	6
	Franco limoso	7
	Franco limoso / arenoso	8
	Franco arenoso	9
	Arena	10
<i>Tr (%)</i>	> 12	1
	8-12	3
	6-8	5
	2-6	9
	0-2	10
<i>Ir</i>	Arena / arcilla	6
	Arena / arcilla / limo	7
	Arena / grava / marga	8
	Arena / grava	9

<i>Cr (m/día)</i>	<4	1
	4–12	2
	12–28	4
	28–40	6
	40–80	8
	80–100	9
	> 100	10

Fuente: Tomado de (Alireza R, 2020)

Tabla 3

Pesos asignados a los factores de ponderación metodología DRASTIC

Parámetros	Peso asignado
(Dw) Profundidad	5
(Rw) Recarga neta	1.5
(Aw) Tipo de acuífero	0.5
(Sw) Tipo de suelo	2.5
(Tw) Topografía o pendiente	0.5
(Iw) Zona no saturada	1.0
(Cw) Conductividad hidráulica	3.0
Peso total	14

Fuente: Tomado de (Alireza R, 2020)

Tabla 4

Calificación de la vulnerabilidad metodología DRASTIC

Vulnerabilidad	Rango
Bajo	47-92
Moderada	92-136
Alta	136-184

Fuente: Tomado de (Alireza R, 2020)

Aplicación y modificación de la metodología DRASTIC

Se aplicó la metodología **DRASTIC** a los acuíferos presentes en la *tabla 1*, con el fin de conocer el puntaje de la vulnerabilidad y tomar como punto de partida dicho puntaje. Para

modificar esta herramienta se anexo nuevos índices los cuales evaluarán el estrés del acuífero, la huella hídrica y la huella ecológica.

Para calcular el valor de la vulnerabilidad mediante la metodología DRASTIC se debe aplicar la ecuación No. 5, donde Dr, Rr, Ar, Sr, Tr, Ir y Cr son las calificaciones de las variables las cuales se encuentran en la *tabla 2*, y los valores de Dw, Rw, Aw, Sw, Tw, Iw y Cw son los factores de ponderación presentados en la *tabla 3*. Aplicando esta metodología para el acuífero 21S Guarani-Serra geral se obtiene el valor de vulnerabilidad el cual fue

$$DRASTIC = (1 \cdot 5) + (5 \cdot 1.5) + (7 \cdot 0.5) + (9 \cdot 2.5) + (1 \cdot 0.5) + (7 \cdot 1) \\ + (2 \cdot 3)$$

$$Vulnerabilidad = 52$$

Según la metodología DRASTIC el acuífero 21S obtuvo un puntaje de vulnerabilidad de 52 lo cual según la *tabla 4*, clasifica la vulnerabilidad de este acuífero como baja. Este procedimiento se repitió para los demás acuíferos.

Tabla 5

Metodología DRASTIC aplicada a los acuíferos transfronterizos.

Codigo	Nombre acuífero	Profundidad (m) - D	Recarga neta (m/día) - R	Tipo de acuífero - A	Tipo de suelo - S	Pendiente - T	Zona no saturada - I (Zona superficial)	Conductividad m/día - C	Puntaje total	Vulnerabilidad ORG
21S	Guarani - Serra Geral	1.800	> 30	Arena / grava	Franco arenoso	60%	Arena / arcilla / limo	4,32	52	Baja
20S	Caiua - Barú - Acaray	80	> 30	Limo arenoso	Franco arenoso	5%	Franco limoso / arenoso	8	57,5	Baja
5S	Boa Vista-Serra do Tucano-North Savanna	570	> 30	Arena / arcilla	Arena	106%	Arena / arcilla / limo	57,8	72	Baja
15S	Pantanal	100	> 30	Arena / arcilla	Arena	160%	Arena / grava	3,4	53	Baja
6N	Northern Great Plains	28	0.3	Arena / arcilla	Arena	20%	Arena / arcilla	0.15	64	Baja
16N	Edwards-Trinity-El Burro	60	1 <	Limo arenoso	Franco arenoso	20%	Arena / arcilla / limo	75.6	64,5	Baja
ogallala	The High Plains aquifer	30	> 30	Limo arenoso	Franco arcilloso	20%	Arena / Arcilla	18.58	47,5	Baja
19N	Judith River	34	> 30	Arena / grava	Arena	12.28 %	Arena / grava	0.076	53,5	Baja
14N	Conejos Médanos-Bolsón de la Mesilla	8	> 30	Arena - Grava	Franco arcilloso / limoso	70%	Arena - Grava	3	93	Moderado
7C	Península de Yucatán Candelaria Hondo	14	> 30	Limo arenoso	Franco arcilloso / limoso	1% <	Franco limoso / arenoso	> 100	110	Moderado
3C	Ocosingo-a-Pocóm-Ixcán	60	> 30	Arena / arcilla	Franco arcilloso	160%	Arena / Grava	99	64,5	Baja
EU108	Ordovician - Cambrian Groundwater Body	150	> 30	Arena / arcilla	Arena	20.69 %	Arena / arcilla / limo	26.902	60	Baja
EU109	Cambrian - Vendian - Voronka Groundwater	60	> 30	Arena / arcilla	Franco arenoso	20.69 %	Franco limoso / arenoso	12.5	58,5	Baja
EU283	Belgian - Dutch - German Lowland Aquifer System	5	> 30	Arena / arcilla	Arena	20.69 %	Arena - Grava	200	125	Moderado
EU99	Daugava	20	> 30	Arena / arcilla	Arena	20.69 %	Arena - Grava	32	73	Baja
AF63	Nubian Sandstone Aquifer System	225	> 30	Arena / arcilla	Franco arcilloso / limoso	18.33 %	Arena / arcilla	5.67	43	Baja
AF52	Lake Chad Basin	250	> 30	Arena / arcilla	Franco arenoso	17.45%	Arena / arcilla / limo	50	62	Baja
AF64	Taoudeni Basin	105	> 30	Arena / grava	Franco limoso / arenoso	6.61 %	Arena / arcilla / limo	432	75	Baja
AS130	Umm er Radhuma-Dammam Aquifer System (North): Widyan-Salman	30	> 30	Arena / grava	Arena	9.43 %	Franco limoso / arenoso	1 <	52,5	Baja
AS79	South of outer Himalayas Aquifer	10	> 30	Arena / grava	Franco arcilloso	5% <	Arena / arcilla / limo	300	115	Moderada
AS140	Umm er Radhuma-Dammam Aquifer System (Centre): Gulf	35	> 30	Limo arenoso	Franco limoso / arenoso	5% <	Arena / arcilla / limo	35.424	62	Baja
AS141	Umm er Radhuma-Dammam Aquifer System (South): Rub' al Khal	35	> 30	Arena / grava	Franco arcilloso	5% <	Arena / Grava	48.38	66	Baja

Fuente: Elaborado por el autor

Tabla 6

Vulnerabilidad de los acuíferos transfronterizos.

Acuíferos (Código)	Vulnerabilidad
21S, 20S, 5S, 15S, 6N, 16N, OG, 19N, 3C, EU108, EU109, EU99, AF63, AF52, AF64, AS130, AS140, AS141	Baja
14N, 7C, EU283	Moderada
-	Alta

Fuente: *Elaborado por el autor.*

Mediante la recopilación de información y distintos estudios realizados a los acuíferos se obtuvo los datos de la profundidad, recargas netas, tipo de acuífero, tipo de suelo, zona no saturada y conductividad. Para para realizar el cálculo del porcentaje de pendiente del terreno en el cual se encontraba el acuífero se elaboró un mapa de pendientes mediante el software de QGIS, el cual permitió la creación de un mapa de elevación digital (*Figura 4*) capaz de entregar las pendientes de los terrenos.

La pendiente de los distintos acuíferos fue hallada por medio de la predominancia de color en los píxeles del mapa, los cuales cada color representa una altura distinta como se observa en la *Figura 4*, el software QGIS asigna valores en grados a cada color según el nivel de la pendiente del terreno y posteriormente se realiza la conversión de grados a porcentaje de pendiente.

Figura 4

Mapa de elevaciones.



Fuente: Elaborado por el autor

La mayoría de los acuíferos transfronterizos tienen una vulnerabilidad baja, esto es debido a que la metodología *DRASTIC* evalúa la vulnerabilidad del agua subterránea por medio de características físico-químicas sin tener en cuenta la intervención humana; sin embargo, los acuíferos que presentan una vulnerabilidad moderada son susceptibles a cambios.

Teniendo en cuenta las distintas características de la metodología planteada se anexaron tres índices nuevos los cuales son estrés del acuífero, huella hídrica y finalmente la huella ecológica. Se seleccionaron estos factores con el fin de incluir a la nueva metodología nuevas variables capaces de indicar la vulnerabilidad y la calidad del acuífero teniendo en cuenta las actividades antrópicas.

Incorporación de las nuevas variables a la metodología DRASTIC.

El estrés hídrico hace referencia a la demanda de agua sobre la cantidad disponible en un periodo de tiempo determinado o cuando su uso se ve un tanto restringido por su baja calidad; el estrés hídrico provoca el deterioro de los recursos hídricos en términos de cantidad (acuíferos sobreexplotados, ríos secos, etc.). (PNUMA, 2021)

La huella hídrica es el volumen de agua dulce la cual es usada, consumida y contaminada de manera directa por las distintas actividades que se realizan a diario, más el volumen de agua que se utiliza en la producción de los distintos bienes y servicios que consumimos. (WFN, 2011)

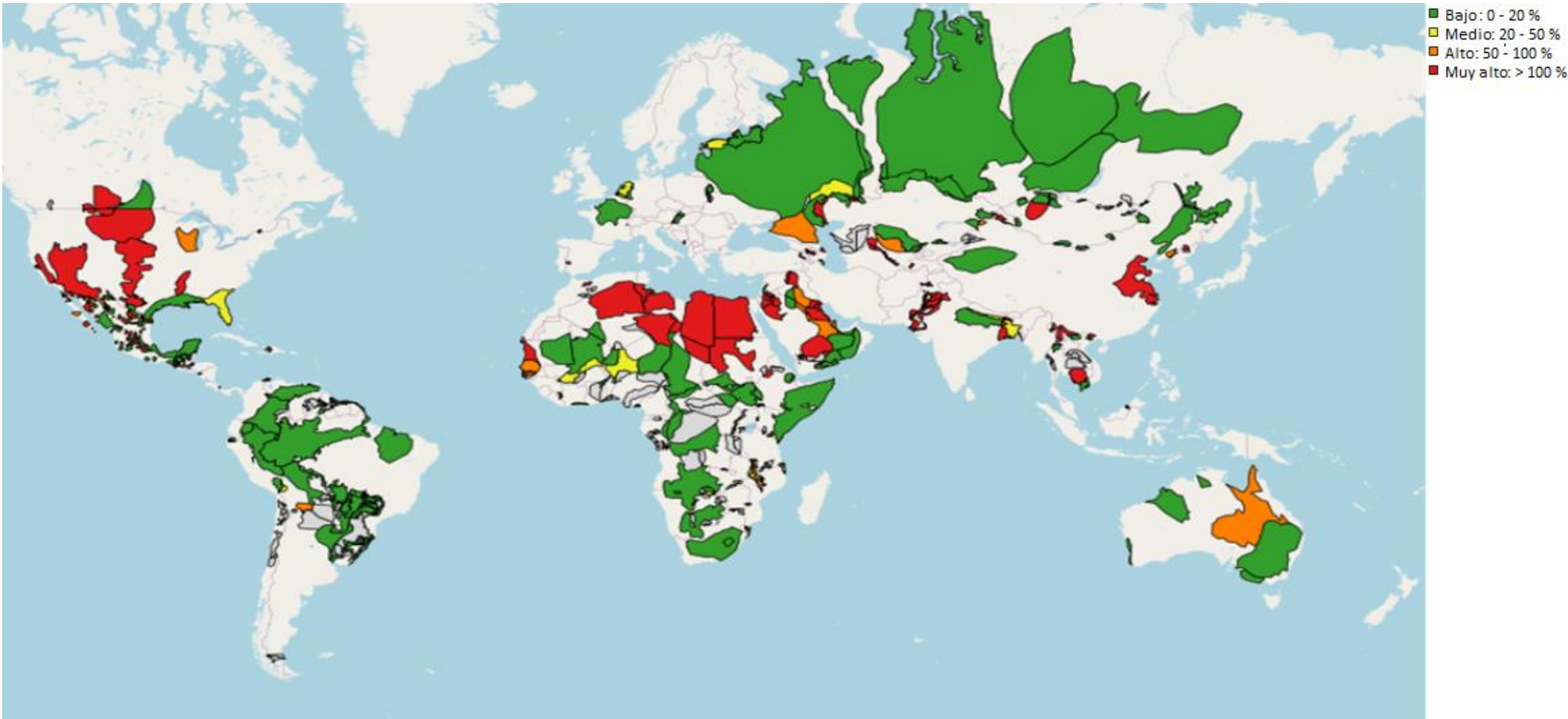
La huella total ecológica realiza la medición de cuánta demanda se genera por el consumo humano en la biosfera, esta huella se mide en unidades estándar denominadas como hectáreas globales. (Global Footprint Network, 2017)

Para adquirir los datos necesarios acerca del estrés de los acuíferos se usó el mapa de información (*Figura 5*) presentado por el Centro Internacional de Evaluación de Recursos de Aguas Subterráneas (IGRAC), el cual presenta el porcentaje de estrés en los distintos acuíferos. En el caso de la huella hídrica se usó el mapa proporcionado por la fundación Water footprint network el cual presenta la huella hídrica en las unidades de $m^3/año/cap$ (*Figura 6*) de los distintos países. Para el cálculo de la huella ecológica se usó el mapa y la información suministrada por la organización investigativa Global footprint network la cual permite ver la huella ecológica de los países en hectáreas globales (*Figura 7*).

Teniendo en cuenta las anteriores variables que se incluyeron en la metodología se decidió nombrar esta nueva metodología como **DRASTIC-WEFAS**, donde la abreviatura WEFAS es el compilado de las siglas en inglés de las variables anteriormente seleccionadas Water & Ecological Footprint, Aquifer stress.

Figura 5

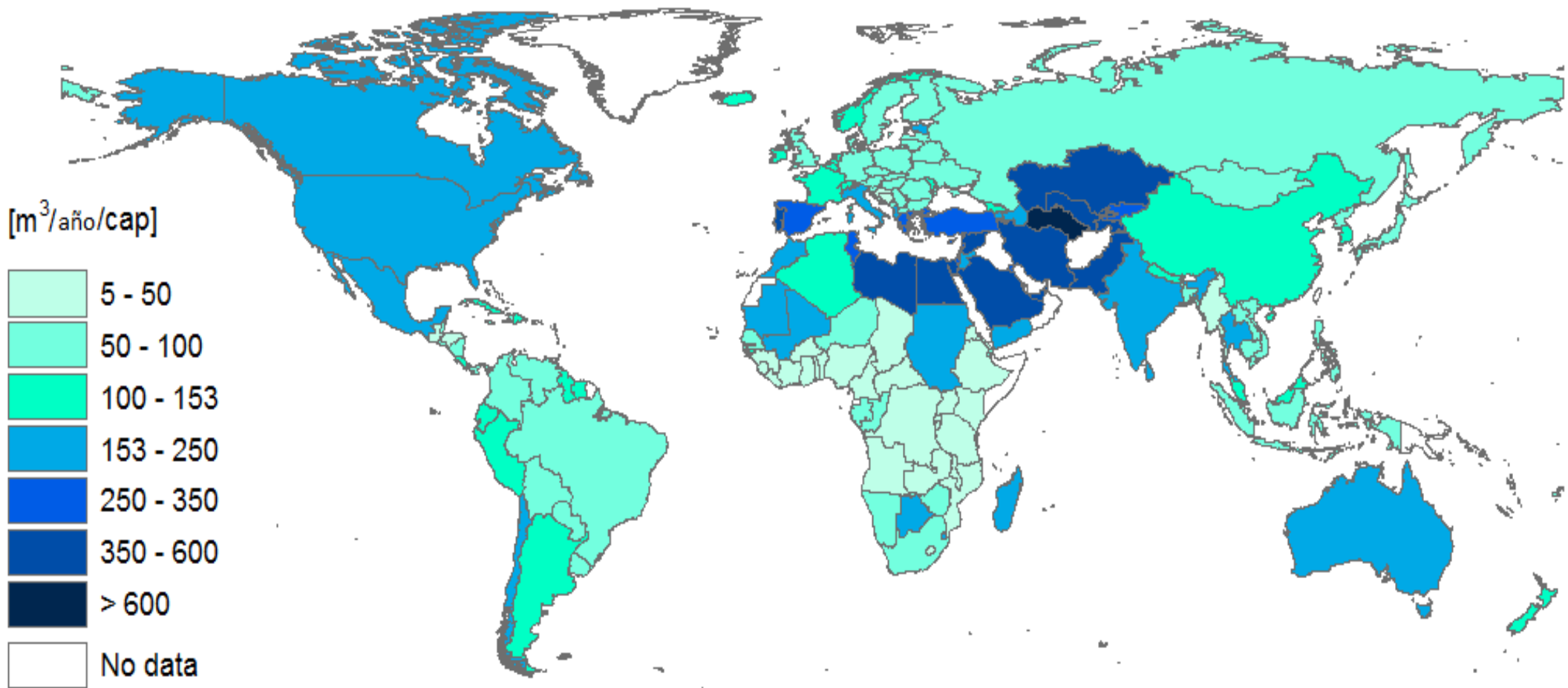
Mapa de estrés de los acuíferos.



Fuente: (IGRAC, 2015)

Figura 6

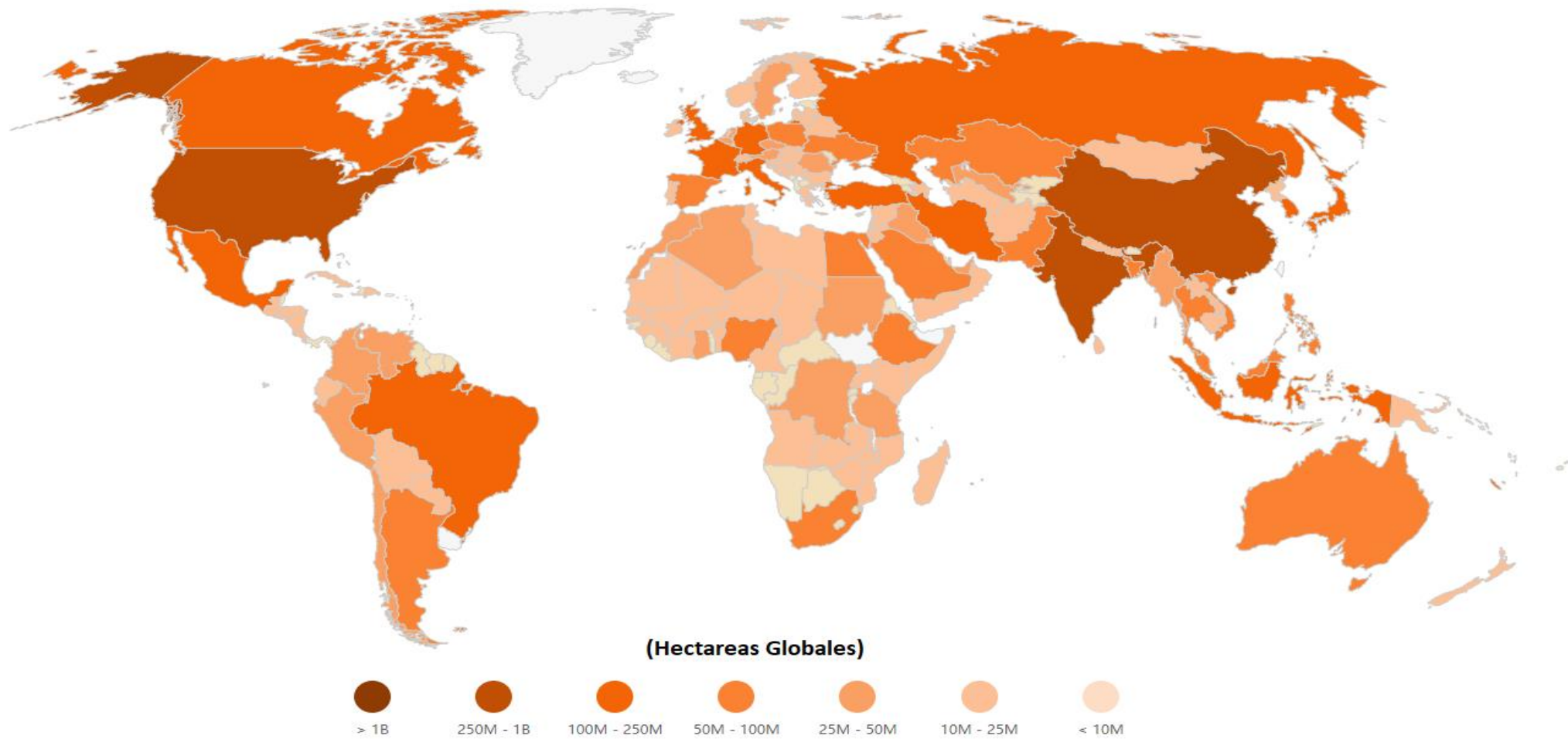
Mapa de huella hídrica.



Fuente: Adaptado de (Water footprint network, 2012)

Figura 7

Mapa de huella ecológica.



Fuente: Adaptado de (Global Footprint Network, 2017)

Una vez obtenida toda la información necesaria acerca de los acuíferos, se procedió a calcular el factor de ponderación para las nuevas variables establecidas, los distintos factores de ponderación fueron calculados mediante la simulación Montecarlo.

Esta herramienta permitió la generación y selección de datos de manera arbitraria y aleatoria con el fin de lograr una mayor homogeneidad en la información y reducir la subjetividad de los pesos que se le asignaron a cada factor de ponderación.

Tabla 7

Cálculo del factor de ponderación del índice de estrés de un acuífero por medio de la simulación Montecarlo.

Rango de la variable							
Peso del índice	% De estrés del acuífero	Frecuencia relativa	Frecuencia relativa acumulada	Intervalos		intervalos aleatorios	Pesos seleccionados aleatoriamente
0,5	11	0,074324324	0,074324324	0	0,07432432	0,353960923	0,5
1	21	0,141891892	0,216216216	0,07432432	0,21621622	0,855721772	3
1,5	1	0,006756757	0,222972973	0,21621622	0,22297297	0,133071431	5
2,5	2	0,013513514	0,236486486	0,22297297	0,23648649	0,138272747	5
3	39	0,263513514	0,5	0,23648649	0,5	0,903188453	5
5	74	0,5	1	0,5	1	0,708188007	1
Total	148				Dato No.100	0,11982779	5
						Valor final del índice de ponderación	3,49

Fuente: Elaborado por el autor.

Como se muestra en la *tabla 7* los valores de entrada de la simulación Montecarlo serán primero los distintos pesos de la herramienta DRASTIC los cuales ya están establecidos previamente (*tabla 3*). Segundo, el rango de la nueva variable que se requiera calcular, en la *figura 6* se encuentra los rangos de la variable del estrés de los acuíferos establecidos por el IGRAC, estos valores para el rango de la simulación son seleccionados de manera aleatoria.

Con estos datos de entrada se calculó la frecuencia relativa dividiendo el valor del rango entre la sumatoria total de los rangos aleatorios. Posteriormente se calculó la frecuencia relativa acumulada sumándole el dato anterior de la frecuencia relativa a la acumulada, finalizado el cálculo de la frecuencia relativa acumulada con esta misma se definen los intervalos de acción y finalmente se ejecuta la simulación Montecarlo tomando 100 valores generados de manera aleatoria con el fin de disminuir la subjetividad a la hora de asignarle un peso al factor de ponderación de la nueva variable.

Para realizar los cálculos del factor de ponderación de la huella hídrica y la huella ecológica se utilizó la misma simulación Montecarlo modificando los rangos de las distintas variables y añadiendo el peso del factor de ponderación ya calculado, ver *tabla 8 y 9*.

Tabla 8

Cálculo del factor de ponderación de la variable de la huella hídrica por medio de la simulación Montecarlo

	Rango de la variable			Intervalos		100 intervalos aleatorio	Pesos seleccionados aleatoriamente
Peso del índice	M ³ /año/cap. Huella hídrica	Frecuencia relativa	Frecuencia relativa acumulada				
0,5	313	0,162597403	0,162597403	0	0,1625974	0,844917727	1
1	173	0,08987013	0,252467532	0,1625974	0,25246753	0,763924504	1
1,5	444	0,230649351	0,483116883	0,25246753	0,48311688	0,329418288	1,5
2,5	412	0,214025974	0,697142857	0,48311688	0,69714286	0,382192493	2,5
3	179	0,092987013	0,79012987	0,69714286	0,79012987	0,222156492	1
3,49	214	0,111168831	0,901298701	0,79012987	0,9012987	0,910192268	1
5	190	0,098701299	1	0,9012987	1	0,931090477	1
Total	1925					0,364655346	2,5
						Valor final del índice de ponderación	2,04

Fuente: Elaborado por el autor.

Tabla 9

Cálculo del factor de ponderación de la variable de la huella ecológica por medio de la simulación Montecarlo

Peso del índice	Huella ecológica (Hgb)	Frecuencia relativa	Frecuencia relativa acumulada	Intervalos		100 intervalos aleatorio	Pesos seleccionados aleatoriamente
0,5	228	0,277372263	0,277372263	0	0,277372266	0,529613696	1,5
1	48	0,058394161	0,335766423	0,277372263	0,33576642	0,276195737	0,5
1,5	30	0,03649635	0,372262774	0,335766423	0,37226277	0,487075823	3,44
2,04	175	0,212895377	0,585158151	0,372262774	0,58515815	0,816110297	1,5
2,5	47	0,057177616	0,642335766	0,585158151	0,64233577	0,978122146	0,5
3	196	0,238442822	0,880778589	0,642335766	0,88077859	0,921192838	0,5
3,49	53	0,064476886	0,945255474	0,880778589	0,94525547	0,103798482	1,5
5	45	0,054744526	1	0,945255474	1	0,962002187	1
Total	822					0,908136723	0,5
						Valor final del índice de ponderación	1,84

Fuente: Elaborado por el autor.

Tabla 10

Factores de ponderación de la metodología DRASTIC-WEFAS modificados.

Parámetros	Peso asignado
(Dw) Profundidad	5
(Rw) Recarga neta	1.5
(Aw) Tipo de acuífero	0.5
(Sw) Tipo de suelo	2.5
(Tw) Topografía o pendiente	0.5
(Iw) Zona no saturada	1.0
(Cw) Conductividad hidráulica	3.0
(Ew) Estrés del acuífero	3.49
(Hw)Huella hídrica	2.04
(Hew) Huella ecológica	1.84
Peso total	21.35

Fuente: Elaborado por el autor.

Tabla 11

Calificación de las variables de metodología DRASTIC-WEFAS.

<i>Parámetro</i>	<i>Rango</i>	<i>Calificación</i>
<i>Dr (m)</i>	9-12	10
	12-15	9
	15-28	7
	18-21	5
	21-24	3
	24-30	2
	> 30	1
<i>Rr (m/día)</i>	3-5	1
	5-7	3
	7-9	5
<i>Ar</i>	Arena / arcilla	6
	Arena / grava	7
	Limo arenoso	8
<i>Sr</i>	Arcilla	4
	Franco arcilloso	5
	Franco arcilloso / limoso	6
	Franco limoso	7
	Franco limoso / arenoso	8
	Franco arenoso	9
	Arena	10
<i>Tr (%)</i>	> 12	1
	8-12	3
	6-8	5
	2-6	9
	0-2	10
<i>Ir</i>	Arena / arcilla	6
	Arena / arcilla / limo	7
	Arena / grava / marga	8
	Arena / grava	9
	<4	1

<i>Cr (m/dia)</i>	4–12	2
	12–28	4
	28–40	6
	40–80	8
	80–100	9
	> 100	10
<i>Er (%)</i>	0 – 20	2
	20 – 50	3
	50 – 100	7
	> 100	10
<i>Hr (Huella hidrica m3/año/cap)</i>	5 – 50	1
	50 – 100	2
	100 – 153	4
	153 – 250	6
	250 – 350	7
	350 – 600	9
	> 600	10
<i>Her (Hg)</i>	< 10 M	1
	10 - 25	2
	25-50	4
	50-100	6
	100-250	8
	250- 1BH	9
	> 1 BH	10

Fuente: Elaborado por el autor.

Aplicación de la metodología DRASTIC WEFAS.

Con los factores de ponderación calculados y la calificación de las nuevas variables ya establecida, se aplicó nuevamente la metodología DRASTIC incluyendo estos nuevos factores, con el fin de ver como estos afectan a la vulnerabilidad de los acuíferos incluyendo las actividades antrópicas, para calcular este valor se utilizó la formula No.8.

$$DRASTIC - WEFAS = (Dr \cdot Dw) + (Rr \cdot Rw) + (Ar \cdot Aw) + (Sr \cdot Sw) + (Tr \cdot Tw) + (Ir \cdot Iw) + (Cr \cdot Cw) + (Er \cdot Ew) + (Hr \cdot Hw) + (Her \cdot Hew) \quad (8).$$

Para calcular el valor de la vulnerabilidad mediante la metodología DRASTIC-WEFAS se debe aplicar la ecuación No. 8.

$$DRASTIC - WEFAS = (1 \cdot 5) + (5 \cdot 1.5) + (7 \cdot 0.5) + (9 \cdot 2.5) + (1 \cdot 0.5) + (7 \cdot 1) + (2 \cdot 3) + (2 \cdot 3.4) + (2 \cdot 2.04) + (9 \cdot 1.84).$$

$$Vulnerabilidad = 79.44$$

Según la metodología DRASTIC-WEFAS el acuífero 21S obtuvo un puntaje de vulnerabilidad de 79.44 lo cual según la *tabla 4*, clasifica la vulnerabilidad de este acuífero como baja. Este procedimiento se repitió para los demás acuíferos.

Tabla 12

Metodología DRASTIC-WEFAS aplicada a los acuíferos transfronterizos.

Codigo	Nombre acuífero	Profundidad (m) - D	Recarga neta (m/día) - R	Tipo de acuífero - A	Tipo de suelo - S	Pendiente - T	Zona no saturada - I (Zona superficial)	Conductividad m/día - C	Estrés del acuífero %	Huella hídrica m ³ /año/cap	Huella Ecológica (Hectareas globales)	Puntaje total modificado	Vulnerabilidad modificada
21S	Guarani - Serra Geral	1.800	> 30	Arena / grava	Franco arenoso	60%	Arena / arcilla / limo	4,32	20%	70,40	588	79,44	Baja
20S	Caiua - Baru - Acaray	80	> 30	Limo arenoso	Franco arenoso	5%	Franco limoso / arenoso	8	1.68%	84	588	84,94	Baja
5S	Boa Vista-Serra do Tucano-North Savanna	570	> 30	Arena / arcilla	Arena	106%	Arena / arcilla / limo	57,8	0.07%	124,5	2,39	88,96	Baja
15S	Pantanal	100	> 30	Arena / arcilla	Arena	160%	Arena / grava	3,4	0.07%	54,1	21,1	67,7	Baja
6N	Northern Great Plains	28	0.3	Arena / arcilla	Arena	20%	Arena / arcilla	0.15	1590.79%	238	2610	129,34	Moderada
16N	Edwards-Trinity-El Burro	60	1 <	Limo arenoso	Franco arenoso	20%	Arena / arcilla / limo	75.6	2524.39%	238	339	128,02	Moderada
ogallala	The High Plains aquifer	30	> 30	Limo arenoso	Franco arcilloso	20%	Arena / Arcilla	18.58	345%	238	2610	112,84	Moderada
19N	Judith River	34	> 30	Arena / grava	Arena	12.28 %	Arena / grava	0.076	61314.3%	153,6	296	118,84	Moderada
14N	Conejos Médanos-Bolsón de la Mesilla	8	> 30	Arena - Grava	Franco arcilloso / limoso	70%	Arena - Grava	3	3.19 %	190	339	130,42	Moderada
7C	Península de Yucatán Candelaria Hondo	14	> 30	Limo arenoso	Franco arcilloso / limoso	1% <	Franco limoso / arenoso	> 100	10%	190	339	147,42	Alta
3C	Ocosingo-a-Pocóm-Ixcán	60	> 30	Arena / arcilla	Franco arcilloso	160%	Arena / Grava	99	0.044093 %	33,9	30,2	80,8	Baja
EU108	Ordovician - Cambrian Groundwater Body	150	> 30	Arena / arcilla	Arena	20.69 %	Arena / arcilla / limo	26.902	50%	95	9,3	76,37	Baja
EU109	Cambrian - Vendian - Voronka Groundwater	60	> 30	Arena / arcilla	Franco arenoso	20.69 %	Franco limoso / arenoso	12.5	50%	95	788	91,25	Baja
EU283	Belgian - Dutch - German Lowland Aquifer System	5	> 30	Arena / arcilla	Arena	20.69 %	Arena - Grava	200	35%	128	75,5	154,55	Alta
EU99	Daugava	20	> 30	Arena / arcilla	Arena	20.69 %	Arena - Grava	32	3%	64.1	12	85,88	Baja
AF63	Nubian Sandstone Aquifer System	225	> 30	Arena / arcilla	Franco arcilloso / limoso	18.33 %	Arena / arcilla	5.67	15816%	511	24,9	99,9	Moderada
AF52	Lake Chad Basin	250	> 30	Arena / arcilla	Franco arenoso	17.45%	Arena / arcilla / limo	50	1%	23	195	85,58	Baja
AF64	Taoudeni Basin	105	> 30	Arena / grava	Franco limoso / arenoso	6.61 %	Arena / arcilla / limo	432	1%	156,7	95,1	105,14	Moderada
AS130	Umm er Radhuma-Dammam Aquifer System (North): Widiyan-Salman	30	> 30	Arena / grava	Arena	9.43 %	Franco limoso / arenoso	1 <	56%	291	190	107,81	Moderada
AS79	South of outer Himalayas Aquifer	10	> 30	Arena / grava	Franco arcilloso	5% <	Arena / arcilla / limo	300	0.6 %	218	1600	142,22	Alta
AS140	Umm er Radhuma-Dammam Aquifer System (Centre): Gulf	35	> 30	Limo arenoso	Franco limoso / arenoso	5% <	Arena / arcilla / limo	35.424	63%	570	190	119,35	Moderada
AS141	Umm er Radhuma-Dammam Aquifer System (South): Rub' al Khal	35	> 30	Arena / grava	Franco arcilloso	5% <	Arena / Grava	48.38	1%	447	84,1	102,26	Moderada

Fuente: Elaborado por el autor

Tabla 13

Tabla comparativa de la vulnerabilidad de los acuíferos

DRASTIC-WEFAS		DRASTIC ORIGINAL	
Acuíferos (Código)	Vulnerabilidad	Acuíferos (Código)	Vulnerabilidad
21S, 20S, 5S, 15S, 3C, EU108, EU109, EU99, AF52.	Baja	21S, 20S, 5S, 15S, 6N, 16N, OG, 19N, 3C, EU108, EU109, EU99, AF63, AF52, AF64, AS130, AS140, AS141	Baja
6N, 16N, Ogallala, 19N, 14N, AF63, AF64, AS130, AS140, AS141	Moderada	14N, 7C, EU283	Moderada
7C, EU283, AS79	Alta	-	Alta

Fuente: *Elaborado por el autor.*

Resultados de la metodología DRASTIC-WEFAS.

Para la metodología DRASTIC-WEFAS en comparación con la original, se tiene como resultado que algunos acuíferos que estaban en una vulnerabilidad baja ascendieron a vulnerabilidad moderada y finalmente algunos que se encontraban en vulnerabilidad media pasaron a vulnerabilidad alta, esto debido a las nuevas variables anexadas a la metodología la cual ahora integra componentes antrópicos.

Los acuíferos que ascendieron de una vulnerabilidad baja a media en la metodología del DRASTIC-WEFAS, indican un deterioro en la calidad de las aguas subterráneas debido a que acuíferos como el 6N, 16N, Ogallala, 19N y 14N, se encuentran actualmente sobreexplotados y para algunos de estos, la calidad del agua se encuentra en pésimas condiciones por las distintas actividades que se llevan a cabo en dichos acuíferos.

Adicionalmente los acuíferos que están en la categoría de vulnerabilidad alta como lo son el 7C, EU283, AS79, indican que estos cuerpos de agua tanto por sus condiciones físico-

químicas como factores antrópicos son susceptibles a la contaminación y que su condición actual no es la mejor.

Resultados objetivo 3.

- Evaluar la incertidumbre de la asignación de pesos a las variables a través dos metodologías, teniendo en cuenta el estado actual de los acuíferos y los límites de la información.

Desarrollo de actividades

La incertidumbre de los pesos asignados a los factores de ponderación se calculó por medio de la metodología GUM Tipo A o desviación estándar, dando como resultado un valor el cual refleja la calidad y la dispersión de la medición, este valor de incerteza permite verificar que los cálculos realizados son válidos y que su incertidumbre en la medición es mínima (Universidad de sonora, 2020). Se calculó el valor de incertidumbre mediante la ecuación No. (1), donde x_i son los 100 valores de entrada obtenidos por la simulación Montecarlo y \bar{X} es el promedio de estos valores.

Los valores de incertidumbre para las distintas variables se calcularon por este método ya que son medidas no reproducibles debido a que la simulación Montecarlo genera valores aleatorios de tal manera que aun que se cuente con las mismas condiciones el resultado final será distinto. El resultado de la incertidumbre por medio de esta metodología permitió ver que tan dispersos están los datos calculados por la metodología Montecarlo.

Tabla 14

Cálculo de la incertidumbre para la variable del estrés de los acuíferos.

No. Datos	X_i	X	$X_i - X$	$(X_i - X)^2$	(Sumatoria de la anterior columna menos un dato)	Valor de incertidumbre
1	0,5	3,49	-2,99	8,9401	2,858484848	1,690705429
2	3	3,49	-0,49	0,2401		
3	5	3,49	1,51	2,2801		
4	5	3,49	1,51	2,2801		
5	5	3,49	1,51	2,2801		
6	1	3,49	-2,49	6,2001		
7	3	3,49	-0,49	0,2401		
8	3	3,49	-0,49	0,2401		
9	3	3,49	-0,49	0,2401		
100	5	3,49	1,51	2,2801		
Total	349		SUMATORIA	282,99		
Promedio (X)	3,49					

Fuente: Elaborado por el autor.

Tabla 15

Cálculo de la incertidumbre para la variable de la huella hídrica.

No. Datos	X_i	X	$X_i - X$	$(X_i - X)^2$	(Sumatoria de la anterior columna menos un dato)	Incertidumbre
1	1	2,0444	-1,0444	1,090771	2,094711758	1,447311907
2	1	2,0444	-1,0444	1,090771		
3	1,5	2,0444	-0,5444	0,296371		
4	2,5	2,0444	0,4556	0,207571		
5	1	2,0444	-1,0444	1,090771		
6	1	2,0444	-1,0444	1,090771		
7	1	2,0444	-1,0444	1,090771		
8	5	2,0444	2,9556	8,735571		
9	1	2,0444	-1,0444	1,090771		
100	2,5	2,0444	0,4556	0,207571		
Total	196,44		SUMATORIA	207,3765		
Promedio (X)	2,0444					

Fuente: Elaborado por el autor

Tabla 16

Cálculo de la incertidumbre para la variable de la huella ecológica

No. Datos	X_i	X	$X_i - X$	$(X_i - X)^2$	(Sumatoria de la anterior columna menos un dato)	Incertidumbre
1	1,5	1,8418	-0,3418	0,116827	1,150570465	1,072646477
2	0,5	1,8418	-1,3418	1,800427		
3	3,44	1,8418	1,5982	2,554243		
4	1,5	1,8418	-0,3418	0,116827		
5	0,5	1,8418	-1,3418	1,800427		
6	0,5	1,8418	-1,3418	1,800427		
7	1,5	1,8418	-0,3418	0,116827		
8	1	1,8418	-0,8418	0,708627		
9	3,44	1,8418	1,5982	2,554243		
100	0,5	1,8418	-1,3418	1,800427		
Total	176,24		SUMATORIA	113,9065		
Promedio (X)	1,8418					

Fuente: Elaborado por el autor

En las *tablas 14, 15 y 16*, se puede observar el valor de incertidumbre calculado para las variables del estrés del acuífero, huella hídrica y huella ecológica respectivamente, estos valores calculados nos indican que entre cada una de los valores seleccionados por la simulación Montecarlo existe una distancia promedio la cual es el mismo valor de la incertidumbre o desviación estándar. Estos valores de incertidumbre obtenidos son bajos lo cual garantiza una homogeneidad en los datos suministrados por la simulación Montecarlo de forma que los pesos asignados para los factores de ponderación tuvieron una mínima o nula subjetividad.

Conclusiones

- De los 22 acuíferos evaluados mediante la metodología DRASTIC, 18 cuerpos de agua presentaron una vulnerabilidad baja y los 4 restantes presentaron una vulnerabilidad moderada, estos resultados se deben a que esta metodología solo evalúa los acuíferos por sus características físico-químicas y no tiene en cuenta otros factores que puedan afectar de manera negativa o positiva al resultado de la vulnerabilidad siendo este un valor estático y que solo depende de las características del acuífero.
- Las nuevas variables anexadas a la metodología DRASTIC permitieron evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos teniendo en cuenta distintos factores socioeconómicos, ecológicos y agrícolas, permitiendo conocer más el estado actual de los cuerpos de agua evaluados.
- La simulación Montecarlo permitió la generación de valores aleatorios para la asignación del peso de los factores de ponderación de las nuevas variables asegurando una homogeneidad en los datos seleccionados y reduciendo la subjetividad en los valores asignados.
- Con la metodología DRASTIC-WEFAS 9 acuíferos presentaron vulnerabilidad baja, 10 acuíferos presentaron vulnerabilidad moderada y 3 acuíferos presentaron una vulnerabilidad alta, estos cambios en la clasificación de los cuerpos de agua son debido a su deterioro por factores antrópicos los cuales se corroboran con estudios realizados a estos mismos.

- El porcentaje de estrés de los acuíferos, la huella hídrica y la huella ecológica, obtuvieron un valor de incertidumbre de 1,69, 1,44 y 1,072 respectivamente, estos valores garantizaron que la dispersión de los 100 datos seleccionados por la simulación Montecarlo fuese lo más homogénea posible.
- La metodología DRASTIC tanto la original como la WEFAS exhibió buenos resultados, permitiendo a si ser empleada en acuíferos transfronterizos o en acuíferos unitarios permitiendo que la herramienta tengo un alcance global.
- Si un acuífero asciende o desciende de vulnerabilidad en la metodología modificada esto es causado por que las nuevas variables tienen valores pequeños o grandes, ya que son variables dependientes de las actividades humanas, mientras que el resultado otorgado por el DRASTIC será una vulnerabilidad algo compleja de que varié, ya que esta metodología solo tiene en cuenta las características físico-químicas del acuífero.

Recomendaciones

- La metodología DRASTIC-WEFAS añade 3 nuevas variables las cuales sirven para tener en cuenta las actividades antrópicas, por lo tanto, si se requiere disminuir el nivel de vulnerabilidad es aconsejable revisar el porcentaje de estrés del acuífero, la huella hídrica y la huella ecológica, ya que son parámetros que pueden hacer que la vulnerabilidad aumente o disminuya.
- Para el funcionamiento de la simulación Montecarlo es fundamental que la cantidad de datos generados de manera aleatoria sea de un mínimo de 100 con el fin de garantizar el correcto funcionamiento de la simulación, debido a que si la entrada de datos empieza a ser menor que este número la dispersión de estos mismos aumenta lo cual produce un aumento en el valor de la incertidumbre.
- En caso de que se requiera anexar una nueva variable a la metodología es fundamental que en la simulación Montecarlo se especifique de manera clara los rangos de dicha variable y a su vez que estén presentes todos los pesos asignados a los factores de ponderación anteriormente calculados.
- Para el cálculo de la incertidumbre es obligatorio los datos suministrados por la simulación Montecarlo, ya que de lo contrario si se intenta poner un promedio cualquiera en el cálculo de la incertidumbre, este valor aumentara afectando a la calidad de la medición realizada.

Bibliografía

- A. Hartmann, T. G. (2015). A large-scale simulation model to assess karstic groundwater. *Geoscientific model development*, 1730-1743.
- Akram Seifi, M. D. (2020). Uncertainty analysis of water quality index (WQI) for groundwater quality. *ELSEVIER*, 1,2, 12.
- Albert T., S. F. (2006). Gestión Sustentable del Agua Subterránea Conceptos y Herramientas. *GW-MATE*, 1-8.
- Alireza R, S. A. (2020). Evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea utilizando DRASTIC. *Arabian Journal of Geosciences*.
- Arjen Y, A. K. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual*. Washington: Earthscan.
- Benjamin S. Halpern, C. L. (2012). An index to assess the health and benefits of the global ocean. *Nature*, 1-6.
- Cárdenas-Monsalve, J. J., Ramírez-Barrera, A. F., & Delgado-Trejos, E. (2018). Evaluación y aplicación de la incertidumbre de medición en la determinación de las emisiones de fuentes fijas: una revisión. *TecnoLogicas*, 1-13.
- Carrón, M. (13 de septiembre de 2019). *El Ágora*. Obtenido de El Ágora: <https://www.elagoradiario.com/open-data/infografias/agua-planeta/>
- Convencion de Ramsar. (2010). *El manejo de las aguas subterráneas: Lineamientos para el manejo de las aguas subterráneas a fin de mantenerlas características ecológicas de los humedales*. Gland: Secretaría de la convencion de Ramsar.
- Departamento Nacional de Planeación. (2014). *POLÍTICA PARA EL SUMINISTRO DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO EN LA ZONA RURAL*. Bogota.
- Dipankar S, F. A. (2014). Evaluación de la vulnerabilidad del agua subterránea utilizando modelos DRASTIC y Pesticide DRASTIC en una zona de agricultura intensa de las llanuras del Ganges, India. *Environmental Monitoring and Assessment*.
- E. Custodio, R. L. (2002). Acuíferos explotados intensivamente: conceptos principales, hechos relevantes y algunas sugerencias. *Boletín Geológico*, 223-225.
- Ferdinand Quiñones, J. A. (1985). *Agua subterranea en Puerto Rico*. U.S. Geological Survey.
- Fontecha, D. A. (2018). *VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS SOMEROS CON POROSIDAD PRIMARIA, DEPARTAMENTO DEL QUINDÍO - COLOMBIA*. Qundio: UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO.

- Francisco E, J. T. (2013). Aplicación del método SINTACS para la determinación de la vulnerabilidad acuífera en la cuenca del río Duero, Michoacán, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*.
- German Environment Agency. (2018). *Water Resource Management in Germany. Fundamentals, pressures, measures*. Dessau-Roßlau: BMU / UBA.
- Global Footprint Network. (2017). *Global Footprint Network*. Obtenido de https://data.footprintnetwork.org/?_ga=2.221374424.1787574044.1620728553-825141688.1620728553#/
- Hernandez, M. P. (2012). Estimación de incertidumbres - Guía GUM. *Revista Española de meteorología*, 1-18.
- Hernández-Abreu, E., & Martínez-Pérez, M. (2012). EL MÉTODO BOOTSTRAP EN LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRES. *INIMET*, 2-10.
- HERRÁIZ, A. S. (2009). LA IMPORTANCIA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 97-100.
- Hispagua Sistema español de información sobre el agua. (25 de 03 de 2021). *Hispagua*. Obtenido de Hispagua: <http://hispagua.cedex.es/datos/hidrogeologia>
- Hongwei Lu, J. L. (2018). Optimal groundwater security management policies by control of inexact health risks under dual uncertainty in slope factors. *ELSEVIER*, 161,171,172.
- Hoogesteger, J. (2009). USO INTENSIVO Y DESPOJO DEL AGUA SUBTERRÁNEA: HACIA UNA CONCEPTUALIZACIÓN DE LOS CONFLICTOS Y LA CONCENTRACIÓN DEL ACCESO AL AGUA SUBTERRÁNEA. *Concentracion*.
- IDEAM. (2018). *Estudio nacional del agua*. Bogota: IDEAM.
- IGRAC. (2015). Transboundary Aquifers of the World. *Transboundary Aquifers of the World*.
- Jaime H, P. W. (2009). USO INTENSIVO Y DESPOJO DEL AGUA SUBTERRÁNEA: HACIA UNA CONCEPTUALIZACIÓN DE LOS CONFLICTOS Y LA CONCENTRACIÓN DEL ACCESO AL AGUA SUBTERRÁNEA. *Concentracion*.
- Jean Margat, J. v. (2013). *Groundwater around the world*. CRC press.
- K. Korbel, G. H. (2017). The weighted groundwater health index: Improving the monitoring and management of groundwater resources. *Ecological Indicators*, 1.
- Ofelia M, M. L. (2011). Descripción general de la Inferencia Bayesiana y sus aplicaciones en los procesos de gestión. *La simulacion al servicio de la academia*, 1-27.

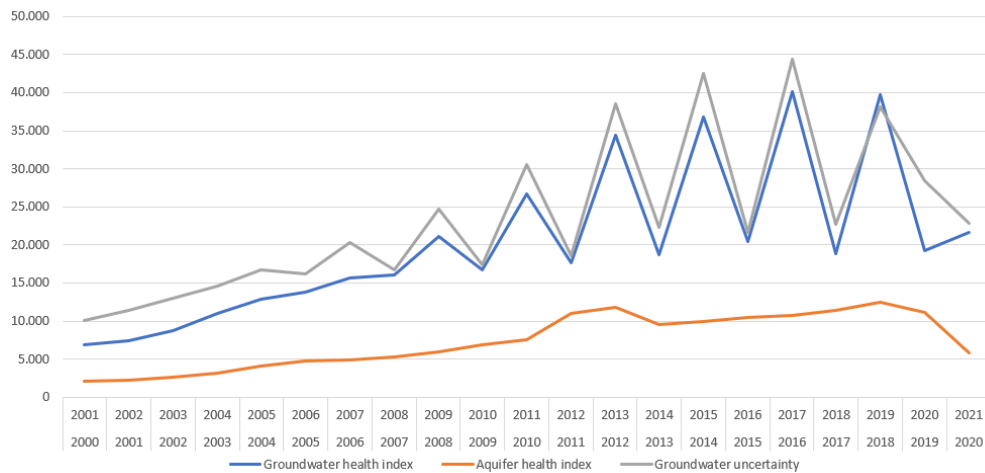
- Philippus Wester, J. H.-v. (2009). USO INTENSIVO Y DESPOJO DEL AGUA SUBTERRÁNEA: HACIA UNA CONCEPTUALIZACIÓN DE LOS CONFLICTOS Y LA CONCENTRACIÓN DEL ACCESO AL AGUA SUBTERRÁNEA. 105-113.
- Philippus Wester, J. H.-v. (2009). *USO INTENSIVO Y DESPOJO DEL AGUA SUBTERRÁNEA: HACIA UNA CONCEPTUALIZACIÓN DE LOS CONFLICTOS Y LA CONCENTRACIÓN DEL ACCESO AL AGUA SUBTERRÁNEA.*
- PNUMA. (2021). *GREENFACTS*. Obtenido de <https://www.greenfacts.org/es/glosario/def/estres-hidrico.htm#:~:text=Definici%C3%B3n%3A&text=El%20estr%C3%A9s%20h%C3%ADrico%20provoca%20un,intrusi%C3%B3n%20salina%2C%20etc.>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2016). *Acuíferos transfronterizos y Sistemas acuíferos de los Pequeños Estados insulares en desarrollo*. Nairobi: PHI-UNESCO.
- Programa Hidrológico Internacional. (2007). *SISTEMAS ACUÍFEROS TRANSFRONTERIZOS EN LAS AMERICAS EVALUACION PRELIMINAR*. Montevideo: IGRAC.
- Sean W. Fleming, C. W. (2014). The unbearable fuzziness of being sustainable: an integrated, fuzzy logic-based aquifer health index. *Hydrological Sciences Journal*, 1154–1166.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (Junio de 2019). *Gobierno de Mexico*. Obtenido de http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_R_AGUA05_01&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce
- Tom Gleeson, Y. W. (2012). Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, 197.
- Universidad de sonora. (2020). *Universidad de sonora*. Obtenido de <https://www.fisica.uson.mx/manuales/mecyfluidos/mecyflu-lab001.pdf>
- Water footprint network. (2012). *Water footprint network*. Obtenido de <https://waterfootprint.org/en/resources/waterstat/national-water-footprint-statistics/>
- WFN. (2011). *Huella de ciudades*. Obtenido de <https://huelladeciudades.com/AppHHCali/main.html#ques>

Anexos

Se realizó una recolección de información de modo general donde se pueden observar los estudios y publicaciones realizadas por terceros y la cantidad de búsquedas realizadas comprendidas desde el año 2000 hasta el año 2021, esto con el fin de sentar un precedente y la existencia de información sólida para la metodología que se quiere desarrollar.

Anexo 1.

Cantidad de estudios publicados entre el año 2000 y 2021



Fuente: Elaborado por el Autor.

De la anterior grafica se puede observar que la mayor cantidad de trabajos publicados acerca del índice de salud para aguas subterráneas fue realizada en el periodo del 2016 al 2017 con un total de 40.200 resultados; por otro lado, el índice de salud para acuíferos fue quien obtuvo una menor cantidad de trabajos publicados alcanzando su máximo valor en el periodo de 2018 al 2019 con un total de 12.500 trabajos publicados. Por último, la incertidumbre de las aguas subterráneas de igual manera que el índice de salud para agua subterránea obtuvo grandes valores siendo su máximo de 44.400 trabajos publicados

comprendidos en el periodo de 2017-2018. Esta información nos permite tener certeza de la existencia de una información previa sobre el tema que se estudió

Anexo 2.

Base de datos de los acuíferos seleccionados.

Nombre Acuífero	Area (Km2)	Países (Países conectados)	Agricultura	Tipo de uso	Tipo de agua	Profundidad	Normativas - Protección	Continente
Guarani - Serra Geral	1.200.000	Brasil - Paraguay - Uruguay - Argentina	No	Abastecimiento e industria	Dulce - Salada	1.800 m	Programa ISARM	Suda America
Caiua - Baru - Acaray	300.000	Brasil - Paraguay	Ganadería y agroindustrial	Abastecimiento	Dulce	80 m - 300 m	Programas de gestión y monitoreo	
Boa Vista-Serra do Tucano-North Savanna	200.000	Brasil - Guyana	Agua superficial	Abastecimiento Subterránea	Dulce - Salada	570 m	Ministerio de Recursos Naturales y Energía	
Pantanal	130.000	Brasil - Bolivia - Paraguay	Agroindustria	Abastecimiento	Dulce (Humedales)	100 m - 200 m	GEF/ PNUMA/ OEA Y UNESCO	Norte America
Northern Great Plains	1,077,798	Canada - USA	Riegos	Uso doméstico	Mayormente Salada	365 m	NPS (Servicio de parques Nacionales)	
Edwards-Trinity-El Burro	130.000	Mexico - USA	Agricultura	Abastecimiento	Dulce - Ligeramente Salada	0 m - 60 m	TWDB	
Ogallala	450.657	USA	Agricultura - Riego	Uso doméstico	Mayormente Salada	30 m - 60 m	GCD	
Judith River	241,497	Canada, United States of America	Agricultura - Riego	Uso doméstico	Mayormente Salada	-	NPS (Servicio de parques Nacionales)	Centro America
Conejos Médanos-Bolsón de la Mesilla	10.000	Mexico - USA	Agrícola	Doméstico - Industrial	Dulce	8 - 130 m	-	
Península de Yucatán Candelaria Hondo	158.531	Guatemala - Mexico - Belice	Riego	Doméstico - Industrial	Dulce	14 m - 585 m	El Servicio Nacional Hidrometeorológico de Belice, CONAGUA de México y la CILA	
Ocosingo-Usumacinta-Pocóm-Ixcán	24.393	Guatemala - Mexico	Agropecuario	Doméstico	Dulce	-	INSIVUMEH en Guatemala y por la CONAGUA en México	
Ordovician - Cambrian Groundwater Body	131.702	Estonia - Rusia	Agricultura - Riegos	Doméstico - Abastecimiento	Dulce	150 m	Estrategias de manejo, TFUE	Europa
Cambrian - Vendian - Voronka Groundwater	128.721	Estonia - Rusia	Agricultura - Riegos	Doméstico - Abastecimiento	Dulce - Salada	-	Estrategias de manejo, TFUE, DMA	
Belgian - Dutch - German Lowland Aquifer System	74,636	Belgium - Netherlands - Germany	RIEGOS	Abastecimiento	Dulce	5 m	TFUE, DMA	
Daugava	62,872	Latvia, Belarus, Lithuania, Russia	RIEGOS	Abastecimiento	Dulce	-	TFUE, DMA	Africa
Nubian Sandstone Aquifer System	2,892,867	Chad, Egypt, Libya, Sudan	Riegos	Abastecimiento	Dulce - Salada	225 m - 784 m	IAEA-UNDP-GEF	
Lake Chad Basin	2,271,303	Chad, Niger, Nigeria, Cameroon, Central African republic, Algeria	Agricultura - Riegos	Abastecimiento	Dulce - Salada	250 m	LCBC, GWP Program	
Taoudeni Basin	1,260,940	Algeria, Mali, Mauritania	Agricultura - Riegos	Doméstico - Abastecimiento	Dulce - Salada	105 m	GICRESAIT, TAS	Asia
Umm er Radhuma-Dammam Aquifer System (North): Widyan-Salman	297,943	Iraq, Kuwait, Saudi Arabia	Agricultura	Abastecimiento	Dulce - Salada	30 m - 600 m	-	
South of outer Himalayas Aquifer	373,25	India, Nepal	Agricultura	Doméstico - Abastecimiento	Dulce - Salada	10 m - 40 m	GWMS	
Umm er Radhuma-Dammam Aquifer System (Centre): Gulf	345.000	Saudi Arabia, United Arab Emirates, Bahrain, Qatar	Agricultura	Doméstico - Abastecimiento	Dulce	35 m - 180 m	GRACE, GWS	
Umm er Radhuma-Dammam Aquifer S	791.877	Oman, Saudi Arabia, United Arab Emirates, Yemen	Agricultura	Doméstico	e - Salada (Zonas cost	35 m - 500 m	-	

Fuente: Elaborado por el autor