



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Revisión Sistemática: Estudio de Métodos que Evalúan la
Sobreexplotación de Aguas Subterráneas en Zonas Áridas**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniera Ambiental

AUTORAS:

Canales Valencia, Mayte Rosa (ORCID: 0000-0001-7611-9794)

Quispe Carlos, Valeria Sofia (ORCID: 0000-0002-8649-8406)

ASESOR:

Mg. Ugarte Alván, Carlos Alfredo (ORCID: 0000-0001-6017-1192)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Calidad y Gestión de los Recursos Naturales

LIMA – PERÚ

2022

Dedicatoria

El presente trabajo de investigación se lo dedicamos principalmente a Dios, por salvaguardarnos cada día, brindándonos oportunidades y otorgándonos salud para lograr nuestras metas, objetivos y culminar nuestra carrera profesional.

A nuestros padres por darnos el impulso para seguir adelante hacia el cumplimiento de nuestras aspiraciones de vida, prevaleciendo nuestra formación que nos inculcaron.

Agradecimiento

Nuestro agradecimiento en primer lugar es a Dios, por ser nuestra fortaleza, y guiarnos por el camino correcto.

Agradecidas con nuestros padres por su esfuerzo para brindarnos la educación y educarnos para lograr nuestro desarrollo personal y profesional.

Agradecidas con el Ing. Ricardo Antonio Rosas Luján por su tiempo y orientación, asimismo, a la universidad Cesar Vallejo por permitirnos la enseñanza y capacitación para el desarrollo de nuestra investigación.

Índice de contenido

Carátula	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento	iii
Índice de contenido	iv
Índice de figuras.....	v
Índice de tablas.....	vi
Índice de abreviaturas.....	vii
Resumen	viii
Abstract.....	ix
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO	4
III. METODOLOGÍA.....	21
3.1 Tipo y diseño de investigación.....	21
3.2 Categorías, subcategorías y matriz de categorización apriorística	22
3.3 Escenario de estudio	23
3.4 Participantes.....	23
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	23
3.6 Procedimiento	25
3.7 Rigor científico.....	26
3.8 Método de análisis de datos	27
3.9 Aspectos éticos	28
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
V. CONCLUSIONES	55
VI. RECOMENDACIONES.....	56
REFERENCIAS	57
ANEXOS	

Índice de figuras

Figura 1: Recolección de datos	25
Figura 2: Mapa de países donde se desarrollaron las investigaciones.....	29
Figura 3: Línea de tiempo del desarrollo de las investigaciones.....	30
Figura 4: Análisis de métodos según su enfoque.	35
Figura 5: Análisis de los métodos según simulador/herramienta.	37
Figura 6: Incidencia de la problemática recurso hídrico subterráneo.....	45
Figura 7: Análisis de parámetros.	47
Figura 8: Análisis de recarga evaluada.	52
Figura 9: Análisis de explotación porcentual	53

Índice de tablas

Tabla 1: Antecedentes.....	4
Tabla 2: Clasificación de las formaciones geológicas	14
Tabla 3: Tipos de acuíferos	15
Tabla 4: Almacenamiento y Transmisividad	16
Tabla 5: Clasificación métodos-modelos	17
Tabla 6: Matriz de categorización apriorística.....	22
Tabla 7: Características específicas de los métodos	31
Tabla 8: Herramientas y simuladores	38
Tabla 9: Evaluación de parámetros según la problemática.....	39
Tabla 10: Relación problema - parámetros de los métodos	46
Tabla 11: Análisis de la evaluación de recarga.....	48
Tabla 12: Flujo de recarga.....	51
Tabla 13: Alternativas de automatización de canales.....	52
Tabla 14: Tipos de explotación porcentual	53
Tabla 15: Aspectos del estudio de los métodos.....	54

Índice de abreviaturas

AHP	Analytic hierarchy process
AS	Agua subterránea
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
ASR	Storage and recovery of aquifers
CHD	Constant Head
DPSIR	Diver-Pressure-State-Impact-Response
ERDAS	Easy-to-use, Raster-based Software Designed Specificall
GDEM	Global Digital Elevation Modeling
GW	Groundwater
HFB	Horizontal Flow Barrier
IDW	Reverse Distance Weighting
LUCC	Land Use and land Cover Change
MODFLOW	Groundwater Flow Model module of finite-difference
MUSIASSEM	Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism
PM	Penman-Monteith
Q1	Quartile one
SIG	Sistema de Información Geográfica
SPI	Standardized Precipitation Index
VIC	Variable Infiltration Capacity
WASIM	Water balance model
WTFM	Free surface fluctuation method

Resumen

La extracción de aguas subterráneas se presenta considerablemente en zonas áridas, esto debido a su priorización como fuente de agua para distintos aspectos socioeconómicos. Sin embargo, en el aspecto ambiental esta acción está causando severos problemas al recurso hídrico. La evolución de investigaciones ha permitido una adopción del problema en métodos de solución, métodos que gestionan el agua subterránea para una sustentabilidad a largo plazo y como un impulso a toma de decisiones para gestionar el recurso de manera adecuada. La evaluación de la sobreexplotación de este recurso a conllevado a distintos autores al uso de métodos en busca de su solución. El presente proyecto de investigación tiene como objetivo el estudio de estos métodos para ello la determinación de características de su implementación, analizando las diversas herramientas, simuladores en el que se complementan para la determinación de la sobreexplotación, así también considerando los parámetros hallados por los métodos, con un enfoque mayor de acuerdo al problema en el que determinó el uso de estos métodos, por último, determinar una relación recarga-acuífero. Como modelos se destacan DPSIR y WTF con un enfoque a la sustentabilidad, cabe destacar que, en su mayoría, fue el enfoque más usado, entre sus herramientas destacaron ArcGIS y el simulador MODFLOW, en cuanto a parámetros del modelo se relaciona mayormente con los principales problemas como reducción del nivel freático subterráneo, extracción de aguas subterráneas a nivel cultivo, dentro de los parámetros predominantes tenemos valores de sustentabilidad, agotamiento del nivel freático, dirección de flujo de GW, huella hídrica azul, etapa de desarrollo, reducción extracción, aumento de abstracción, disminución de recarga, reducción de los flujos base de ET y superficiales, recarga, escenarios futuros, compatibilidad de las aguas de origen y subterránea, uso del agua, nivel relativo, valor agregado bruto anual, análisis espacial, índice de sostenibilidad del agua azul.

Palabras clave: Agua subterránea, sobreexplotación, métodos, simuladores, sostenibilidad.

Abstract

The extraction of groundwater occurs considerably in arid areas, this due to its prioritization as a source of water for different socioeconomic aspects. However, in the environmental aspect this action is causing severe problems to the water resource. The evolution of research has allowed an adoption of the problem in solution methods, methods that manage groundwater for long-term sustainability and as a boost to decision making to manage the resource properly. The evaluation of the overexploitation of this resource has led different authors to use methods in search of their solution. The present research project aims to study these methods for the determination of characteristics of their implementation, analyzing the various tools, simulators in which they complement each other for the determination of overexploitation, as well as considering the parameters found by the methods, with a greater focus according to the problem in which it determined the use of these methods, finally, determine a recharge-aquifer relationship. As models stand out DPSIR and WTF with a focus on sustainability, it should be noted that mostly, it was the most used approach, among its tools ArcGIS and the MODFLOW simulator stood out, in terms of parameters of the model it is mostly related to the main problems such as reduction of the underground water table, groundwater extraction at the cultivation level, within the predominant parameters we have values of sustainability, depletion of the water table, direction of GW flow, blue water footprint, stage of development, reduction of extraction, increase of abstraction, decrease of recharge, reduction of the base flows of ET and surfaces, recharge, future scenarios, compatibility of the waters of origin and groundwater, use of the water, relative level, annual gross aggregate, spatial analysis, blue water sustainability index.

Keywords: Groundwater, overexploitation, methods, simulators, sustainability.

I. INTRODUCCIÓN

El agua subterránea en zonas áridas y semiáridas desempeña un papel fundamental como fuente de abastecimiento de agua potable, riego de cultivos y conservación de ecosistemas terrestres (humedales, lagos y ríos) así lo confirman varios estudios (Prasad and Rao 2018; Ahani Amineh, Hashemian and Magholi 2017; Ramos et al. 2020). A largo de la humanidad se ha venido incrementando la dependencia de las aguas subterráneas, creando un desequilibrio en su disponibilidad debido a la excesiva extracción, dando como resultado la disminución acelerada del nivel freático del acuífero (Prasad and Rao 2018). Gran parte del mundo se enfrenta a la disminución generalizada de calidad y cantidad de agua subterránea (Massuel and Riaux 2017). Como elemento fundamental para el desarrollo socioeconómico, se requiere de una gestión sostenible a largo plazo (Nechifor and Winning 2017). Por lo tanto, es de suma importancia el análisis de los diversos factores involucrados, para la determinación de la sobreexplotación de los recursos hídricos subterráneos, basándonos desde las características predominantes hasta el análisis de los parámetros, ya sea estén enfocados en la recarga, sostenibilidad y disponibilidad, estudiados en función a la implementación de los diversos métodos que utilizan los diversos autores.

En el estudio de Ebrahim, Lautze and Villholth (2020), se conoce que la variabilidad del clima da como resultado una disponibilidad de agua poco fiable e incierta y contribuyen a la inseguridad hídrica en áreas áridas y semiáridas factor que debilita la recarga de los acuíferos, así mismo la disminución del nivel freático también se ve afectado por dos factores, el incremento de la extracción y la disminución de recarga debido al cambio climático (Mamo et al. 2021). El intenso bombeo de agua subterránea de los acuíferos crea conos de agotamiento y reduce el nivel freático a 25 (m.s.n.m) (Alfarrah and Walraevens 2018), de acuerdo con el estudio de Famiglietti (2014), gran parte de los acuíferos entran a un estado de estrés hídrico a causa de las actividades agrícolas. En el caso del riego, mundialmente se denotan una extracción insostenible del agua subterránea contenidas en acuíferos (Rosa et al. 2019). Según Wada, van Beek and Bierkens (2012), un 20% de agua para riego depende de la extracción de agua subterránea.

En contexto la sobreexplotación del recurso hídrico afecta directamente al desequilibrio del desarrollo sostenible ya que no existe un equilibrio considerable entre el aspecto socioeconómico con el aspecto ambiental del recurso. Considerando la escurrimiento y precipitaciones que se presentan como principales recargas naturales, sobre todo para agua superficial, es importante acotar la complejidad de recuperación del agua subterránea en acuíferos lo que puede resultar en muchas décadas para lograrlo (Gleeson et al. 2010).

Cuanto mayor sea la demanda de agua subterránea en un lugar, mayor será la extracción y mayor la caída del nivel de las aguas subterráneas, por lo tanto, la disminución del nivel del agua subterránea se usa para la evaluación de este criterio y las áreas que tienen una mayor disminución del nivel freático subterráneo son más favorables en función al estudio (Ahani Amineh, Hashemian and Magholi 2017).

En cuanto a la evaluación de sobreexplotación de aguas subterráneas se presentan retrasos en la adaptación de métodos que satisfacen la demanda urbana, suministro y almacenamiento de agua subterránea sustentablemente (Page et al. 2018), como es el caso de recarga inducida cuyo fin es la gestión de agua subterránea, se muestra que está en un desarrollo reciente (Humberto et al. 2017). En muchas ocasiones se han aplicado métodos de evaluación centradas mayormente en datos a escalas anuales, las cuales no generan un análisis de precisión para la búsqueda de solución más óptima. Las soluciones a corto plazo generan consecuencias adversas, aumentando su magnitud en un intervalo de tiempo (Chen et al. 2021).

En un futuro previsible, muchas regiones llegarán a sus límites, las regiones en declive actual se expandirán y se desarrollarán nuevas regiones que experimenten el agotamiento. Es de considerar que el creciente nivel de estrés de las aguas subterráneas puede ser un factor importante para el crecimiento económico futuro y generar estrés socioeconómico, mientras que las restricciones ambientales también se están logrando en regiones donde la pérdida de agua subterránea y superficial es significativa, pero aún no se ha agotado (de Graaf et al. 2017).

En esta investigación evaluamos métodos que proporcionan un avance a la gestión de aguas subterráneas, permitiendo el desarrollo sostenible en las zonas áridas, entre sus principales actividades económicas como en la conservación ecológica de ecosistemas terrestres. El enfoque de aspectos cualitativos permitirá una evaluación del desarrollo de métodos para una gestión óptima en el recurso hídrico subterráneo, consiguiendo la extracción sostenible de las aguas subterráneas y preservando dicho recurso para las futuras generaciones.

En el presente estudio se propone tres preguntas de investigación que se enfocan en los métodos:

- ¿Cuáles son las características más importantes que presentan los métodos que evalúan la sobreexplotación de aguas subterráneas en zonas áridas?
- ¿Cuáles son los parámetros más requeridos de acuerdo con el problema para la evaluación de la sobreexplotación de aguas subterráneas en zonas áridas?
- ¿Cuáles son los criterios principales que usaron los métodos para evaluar la recarga frente a la sobreexplotación de las aguas subterráneas en zonas áridas?

Los objetivos del proyecto de investigación se resuelven en:

- Identificar las características principales que presentan los métodos que evalúan la sobreexplotación de aguas subterráneas en zonas áridas.
- Analizar los parámetros que emplearon los métodos para la evaluación de la sobreexplotación de aguas subterráneas en zonas áridas.
- Evaluar los criterios principales que utilizaron los métodos para evaluar la recarga frente a la sobreexplotación de las aguas subterráneas en zonas áridas.

II. MARCO TEÓRICO

En relación con el estudio de la investigación se recolectaron datos específicos, pertinentemente de la fuente de información científica ScienceDirect, por lo que la información tomada es de alto nivel con una categoría (Q1), en un periodo definido desde 2017 al 2022, recabando principalmente estudios desarrollados en zonas áridas y semiáridas. El análisis de la información se detalla en la tabla N°1.

Tabla 1: Antecedentes

N°	AUTOR	AÑO	MÉTODO	OBJETIVO	PARÁMETROS	RESULTADOS
1	Salmoral et al.	2020	- Ecuación de evaluación multicriterio	- Comprender los desafíos de la expansión agrícola. - Realizar una evaluación multicriterio del agua de riego para evaluar el consumo de agua azul.	- Clima - Suelo - Cultivo	Se obtuvo resultados de necesidad de riego de diferentes cultivos. Se evaluó los impactos de los recursos hídricos de acuerdo a la expansión agrícola.

N°	AUTOR	AÑO	MÉTODO	OBJETIVO	PARÁMETROS	RESULTADOS
2	Schwarz and Mathijs	2017	- MUSIASSEM	<ul style="list-style-type: none"> - Analizar interacciones entre beneficios socioeconómicos agrícola y el uso de los recursos de aguas subterráneas. - Análisis comparativo de la producción de exportación con la producción para el autoconsumo y los mercados nacionales. 	<ul style="list-style-type: none"> - Socioeconómico - Ecosistema 	<p>Uso de un patrón metabólico permitió información importante referido a las interrelaciones entre la globalización-uso de las aguas subterráneas- y aspectos socioeconómicos.</p>
3	Chang et al.	2017	PCA	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluar respuestas de las aguas subterráneas para satisfacer la necesidad de tomar decisiones sobre la gestión de los recursos de aguas subterráneas. 	Registros de nivel del agua subterránea	<p>Se exploró las características espacio-temporales de los sistemas de aguas subterráneas.</p> <p>Se consideró como una herramienta útil para la</p>

N°	AUTOR	AÑO	MÉTODO	OBJETIVO	PARÁMETROS	RESULTADOS
4	Chen et al.	2021	Cuantificar características de recarga	<ul style="list-style-type: none"> - Determinar las características de la recarga de acuíferos poco profundos en la zona de sobreexplotación de aguas subterráneas desde dos perspectivas, es decir, la cantidad de proceso de recarga y recarga de acuíferos poco profundos a escala diaria. 	<ul style="list-style-type: none"> - Precipitación - Recarga - Proceso 	<p>gestión de recursos hídricos subterráneos.</p> <p>Se detallaron patrones de recarga de acuíferos poco profundos y los factores que controlan la recarga.</p>
5	Soula et al.	2021	Examen a profundidad de datos	<ul style="list-style-type: none"> - Análisis de los recursos hídricos mediante SIG y herramientas de teledetección en la región de Mahdia. 	<ul style="list-style-type: none"> - Clima - Geológico - Geomorfológicos 	<p>Se detallaron los factores que contribuyen a la escasez del agua, los recursos hídricos, sus</p>

N°	AUTOR	AÑO	MÉTODO	OBJETIVO	PARÁMETROS	RESULTADOS
6	Sarah et al.	2021	Flujo de agua subterránea	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluar estrategias hídricas actuales para prevenir la sobreexplotación de las aguas subterráneas y reducir las amenazas socioeconómicas. - Recomendar acciones para mejorar la gestión basada en los principios de diseño de Ostrom, así como en la teoría económica. - Evaluación de los acuíferos en base a dos factores agotamiento y contaminación por fluoruro, para una gestión sostenible de los acuíferos. - Introducción de un nuevo término "Pérdida de agua virtual". 	<ul style="list-style-type: none"> - Proyección de agotamiento - Volumen total - Volumen de agua contaminada - Cambio en el almacenamiento 	<p>usos y la gestión del agua.</p> <p>De las tres zonas de evaluación dos de ellas son muy sensibles a la extracción y una de ellas está en peligro de agotamiento y contaminación por</p>

N°	AUTOR	AÑO	MÉTODO	OBJETIVO	PARÁMETROS	RESULTADOS
7	Samani	2021	DPSIR (Modelo Conceptual)	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluar y monitorear la sostenibilidad de las aguas subterráneas en base a indicadores, se utilizó métodos de ponderación para ponderar los indicadores. 	<ul style="list-style-type: none"> - Índices de desarrollo sostenible 	<p>factores de precipitación y extracción excesiva.</p> <p>Los resultados demuestran el estado actual de aguas subterráneas, concluyendo que el indicador más importante es el ambiental.</p>
8	Mamo et al.	2021	Flujo de agua subterránea	<ul style="list-style-type: none"> - Predecir los impactos de los cambios proyectados en la extracción y recarga de aguas subterráneas, disponibilidad e interacción de aguas subterráneas y superficiales. 	<ul style="list-style-type: none"> - Recarga - Disponibilidad - Interacción de aguas subterráneas y superficiales 	<p>Los resultados demuestran que existe una disminución de nivel freático, implicando el secado de pozos, lo que tendrá efectos adversos en los habitats que</p>

N°	AUTOR	AÑO	MÉTODO	OBJETIVO	PARÁMETROS	RESULTADOS
9	Prasad and Rao	2018	WTF	- Evaluación del nivel freático y estimaciones de la etapa de desarrollo de las aguas subterráneas en base a los estudios de recarga.	- Agotamiento - Recarga anual - Balance de agua subterránea	dependen del agua subterránea. Queda en evidencia que los niveles de las aguas subterráneas están disminuyendo a un ritmo acelerado, lo que indica que la cuenca esta sobreexplotada.
10	Ahani Amineh, Hashemian and Magholi	2017	ASR	- Desarrollar un logaritmo en base a la idoneidad del sitio de almacenamiento y recuperación de acuíferos.	- Idoneidad hidrogeológica - Compatibilidad de fuentes de recarga y subterránea	Se evidencia la pronta ejecución de la recarga artificial, dando como importancia la determinación de la idoneidad de la celda para la recarga.

N°	AUTOR	AÑO	MÉTODO	OBJETIVO	PARÁMETROS	RESULTADOS
11	Humberto et al.	2018	Programa piloto de recarga artificial	- Demostrar cómo la recarga de acuíferos gestionados con agua regenerada ha ayudado a preservar los recursos hídricos durante más de 10 años en una región semiárida.	- Infiltración - Evolución de calidad del agua - Operación del tanque	Se halló la eficiencia de las lagunas de infiltración Se estimó las propiedades hidráulicas del suelo.
12	Ramos et al.	2020	SPI Flujo de agua subterránea	- Estudiar los efectos futuros de los condiciones climáticas y sociales.	- Variabilidad climática - Aumento de la extracción - Precipitación	La variación climática es el factor que más impacto producirá en el acuífero que el aumento de la extracción.

N°	AUTOR	AÑO	MÉTODO	OBJETIVO	PARÁMETROS	RESULTADOS
13	Hossain et al.	2021	VIC RIFM WTFM	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluar el recurso de las aguas subterráneas y comprender los diferentes procesos de recarga de las aguas subterráneas. - Evaluar la capacidad de las técnicas de automatización de canales 	<ul style="list-style-type: none"> - Infiltración de lluvia - Evapotranspiración - Fluctuación del nivel freático - Estimación de recarga - Cambios de flujo a través de la puerta 	<p>Se estima la recarga anual de 635.35 millones de m³.</p> <p>Presenta una etapa de desarrollo de 117% a 320%.</p>
14	Hashemy Shahdany et al.	2018	Automatización de canales	<ul style="list-style-type: none"> - Examinar las posibles reducciones en la explotación de aguas subterráneas, el consumo de energía y el CO2 emisión 	<ul style="list-style-type: none"> - Error del nivel de agua filtrada - Criterios de adecuación - Indicador de equidad 	<p>El 10%, 15% y 25% de entradas totales podrían ahorrarse implementando las alternativas.</p> <p>Reducción de la extracción de agua subterránea en 120, 180 y 300 MCM.</p>

N°	AUTOR	AÑO	MÉTODO	OBJETIVO	PARÁMETROS	RESULTADOS
15	Jia et al.	2019	DPSIR	<ul style="list-style-type: none"> - Desarrollar el primer marco integral de GSA nacional en China. - Realizar la primera evaluación nacional de China continental. - Presentar implicaciones para la toma de decisiones y la implementación de políticas basadas en la evaluación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Consumo de electricidad - Categorías de dimensiones de la sociedad, la economía y el medio ambiente 	<p>Reducción de 170, 280 y 450 millones de kWh de consumo de energía, y una reducción de 23.000, 34.500 y 57.500 t de emisiones de carbono por año.</p> <p>Relación negativa entre la sostenibilidad del agua subterránea y los niveles de desarrollo, lo que indica la necesidad de un desarrollo más sostenible en China.</p> <p>La comparación de puntajes de diferentes subcategorías nos proporciona una guía</p>

N°	AUTOR	AÑO	MÉTODO	OBJETIVO	PARÁMETROS	RESULTADOS
16	Sidhu, Sharda and Singh	2021	Evaluación espacio-temporal	Cuantificar el impacto de iniciativas recientes para conservar agua sobre el agotamiento de GW en el estado, para asegurar su gestión para el desarrollo sustentable.	<ul style="list-style-type: none"> - Datos de 3 regiones - Superficie - Clima - Lluvia - Tipo de suelo 	<p>para mejorar la sostenibilidad general de los recursos de agua subterránea.</p> <p>Aumento muy variable, de lluvia y aumento de temperaturas.</p> <p>Para mejorar el actual escenario de agotamiento de GW, existe una necesidad de reformar la política de energía libre.</p>

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los estudios del trabajo de investigación, se toman en consideración los siguientes conceptos:

Las aguas subterráneas son aquellas situadas por debajo de la superficie (subsuelo) y se mueven por los poros de las rocas constituyendo acuíferos (Momiy-Hada et al. 2017), lugar donde reposa las aguas subterráneas.

Un acuífero es considerado cuando esta tiene la capacidad de retener agua y pueda moverse libremente por las rocas subterráneas, consideradas rocas permeables, así mismo que a su vez cumplen características de conexiones eficientes entre los poros y las fracturas del material rocoso, según la Agencia de Protección Ambiental EPA (2021).

En el mundo podemos encontrar diferentes formaciones geológicas (Sánchez San Román 2019). En la tabla 2, se visualiza la clasificación:

Tabla 2: Clasificación de las formaciones geológicas

Formaciones Geológicas	Características
Acuífero (del latín <i>fero</i> , llevar)	Formación geológica que contienen agua y que permite que circule a través de ella con facilidad, almacenan, filtran y liberan agua.
Acuicludo (del latín <i>cludo</i> , encerrar)	Formación geográfica que contienen agua pero que no permiten su circulación, razón por el cual no puede ser extraída mediante bombeo.
Acuitardo (del latín <i>tardo</i> , impedir)	Formación geográfica con características intermedias entre un acuífero y un acuicludo.
Acuífego (del latín <i>fugo</i> , rechazar)	Formación geográfica que no contiene agua porque no permite que circule a través de ella.

Fuente: Momiy-Hada et al. (2017); Sánchez San Román (2019)

Las formaciones geológicas son saturadas por el agua hasta un determinado nivel, denominado superficie freática. El nivel superior de un acuífero o nivel freático también denominado napa o capa freática, puede llegar a estar cerca dentro de unos pocos pies o muy profunda hasta cientos de pies, como ocurre en las zonas desérticas, llegando a estar a una profundidad de 300 pies (Harter 2003).

Dentro de los tipos de acuíferos podemos encontrar acuíferos libres y confinados (Momiy-Hada et al. 2017). En la tabla 3, se muestra los 2 tipos.

Tabla 3: Tipos de acuíferos

Tipos	Características
Libres	<ul style="list-style-type: none"> • Posee una superficie freática a presión atmosférica. • Cuando la superficie freática se encuentra por encima del nivel de la superficie se produce la afloración de las aguas subterráneas, formando lagunas, humedales o bofedales. • Pueden recargarse por medio de precipitaciones o excedentes de riego.
Confinados	<ul style="list-style-type: none"> • Se encuentran encerrados entre un fondo y un techo impermeable. • Posee una presión superior a la atmosférica. • Al extraer agua el nivel de la superficie piezométrica desciende.

Fuente: Momiy-Hada et al. 2017

Para suministrar los acuíferos, el principal medio son las recargas de agua subterránea, acción de llenar o suministrar un acuífero, es decir donde los acuíferos toman agua por medio de la infiltración de la zona no saturada obtenida de las precipitaciones en forma de lluvia o nieve, la velocidad de infiltración dependerá del tipo de suelo geográfico, según la Agencia de Protección Ambiental (EPA 2021).

Según Harter (2003), entre el nivel freático y la superficie terrestre se ubica la zona no saturada, zona donde la humedad baja hacia el nivel freático para recargar las aguas subterráneas. Las principales formas de recarga de los acuíferos son mediante los procesos de riego y a través del curso de las aguas en los ríos. Para el primero es de considerar los tipos de fincas que se distribuyen con tecnología de riego o con métodos tradicionales, así mismo evaluar las necesidades riego y estimar a recarga del sistema acuífero. Es importante considerar la huella hídrica volumétrica para evaluar el agua que es propiamente utilizada para diferentes

actividades con respecto a los impactos que estos generan (G20 Presidency of Germany 2017).

Las aguas subterráneas tienen salidas, denominadas descargas de aguas subterráneas, una descarga es aquella donde desemboca las aguas subterráneas hacia los arroyos, ríos o lagunas y rara vez llega hacia el mar, por lo que, las aguas subterráneas fluyen hacia la superficie de la tierra formando parte de las aguas superficiales, según la Agencia de Protección Ambiental (EPA 2021).

Andreu Rodes and Fernández Mejuto (2019) define la sostenibilidad como la forma de utilizar el recurso hídrico sin causar efectos adversos sobre el propio recurso y sobre el medio ambiente.

La calidad de un acuífero está determinada por su transmisividad y por su coeficiente de almacenamiento (Sánchez San Román 2019). En la tabla 4 se analiza la calidad de un acuífero entre estos dos factores.

Tabla 4: Almacenamiento y Transmisividad

	Porosidad total	Permeabilidad
Acuíferos	Alta o moderada	Alta
Acuitardos	Alta o moderada	Baja
Acluicudos	Alta	Baja
Acuifugos	Nula o muy baja	Nula

Fuente: Sánchez San Román (2019)

Si las extracciones de agua subterránea exceden la recarga y no se equilibran con una mayor recarga y una disminución de la descarga durante varios años, se producirá una disminución a largo plazo de las cargas hidráulicas y el almacenamiento de agua subterránea, lo que conlleva al agotamiento de las aguas subterráneas (Sarah et al. 2021).

Para afrontar este tipo de sucesos es importante la implementación y aplicación de métodos en base a la evaluación de la sobreexplotación, los cuales pueden estar enfocados en base a la recarga, sostenibilidad y disponibilidad. En la tabla 5 se muestra los diferentes métodos y modelos aplicables según su enfoque u objetivo.

Tabla 5: Clasificación métodos-modelos

MÉTODOS	MODELOS
Métodos de evaluación de recarga	WASIM SOM-PCA
Métodos de análisis de sustentabilidad	Modelo automatización de canales AHP SURFER MUSIASSEM

Fuente: Elaboración propia

Así mismo, en relación con la tabla 5, se definen a continuación ciertos métodos del estudio, en la categoría modelos, podemos definir los siguientes:

El Modelo de simulación de balance de agua (WaSIM) es una herramienta de modelo de balance hídrico aplicada en computadora, realiza una simulación diaria entre comportamiento agua/salinidad a partir de actividades o prácticas de gestión del agua ejecutadas (Hess and Counsell 2000), este modelo permite modelar diferentes tipos de cultivos sectorizados por lotes. En la evaluación preliminar para el valle de Ica, el modelo WaSIM fue parametrizado para evaluar la necesidad de riego anual de 15 cultivos seleccionados en base a encuestas agrícolas (Salmoral et al. 2020).

Mapa autoorganizado (SOM) herramienta de algoritmos que agrupa, analiza y procesa un conjunto de base de datos en periodo de meses, este selecciona variables en común normalizándolos para evitar su comparación, luego se integra a un vector de una matriz de datos para darle forma a mapas bidimensionales ordenados (Kalteh, Hjorth and Berndtsson 2008).

Automatización de canales, mediante este modelo hidrodinámico de los canales principales, es posible una evaluación del potencial en la mejora del desempeño en la gestión operativa efectuada en el canal, donde se busca superar el problema de sobreexplotación de las aguas contenidas en los acuíferos (Hashemy Shahdany et al. 2018).

Mediante una evaluación espacio-temporal, se logra analizar los impactos de iniciativas recientes para conservar agua sobre el agotamiento de agua de los acuíferos (Sidhu, Sharda and Singh 2021).

MAR (recarga manejada de acuíferos), proporciona un medio para reciclar aguas pluviales urbanas infrautilizadas y aguas residuales tratadas para maximizar su potencial de recursos hídricos y minimizar cualquier efecto perjudicial asociado con su eliminación. MAR se puede utilizar en combinación con otros enfoques de gestión sostenible del agua urbana, como el reciclaje de aguas residuales, la recolección de aguas pluviales, la intrusión de aguas subterráneas salinas y la gestión y mitigación de inundaciones. Es importante destacar que MAR tiene un papel de apoyo vital en el logro de los objetivos para el diseño urbano sensible al agua, la gestión integrada del ciclo del agua, las mejores prácticas de gestión, los sistemas de drenaje sostenibles, el desarrollo de bajo impacto y la infraestructura verde al proporcionar la capacidad de almacenamiento de gran volumen de agua en áreas urbanas (Page et al. 2018).

En método de prueba piloto de recarga artificial el autor Humberto et al. (2017) expuso la prueba de 10 años de un piloto de recarga mediante el diseño y aplicación de estanques de infiltración. En primer lugar, se caracteriza en área fisicoquímica y bacteriológico, para luego evaluar propiedades hidrogeológicas, así como el proceso dentro de los estanques.

Almacenamiento y recuperación de acuíferos (ASR), método directo del subsuelo que se define como almacenamiento y recuperación de agua en un acuífero por medio de un pozo adecuándose a su necesidad. Para una eficiente recarga artificial de agua subterránea es preciso el análisis de los sitios potenciales de recarga, por lo que Ahani Amineh, Hashemian and Magholi (2017) utiliza el sistema de información geográfica (SIG) como una herramienta que puede proporcionar estos datos, además reduce el tiempo y los costos para la selección de sitios adecuados. El enfoque de mapeo de la idoneidad de los sitios de recarga se perfecciona incluyendo la toma de decisiones de criterios múltiples (MCDM), definido como una combinación de análisis espacial y métodos de evaluación multicriterio, uno de los más eficientes que se aplica según Ahani Amineh, Hashemian and Magholi (2017),

es el Analytic Hierarchy Process-AHP implementación que facilitaría la optimización de los sitios de recarga.

El método fluctuación del nivel freático (WTF), se basa en los distintos cambios en los niveles de agua subterránea en diferentes temporadas de lluvia y sequía, es decir, la elevación del nivel freático debido a lluvias anteriores, el método WTF vincula el cambio en el almacenamiento de agua subterránea con las fluctuaciones resultantes del nivel freático, es decir, el rendimiento específico en un acuífero no confinado, estudio modelado con el software SURFER utilizada principalmente para identificar la dirección del flujo de agua (Prasad and Rao 2018).

Los índices de precipitación para una recarga natural se indaga los índices, de la fuente principal de recarga, la lluvia del que se realiza representaciones características. Se evalúan tres índices: índice de precipitación, índice de recarga e índice de proceso de recarga (Chen et al. 2021).

El modelo DPSIR, es un enfoque útil para desarrollar un modelo racional para evaluar y monitorear la sostenibilidad de los recursos hídricos a lo largo del tiempo, particularmente porque identifica los problemas de sostenibilidad de los acuíferos, por lo tanto, puede mejorar el desempeño de la evaluación de sostenibilidad del agua subterránea, identifica y desarrolla indicadores en el campo de las aguas subterráneas cuales consta de cinco indicadores. Modelo que permite integrar los sistemas considerados, de manera que se evalúan las cuestiones ambientales tales como fuente del problema y sus consecuencias (Jia et al. 2019).

La herramienta MUSIASSEM, integra información cuantitativa de acuerdo a diferentes dimensiones y análisis de sostenibilidad para analizar impactos los aspectos del desarrollo sostenible tales como impactos ambientales, económicos y sociales. Uno de sus objetivos cumple la caracterización de los metabolismos en sistemas socioeconómicos, la interrelación con el ecosistema y para evaluar la viabilidad y factibilidad de escenarios (Schwarz and Mathijs 2017).

En el método de evaluación multicriterio, para el uso del agua del riego, se utilizó indicadores de acuerdo al sistema de cultivos, así como datos que se resolvieron mediante el método WASIM lo cual nos permite evaluar la sostenibilidad a largo plazo, calculando la productividad económica del agua para cada zona geográfica

considerando además la renovabilidad de los recursos hídricos (Salmoral et al. 2020).

En concreto, se visualiza que existen diferentes métodos que evalúan la sobreexplotación en base a parámetros, en si existen infinidad de métodos que evalúan estas categorías, cada autor con su propia metodología, puesto que se espera cada vez más, sean más los involucrados en poner en práctica estos métodos en función al suministro y almacenamiento sostenible en el tiempo de las aguas subterráneas.

III. METODOLOGÍA

3.1 Tipo y diseño de investigación

La Investigación básica, también llamada investigación pura, en este tipo de investigación no se resuelve ningún problema inmediato, más bien, sirven de base teórica para otros tipos de investigación. Se pueden plantear tesis con alcances exploratorios, descriptivos o hasta correlaciones (Luis and Gonzáles 2021).

El presente proyecto de investigación es de tipo básico, con la finalidad de obtener conocimientos de base científica sobre la sobreexplotación de los recursos hídricos subterráneos, así como conocer los métodos que se aplican en el estudio y la evaluación de las aguas subterráneas en base a parámetros, enfocados principalmente en la disminución de los recursos hídricos subterráneos.

Por otro lado, el diseño de investigación es cualitativo, por su enfoque en el conocimiento de una metodología donde la embarcación de datos es amplia, sigue un diseño de investigación flexible, proporcionando un enfoque global humanística, considerando todas las perspectivas (Fundación Unamuno 2020).

Esta investigación es de enfoque cualitativo porque analizamos conocimientos científicos de los autores sobre la crisis ambiental que enfrenta el agua subterránea, así como métodos que evalúan el criterio de explotación, vulnerabilidad y sostenibilidad. Y narrativa de tópicos, ya que, la recopilación de todas las investigaciones fueron descripciones de lo ejecutado en la evaluación de las aguas subterráneas por medio de métodos.

3.2 Categorías, subcategorías y matriz de categorización apriorística

Tabla 6: Matriz de categorización apriorística

Objetivos específicos	Problemas específicos	Categoría	Subcategoría	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3
Identificar las características principales que presentan los métodos que evalúan la sobreexplotación de aguas subterráneas en zonas áridas	¿Cuáles son las características más importantes que presentan los métodos que evalúan la sobreexplotación de aguas subterráneas en zonas áridas?	Características de los métodos	Enfoque	Método	Simulador / herramienta	Objetivo
Analizar los parámetros que emplearon los métodos para la evaluación de la sobreexplotación de aguas subterráneas en zonas áridas	¿Cuáles son los parámetros más requeridos de acuerdo con el problema para la evaluación de la sobreexplotación de aguas subterráneas en zonas áridas?	Parámetros de métodos	Problema	Descripción	Parámetro	Datos
Evaluar los criterios principales que utilizaron los métodos para evaluar una situación de recarga frente a la sobreexplotación de las aguas subterráneas en zonas áridas	¿Cuáles son los criterios principales que usaron los métodos para evaluar la recarga frente a la sobreexplotación de aguas subterráneas en zonas áridas?	Estimación de Recarga	Criterios principales	De acuerdo con la evaluación del lugar	De acuerdo con su estimación	De acuerdo con su impacto

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 6, se presentó la matriz de categorización apriorística, dividida en ocho casillas, las cuales explicaron brevemente los objetivos y problemas específicos, y estos se expresaron con el apoyo de las categorías y subcategorías siendo ordenados, en una serie de criterios que se llevó a cabo.

3.3 Escenario de estudio

Según Hugo Sánchez et al. (2018) define el escenario de estudio como aquel sitio o lugar natural donde ocurren y se estudian los hechos.

En este proyecto de investigación, el escenario de estudio está basado en las características geográficas de ubicación de los diferentes tipos de acuíferos principalmente en zonas costeras (áridas, semiáridas) del mundo.

Dichas zonas estuvieron siendo influenciadas por el cambio climático causante de la reducción de la recarga de los acuíferos y la extracción excesiva de las aguas subterráneas, factores que determinan el estudio.

3.4 Participantes

Para esta investigación, se buscó información en las siguientes revistas electrónicas: Journal of Hydrology, Groundwater for Sustainable Development, Journal of Cleaner Production, Energy Procedia, Science of The Total Environment, Water Science and Engineering, Journal of Hydrology, Journal of Hydrology: Regional Studies y Agricultural Water Management.

Los repositorios digitales y base de datos donde se buscó la información, fueron los siguientes: ScienceDirect, Scholar Google, Hidrología, Hidrogeología–USAL, Onion Services, DuckDuckGo, CONCYTEC, Dialnet, Springer y Repositorio Nacional Digital de Acceso Libre (ALICIA).

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Las técnicas son procedimientos, acciones de habilidades expresados con un objetivo de expresar una actividad, en el ser humano la técnica se construye de la interrelación de su expresividad con el medio que lo rodea (Luis and Gonzáles 2020).

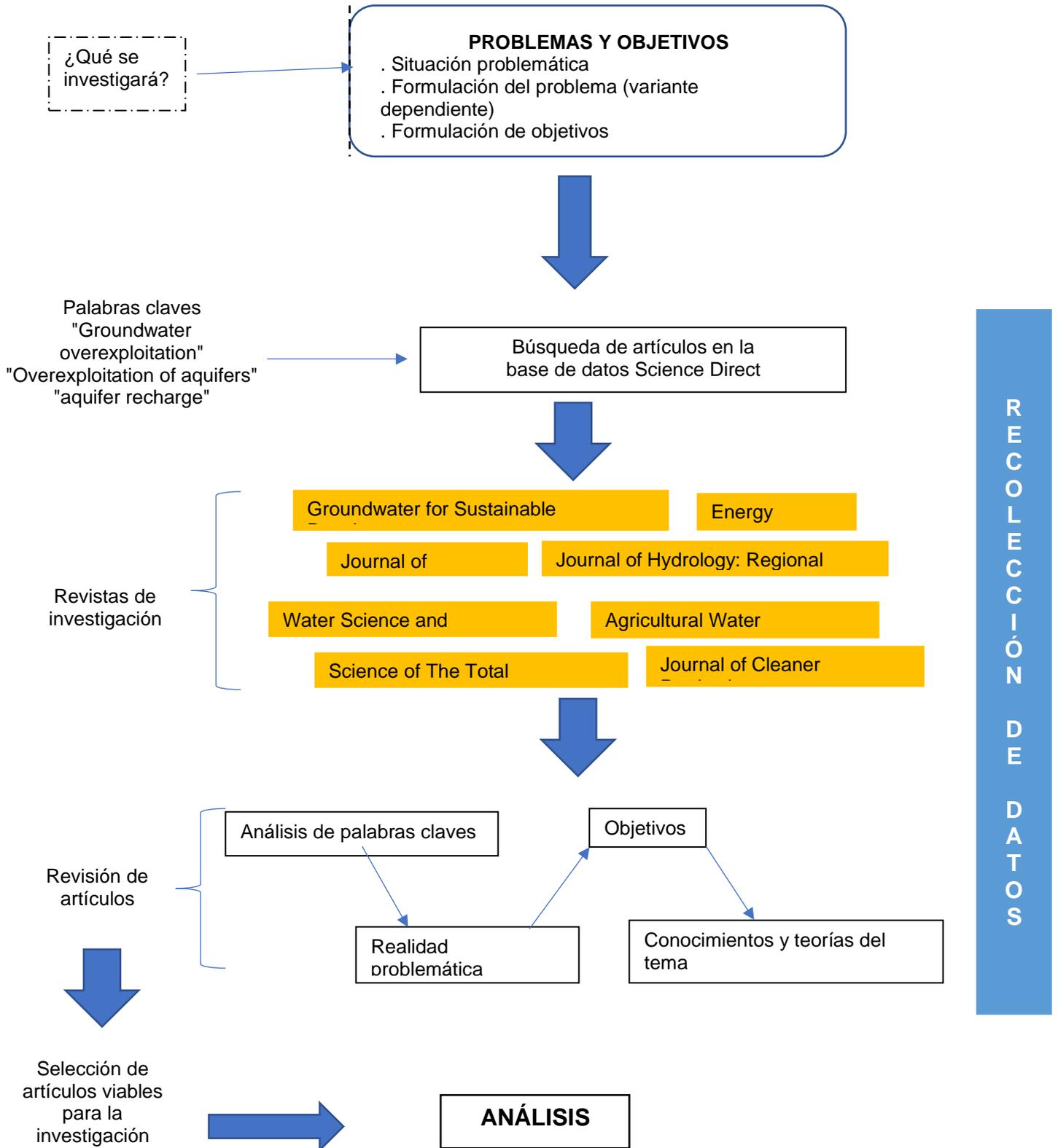
El análisis documental, se denomina como un método de revisión de documentos de interés, por medio de ello, se obtiene datos que se consideren relevantes para la investigación. Mediante la síntesis del contenido del documento se agrupa la información de acuerdo al punto de vista que se enfoque el investigador Hugo Sánchez et al. (2018). En este caso, el artículo será el punto principal que le permitirá al investigador acceder a los datos y le permitirá visualizar los resultados para concluir el estudio (Luis and Gonzáles 2020).

Aplicando esta técnica se comprendió la búsqueda en diferentes artículos científicos, repositorios digitales, enciclopedia en línea, libros digitales, base de datos terminológicos para luego redactar una síntesis de cada artículo, comprendiendo los métodos de evaluación del problema que utilizó cada autor (Zevallos Pitzuha 2020).

Instrumentos de recolección de datos, según el punto de vista conceptual de Hugo Sánchez et al. (2018) es una herramienta que registra los datos o información, esta forma parte de una técnica de recopilación de datos. La conforman las guías de observación de campo, entrevista, un manual, entrevista, lista de cotejo, cuestionario o test. El proyecto de investigación utiliza la ficha de registro de datos como instrumento fundamental con respecto a la técnica de recolección escogido.

3.6 Procedimiento

Figura 1: Recolección de datos



Fuente: Elaboración propia

Como palabra clave de búsqueda consideramos “Groundwater”, “groundwater scarcity”, “groundwater depletion”, en la base de datos ScienceDirect. Era importante especificar que los artículos sean de los últimos cinco años, al considerar esto, el resultado de la búsqueda es de más interés debido a la novedad y a la información actualizada. Al ser un tema amplio y abarcar distintos factores en ella, ya que el enfoque era mayormente era calidad, consideramos las palabras claves “aquifer recharge”, “aquifer evaluation”, “groundwater overexploitation” para lograr coleccionar artículos potenciales de acuerdo al objetivo. Por último, interpretaremos la información recopilada de la investigación y agrupamos las palabras claves, de los artículos escogidos, acorde a su similitud.

3.7 Rigor científico

El rigor científico implica una disciplina en la conducta y ética durante el transcurso de la investigación en busca de generar transparencia en el estudio y detallar en sus resultados (Hugo Sánchez et al. 2018).

El NIH define el rigor científico como " la aplicación estricta del método científico para garantizar un diseño experimental, una metodología, un análisis, una interpretación y un informe de los resultados sólidos e imparciales" (Hofseth 2018).

Un método que convalida la autenticidad de la investigación es la redacción de distintos documentos que abarcan un tema en común, esta combinación de estudios proporciona una riqueza de datos recolectados. Así mismo el contar con distintos autores que plantean sus perspectivas en sus investigaciones, lo que permite al investigador interpretar variadamente los datos y luego llegar al consenso desarrollando un enfoque más exquisito. Además, proporciona la oportunidad que los aspectos que no hayan sido tomados con relevancia por parte de los autores, sean captados por los investigadores (FitzPatrick 2019).

La credibilidad de una investigación consiste en la práctica de la honestidad y transparencia, informes de cómo se identificaron y abordaron la investigación

y acerca de posibles factores de confusión que se presentaron durante el proceso del estudio. Estos factores de confusión pueden abarcar experiencias pasadas del investigador, conexiones con la teoría de fondo, acceso a la población de estudio y fuentes de financiación (Johnson, Adkins and Chauvin 2019).

En cuanto a la transferibilidad se transmite a través de la descripción de muestreo tales como: ubicación geográfica del estudio, número y características de los participantes, y el marco temporal de la recopilación y el análisis de datos. Estos aportan también a la credibilidad de los resultados y determinación de transferencia de los lectores.

Para garantizar la confiabilidad, el método de investigación debe informarse en detalle de manera que el lector pueda determinar las prácticas de investigación adecuadas. han sido seguidos y que los futuros investigadores pueden repetir el estudio.

La conformabilidad de los resultados se aplica mediante un rigor científico como: la verificación de miembros, triangulación o la revisión de pares, donde el investigador explica su influencia en el resultado.

Considerando el enfoque cualitativo de la investigación donde la recopilación de datos se realiza en paralelo a su análisis. Los estándares de rigor se utilizan comúnmente para garantizar la confiabilidad y la integridad dentro del análisis de datos.

3.8 Método de análisis de datos

En la investigación nos basamos en el uso de categorías con relación a los criterios redactados en la tabla N°6, matriz de categorización apriorística, para analizar los datos recopilados.

Se identificaron tres categorías, con respecto a la primera categoría, características importantes, los métodos investigados se evalúan de acuerdo con la subcategoría, enfoque, respaldada por los tres criterios las cuales fueron, método, simulador/herramienta y objetivo, de acuerdo con estas características, se permitirá el desarrollo del método.

Como segunda categoría parámetros de métodos, de la misma forma los métodos estarán evaluados de acuerdo con la subcategoría, problema, con sus respectivos criterios de sustento, descripción, parámetro y datos. Con este análisis se logrará entender los parámetros que desarrolla cada método en función a la problemática.

Y por último la categoría, estimación de recarga, los métodos están enfocados de acuerdo con la relación criterios principales como subcategoría, de acuerdo con los criterios, de acuerdo con la evaluación del lugar, de acuerdo con su estimación y de acuerdo con su impacto.

3.9 Aspectos éticos

La práctica de la ética, y del rigor científico en la investigación con un fin de asegurar la autenticidad de la información.

El principio de justicia se basa en el la oportunidad de igualdad entre todos los investigadores, así ningún integrante del grupo queda excluido de la investigación (Farrugia 2019).

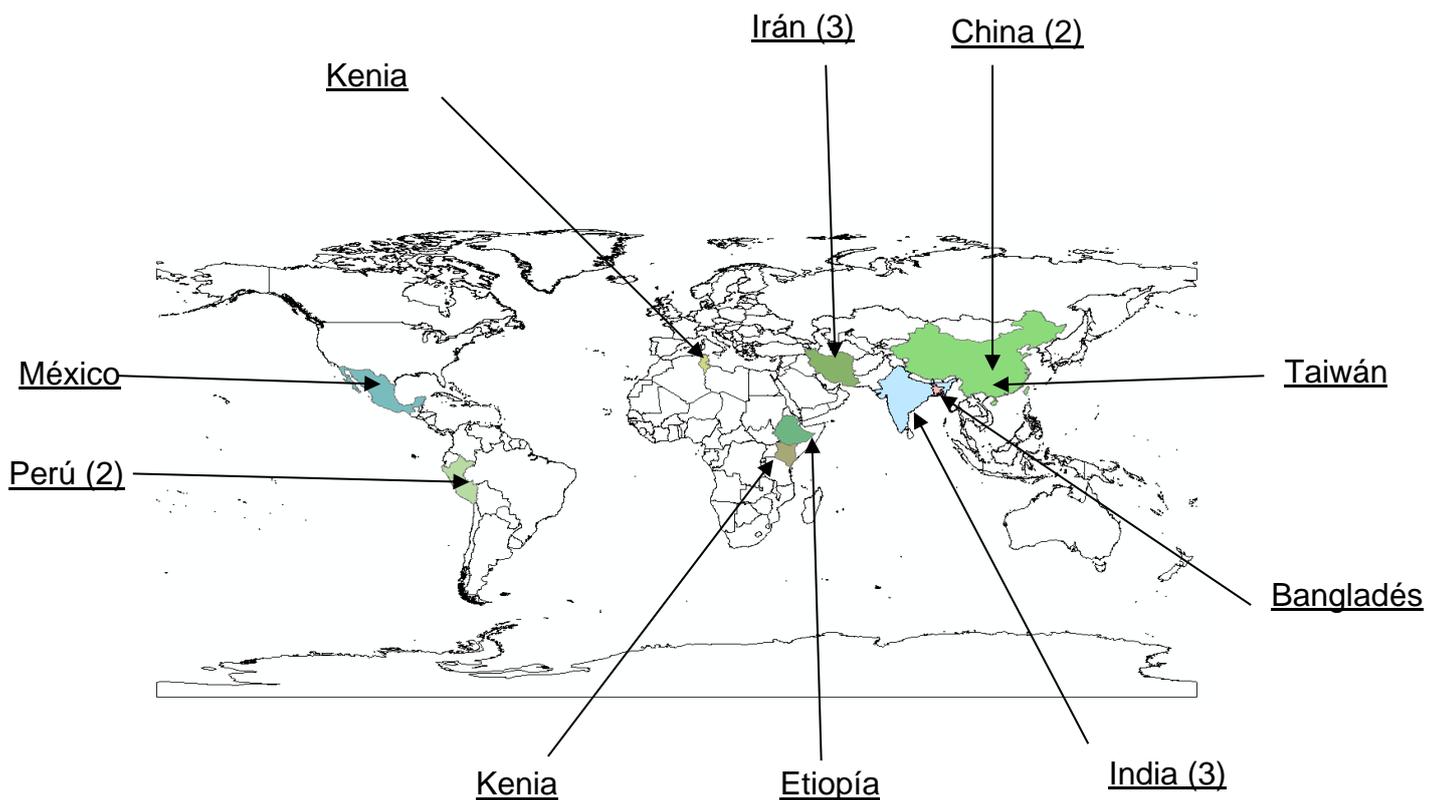
La información relevante recolectada de los artículos ha sido citada debidamente de acuerdo a la norma ISO 690-2, garantizando un reconocimiento formal a los autores de quienes se sustrajo información científica.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente estudio, se analizaron en un total de 53 artículos científicos en función a la investigación, sin embargo, tras el análisis de cada uno de ellos se fueron depurando o separando aquellos que no coincidían con el objetivo de la investigación y por ser no relevantes en el estudio. Fueron solo 16 los aptos a pasar ser parte de la investigación. Así mismo los diferentes artículos fueron clasificados y analizados en función a tres categorías:

Dichos estudios, estuvieron realizados en 10 países diferentes, en la figura 2 se representa su ubicación grafica.

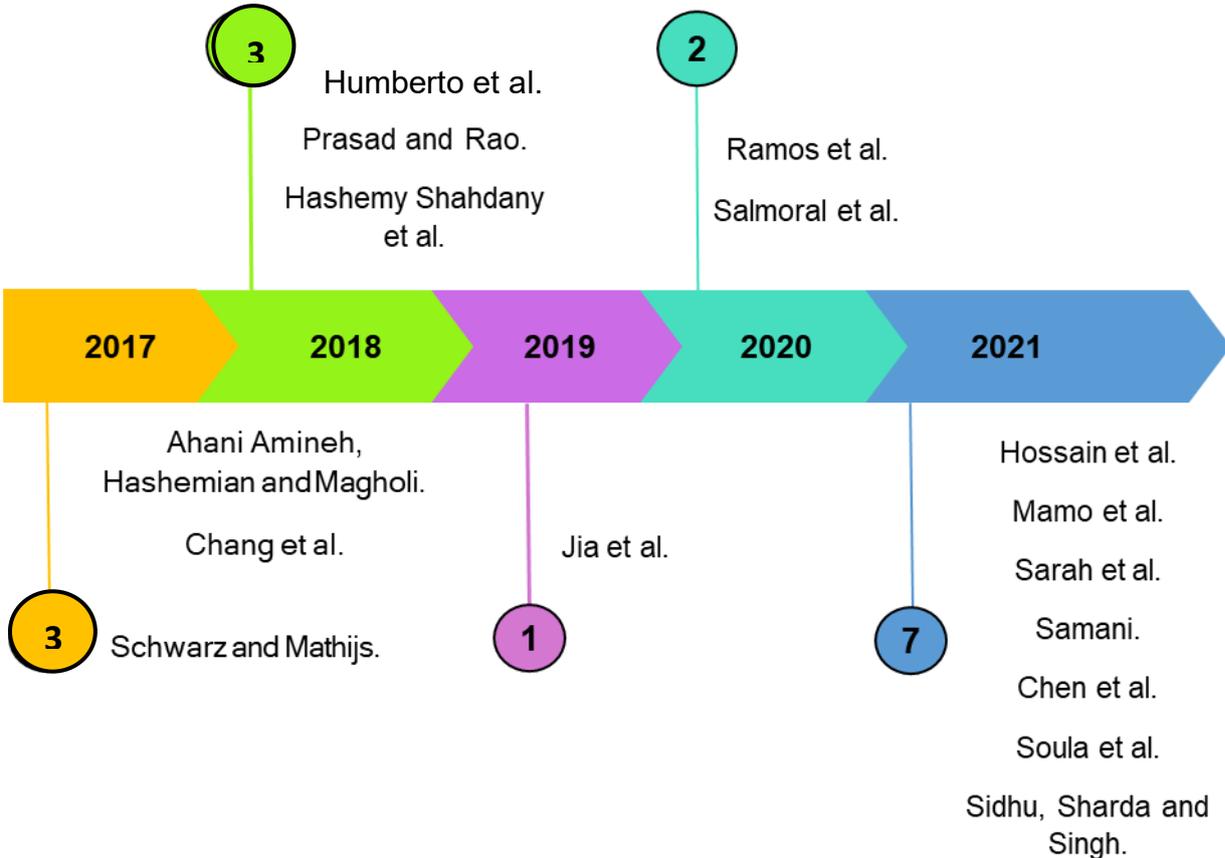
Figura 2: Mapa de países donde se desarrollaron las investigaciones.



Fuente: Elaboración propia

Así mismo, los estudios de análisis de las aguas subterráneas fueron desarrollados en un tiempo determinado, específicamente alineados en los últimos cinco años de desarrollo. En la figura 3 se representa este aspecto.

Figura 3: Línea de tiempo del desarrollo de las investigaciones.



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la figura 3, se contempla la frecuencia del año que tienen las investigaciones, se identificaron que dos artículos se publicaron en el año 2020, solo un artículo se publicó en el año 2019, tres artículos se publicaron en los años 2017 y 2018 cada uno, la mayor cantidad de artículos fueron publicados en el año 2021 los cuales fueron siete. Por otro lado, en la figura 3 también se detalla a los autores según los años de sus publicaciones respectivamente.

En la tabla 7, se muestra las diferentes características principales que determinan a cada método, se detalla como primera característica el enfoque, determinado en dos categorías las cuales son sostenibilidad y recarga, como segunda característica se tiene en cuenta simulador o herramienta de ayuda y como ultima característica, el objetivo, en relación a cada estudio, la tabla está desarrollada en relación a la identificación detallada de un método antes de su aplicabilidad y la determinación del enfoque u objetivo.

Tabla 7: Características específicas de los métodos

N°	AUTOR	AÑO	ENFOQUE DE LOS MÉTODOS	MÉTODO	SIMULADOR / HERRAMIENTA	OBJETIVO EN RELACIÓN CON EL ESTUDIO
1	Sarah et al.	2021	Enfoque sostenibilidad	Flujo de agua subterránea	- MODFLOW	Cuantificar agotamiento y volumen.
2	Samani	2021	Enfoque sostenibilidad	Análisis DPSIR	- AHP - ENTROPY	Evaluar la sostenibilidad de las AS.
3	Salmoral et al.	2020	Enfoque sostenibilidad	Evaluación multicriterio del uso del agua de riego	- WASIM - Ecuaciones - Landsat	Análisis de tendencias de cultivos de acuerdo al tipo de finca Evaluar el consumo de agua azul.

N°	AUTOR	AÑO	ENFOQUE DE LOS MÉTODOS	MÉTODO	SIMULADOR / HERRAMIENTA	OBJETIVO EN RELACIÓN CON EL ESTUDIO
4	Schwarz and Mathijs	2017	Enfoque sostenibilidad	MUSIASSEM	- Ecuación de variables de cultivo	Analizar las interacciones entre los socioeconómicos agrícola y el uso de recursos de aguas subterráneas.
5	Chang et al.	2017	Enfoque sostenibilidad	PCA	- SOM - GIS (kriging)	Evaluar respuestas de las aguas subterráneas de acuerdo al flujo en zonas.
6	Chen et al.	2021	Estimación de recarga	Cuantificar características de recarga	- Ecuaciones de recarga - SIG (QGIS)	Determinar las características de la recarga de acuerdo a la zonificación.
7	Soula et al.	2021	Enfoque sostenibilidad	Examen a profundidad de datos	- ASTER-GDEM - Teledetección ERDAS Imagine Software	Analizar los datos hidrológicos y la yuxtaposición del modelo de gestión del acuífero.

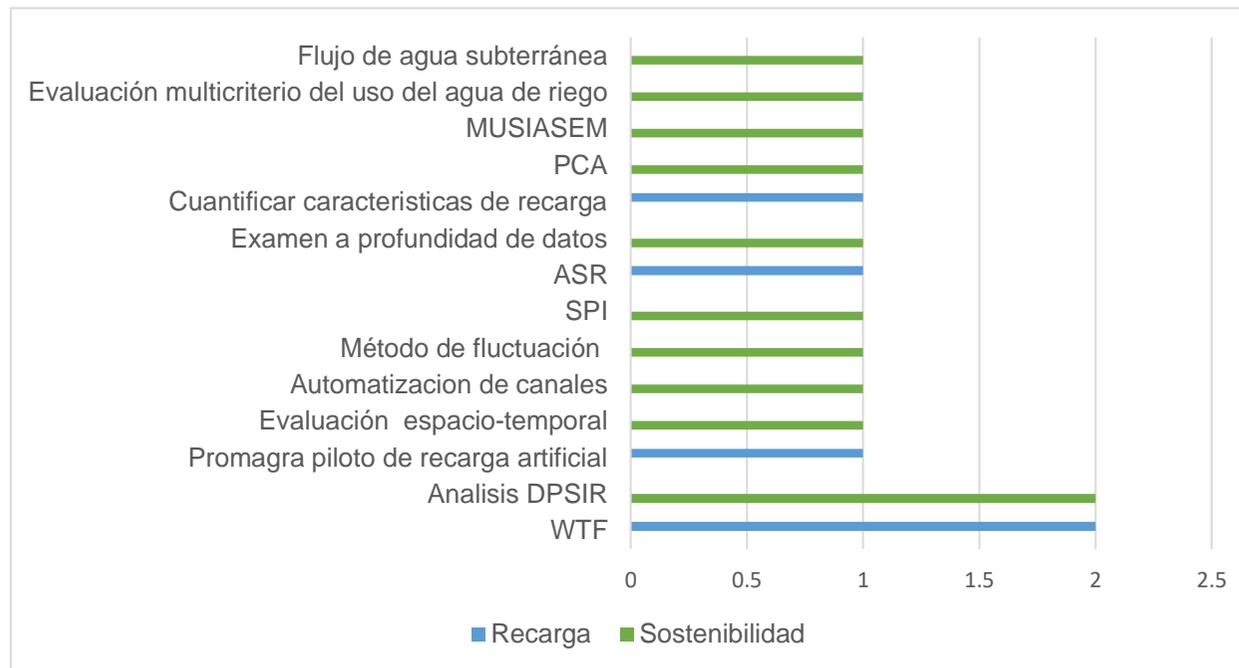
N°	AUTOR	AÑO	ENFOQUE DE LOS MÉTODOS	MÉTODO	SIMULADOR / HERRAMIENTA	OBJETIVO EN RELACIÓN CON EL ESTUDIO
8	Ahani Amineh, Hashemian and Magholi	2017	Enfoque de recarga	ASR	- SIG (ArcMap) - IDW	Evaluar la idoneidad de sitios para ASR.
9	Prasad and Rao	2018	Estimación de recarga	WTF	- SURFER - MODFLOW-2005	Evaluar las AS existentes y la etapa de desarrollo.
10	Ramos et al.	2020	Enfoque sostenibilidad	SPI Flujo de agua subterránea	- CHD - WELL - RIV - DRAIN - HFB	Evaluar las implicaciones de la variabilidad climática en la recarga.
11	Hossain et al	2021	Enfoque de recarga	VIC RIFM WTFM	- LUCC (SOB) - Landsat-5 _TM - Landsat-8 (OLI, TIRS)	Comprender los procesos de recarga.

N°	AUTOR	AÑO	ENFOQUE DE LOS MÉTODOS	MÉTODO	SIMULADOR / HERRAMIENTA	OBJETIVO EN RELACIÓN CON EL ESTUDIO
12	Mamo et al.	2021	Enfoque sostenibilidad	Método de fluctuación	- MODFLOW-2005 - (GHB)	Evaluar impactos futuros en la extracción, recarga, disponibilidad de AS y la interacción de las aguas superficial y subterránea.
13	Hashemy Shahdany et al	2018	Enfoque sostenibilidad	Automatización de canales	- Modelo hidrodinámico de canales principales	Evaluar la capacidad de las técnicas de automatización de canales.
14	Jia	2019	Enfoque sostenibilidad	Análisis DPSIR	- ARCGIS	Desarrollar una herramienta de evaluación de la sostenibilidad del agua subterránea (GSA) en escala nacional.
15	Sidhu, Sharda and Singh	2021	Enfoque sostenibilidad	Evaluación espacio-temporal	- FAO56-PM - CROPWAT 8.0 - ARCGIS	Cuantifica impactos de las iniciativas recientes de conservación.

N°	AUTOR	AÑO	ENFOQUE DE LOS MÉTODOS	MÉTODO	SIMULADOR / HERRAMIENTA	OBJETIVO EN RELACIÓN CON EL ESTUDIO
16	Humberto et al.	2018	Estimación de recarga	Programa piloto de recarga artificial	- NO CUENTA	Demostrar que el piloto de recarga con agua regenerada ayuda a ´reservar los recursos hídricos durante 10 años.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4: Análisis de métodos según su enfoque.



Fuente: Elaboración propia.

El análisis del estudio del enfoque, como característica de valor importante se evalúa en la figura 4, se puede recabar que la mayoría de artículos con un total de trece de ellos están enfocados en la sostenibilidad, es decir mayoritariamente el estudio de las aguas subterráneas se inclinan más a soluciones en un enfoque de sostenibilidad con relación a la problemática, logrando la gestión sostenible de las aguas subterráneas.

En el estudio de Sarah et al. (2021), fue realizado en la cuenca Maheshwaran, ya que esta región estaba experimentando una disminución alarmante de los recursos hídricos de agua subterránea y contaminación por fluoruro, afirma que el estudio de la hidrodinámica y la concentración de contaminantes proporciona un estudio importante sobre el manejo eficiente de los recursos hídricos subterráneos en cuencas sobreexplotadas que sufren contaminación. Este enfoque también coincide con el estudio de investigación de Mamo et al. (2021), en donde señala que, tras el estudio de la evaluación de los impactos del aumento futuro en la extracción, disponibilidad y recarga, concluyendo a la implementación de medidas de gestión de aguas subterráneas para mitigar los impactos.

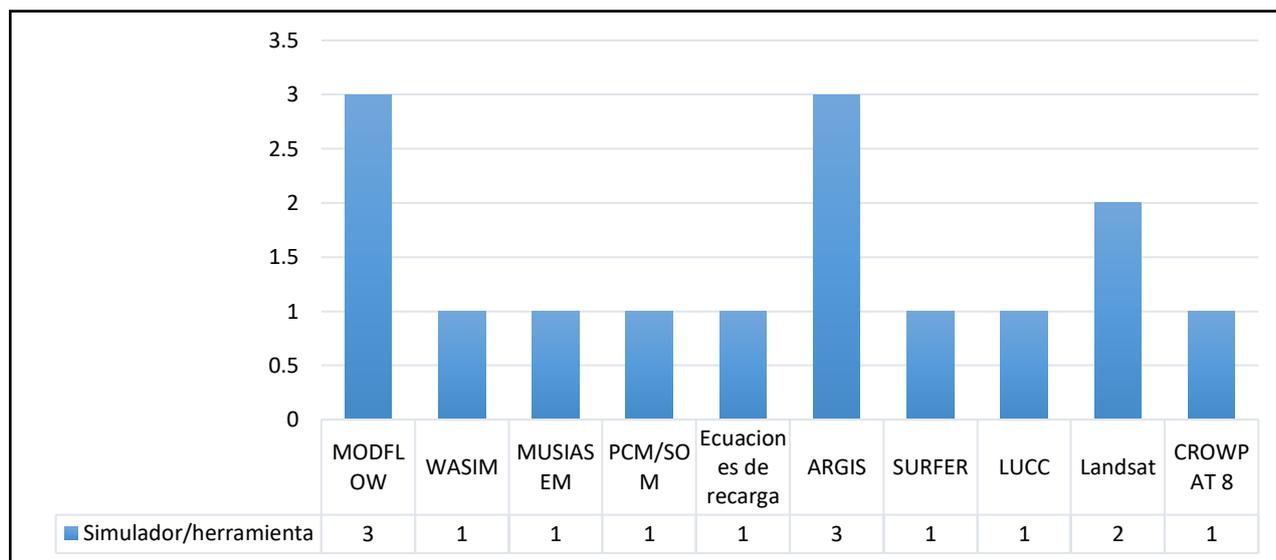
Así mismo se ve la relación entre enfoque y método más implementado o usado de acuerdo con el estudio de los artículos estudiados en la investigación, siendo los más usados, WTF y DPSIR.

El método WTF, para el estudio de Prasad and Rao (2018), ayuda a comprender las condiciones de agotamiento y recarga de un acuífero, considerada como uno de los métodos más usados tradicionalmente para estimar la recarga de aguas subterráneas.

El método causal DPSIR, basado en la interacción de actividades humanas con su entorno ambiental, se considera un punto de partida para la iniciativa de toma de decisiones, mediante los indicadores que se adaptan al marco. Fuerza-presión, estado, impactos y respuestas - DPSIR de eso trata las categorías de análisis, el más completo relacionado a desarrollo sostenible ya que en ella desarrollan indicadores relacionados a modernización, producción de alimentos, proveedor de energía, cambio de condición ambiental, presión a la cantidad de agua subterránea,

presión sobre la calidad del agua subterránea, cantidad de agua subterránea, calidad de agua subterránea, geo-peligros, riesgo para la salud humana, impacto en el sistema de producción, gestión, operación. Una serie de ecuaciones permitió la ponderación entre categorías, analizando la sostenibilidad con el desarrollo.

Figura 5: Análisis de los métodos según simulador/herramienta.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5, se muestra la relación de característica, simulador/herramienta, se llega a deducir que el simulador o modelo más requerido en la aplicación de un método es ArcGIS (SIG) con un respaldo de cinco artículos de investigación, como segundo simulador más requerido es MODFLOW con tres estudios que consideraron como herramienta de ayuda en cada investigación.

Así mismo, la herramienta Landsat en sus versiones 5 y 8 fue requerida mayoritariamente por dos métodos, tomado como consideración en dos de los artículos de investigación.

Se identifica principalmente en los artículos de investigación, el uso de ArcGIS (SIG) para la elaboración de mapas de zonificación los cuales los fueron Jia et al. (2019); Chen et al. (2021); Chang et al. (2017); Ahani Amineh, Hashemian and Magholi (2017). Según Ahani Amineh, Hashemian and Magholi (2017), considera al sistema de información geográfica (SIG), como una de las herramientas con grandes capacidades para el cumplimiento de su objetivo como el de la identificación de sitios adecuados para recarga, porque afirma que reduce el tiempo

y el costo para la selección de sitios, así como proporciona un banco de datos digitales para un futuro programa de monitoreo y la producción de mapas de idoneidad.

Según en los trabajos de Ramos et al. (2020); Mamo et al. (2021); Sarah et al. (2021) utilizaron como simulador al modelador MODFLOW, en el estudio de Sarah et al. (2021), utiliza el software visual MODFLOW Flex, para el modelado de la cuenca hidrográfica de Maheshwaran, lo que utilizo para construir un modelo conceptual de la cuenca que luego realizar el modelado numérico utilizando MODFLOW esto le permitió hallar diversos parámetros para su estudio como la conductividad hidráulica, MODFLOW cuenta con una gama de paquetes que el investigador puede o no usarlo si así lo desea, en este estudio no hacen el uso de estos paquetes complementarios.

En el trabajo de Ramos et al. (2020), el modelo de flujo de agua subterránea ha sido construido utilizando el paquete MODFLOW-2005 y la interfaz gráfica ModelMuse, MODFLOW es un código 3D que resuelve el método de diferencias finitas e incluye módulos para simular el flujo de agua subterránea en estado estable o transitorio, en su trabajo se usó los siguientes paquetes: el paquete pozo (WEL) simula efecto de un pozo, DRAIN y RIV. Para la investigación de Mamo et al. (2021), solo hizo uso de dos paquetes complementarios, límite de cabeza general (GHB) y RIV para el modelado de ríos.

Tabla 8: Herramientas y simuladores

IMÁGENES SATELITALES	SOFTWARE TELEDETECCIÓN	SIMULADORES HIDROLÓGICOS	MODELOS
- Landsat - ASTER- GDEM - LUCC	- ERDAS - QGIS - ARCGIS - SURFER	- SOM - MODFLOW (CHD, WELL, RIV, DRAIN, HFB, GHB, WASIM, CROPWAT)	- Modelo hidrodinámico de canales principales - AHP

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 8, ordenamos las herramientas y modelos que utilizaron los métodos, categorizamos estas para vincular las herramientas de acuerdo a los cuatro criterios que establecimos.

Seguidamente, se presenta la tabla 9, donde se evalúa el parámetro que utiliza los diferentes métodos o ecuación, así mismo se visualiza un rubro de datos como la identificación de datos preliminares que requiera un método.

Tabla 9: Evaluación de parámetros según la problemática.

N°	AUTOR	AÑO	DESCRIPCIÓN	PROBLEMA	DATOS	PARÁMETRO HALLADO
1	Sarah et al.	2021	Estimación de agotamiento Volumen Cambio de almacenamiento	Reducción del nivel freático subterráneo	<ul style="list-style-type: none"> - Evapotranspiración - Precipitación - Nivel freático - IRF - Rango de recarga - Área geográfica 	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad de almacenamiento - Volumen de AS contaminada - Perdida de AS virtual
2	Samani	2021	Simulación del modelo	Inestable disponibilidad a largo plazo de aguas subterráneas	<ul style="list-style-type: none"> - Área geográfica de la cuenca - Disminución del nivel freático 	<ul style="list-style-type: none"> - Valores de sustentabilidad - Índice integrado de gestión sostenible de las AS

N°	AUTOR	AÑO	DESCRIPCIÓN	PROBLEMA	DATOS	PARÁMETRO HALLADO
3	Salmoral et al.	2020	Indicadores de extracción de agua, beneficios económicos e implicaciones a la sostenibilidad.	Extracción de aguas subterráneas a nivel cultivo	<ul style="list-style-type: none"> - Expansión agrícola por cultivo. - Zonas geográficas de acuerdo a granjas pequeñas o grandes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Análisis espacial - Huella Hídrica azul (WF azul) - Índice de sostenibilidad del agua azul (BIWSI) - Ecuación de deuda del agua (WD agua subterránea)
4	Schwarz and Mathijs	2017	Impacto económico de diferentes escenarios a lo largo del tiempo.	Extracción de aguas subterráneas a nivel cultivo	<ul style="list-style-type: none"> - Datos a nivel de cultivo (por ha) - Uso de la tierra - Valor añadido - Datos de nivel superior (por sector económico) - Uso del agua Labor VAB 	<ul style="list-style-type: none"> - Tasa de uso de agua a nivel cultivo (m3/ h) - Densidad de uso del agua (m3/ ha) - Valor agregado bruto anual
5	Chang et al.	2017	Análisis de regresión entre el flujo hídrico y la zonificación.	Reducción del nivel freático subterráneo	<ul style="list-style-type: none"> - Registros de nivel subterráneos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Nivel relativo de la zonificación de aguas subterráneas

N°	AUTOR	AÑO	DESCRIPCIÓN	PROBLEMA	DATOS	PARÁMETRO HALLADO
6	Chen et al.	2021	Estimaciones en Precipitaciones Recarga.	Inestable disponibilidad de aguas subterráneas	- Precipitación - Recarga - Duración	- Intensidad de lluvia - Coeficiente de recarga - Cantidad Anual de recarga
7	Soula et al.	2021	Simulación del modelo	Extracción de aguas subterráneas a nivel cultivo	- Clima mediterráneo - Cuencas drenadas - Infraestructura de agua recursos agua	- Uso del agua - Implementación de sistemas de riego - Limitaciones estratégicas - Política de precios
8	Ahani Amineh, Hashemi an and Magholi	2017	Identificación de criterios importantes para la recarga artificial	Reducción del nivel freático subterráneo	- Precipitación - Clima - Análisis hidrogeológico - Etapa de desarrollo	- Compatibilidad de las aguas de origen y subterránea

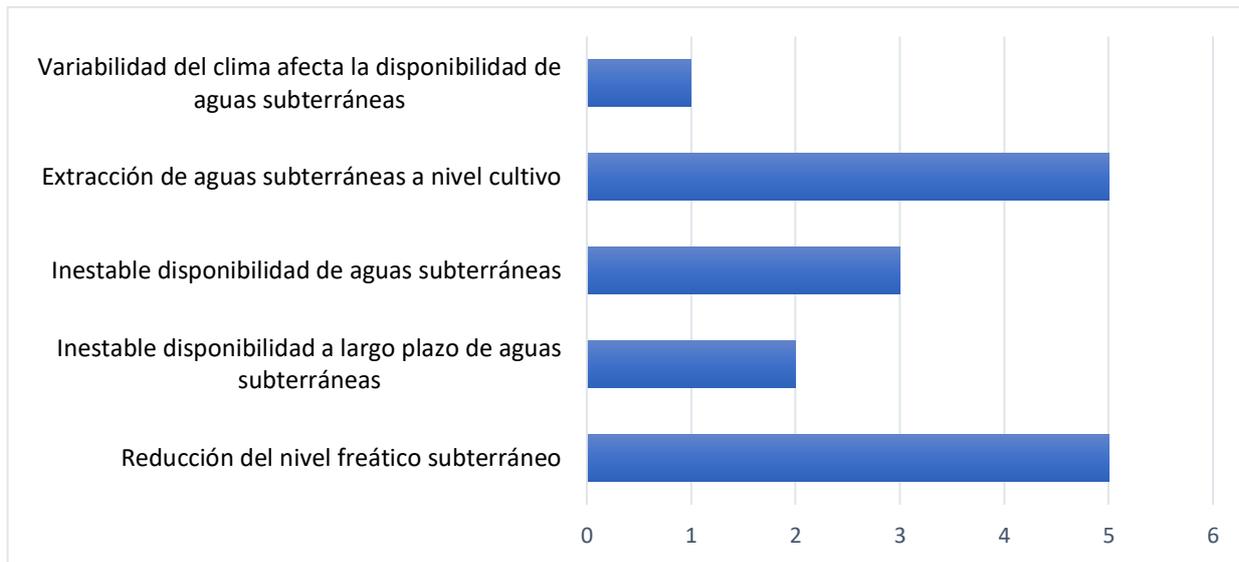
N°	AUTOR	AÑO	DESCRIPCIÓN	PROBLEMA	DATOS	PARÁMETRO HALLADO
9	Prasad and Rao	2018	Recarga anual, extracción y balance de AS y estimación de etapa de desarrollo.	Reducción del nivel freático subterráneo	<ul style="list-style-type: none"> - Disminución del nivel de las AS - Precipitación - Balance de AS - Extracción anual - Etapa de desarrollo 	<ul style="list-style-type: none"> - Etapa de desarrollo - Agotamiento
10	Ramos et al.	2020	Estimación de escenarios futuros	Inestable disponibilidad de aguas subterráneas	<ul style="list-style-type: none"> - Variación de precipitación - Variación de Temperatura - Crecimiento demográfico 	<ul style="list-style-type: none"> - Recarga de precipitación - Escenarios futuros (variabilidad climática, aumento de la extracción) - Volumen extraído
11	Hossain et al	2021	Cambio espacio temporal en el uso del suelo, recarga de lluvia y niveles de AS Recarga de otras fuentes.	Reducción del nivel freático subterráneo	<ul style="list-style-type: none"> - Recarga anual - Precipitación anual 	<ul style="list-style-type: none"> - Etapa de desarrollo - Evapotranspiración - Precipitación - Recarga potencial

N°	AUTOR	AÑO	DESCRIPCIÓN	PROBLEMA	DATOS	PARÁMETRO HALLADO
12	Mamo et al.	2021	Análisis de tendencia de recarga, del escenario, sensibilidad de predicción. Diseño y construcción de maquetas	Variabilidad del clima afecta la disponibilidad de aguas subterráneas	<ul style="list-style-type: none"> - Precipitación media anual - Temperatura - Flujo total de entrada y salida - Transmisividad - Evapotranspiración potencial 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento de abstracción - Disminución de recarga - Reducción de los flujos base de ET y superficiales
13	Hashemy Shahdan y et al	2018	Proceso de alternativas de modelo operativo.	Extracción de aguas subterráneas a nivel cultivo	<ul style="list-style-type: none"> - Riego - Precipitación - Pozos de extracción 	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción extracción - Reducción de KW/h - Reducción de Ca
14	Jia	2019	Evaluación comparativa	Inestable disponibilidad a largo plazo de aguas subterráneas	<ul style="list-style-type: none"> - Categorías de dimensiones de la sociedad - Categorías económicas - Categorías ambientales 	<ul style="list-style-type: none"> - Valores de sustentabilidad - Sensibilidad
15	Sidhu, Sharda	2021	Simulación del modelo	Extracción de aguas subterráneas a nivel cultivo	<ul style="list-style-type: none"> - Superficie - Clima - Lluvia 	<ul style="list-style-type: none"> - Agotamiento del nivel freático - Dirección de flujo de GW

N°	AUTOR	AÑO	DESCRIPCIÓN	PROBLEMA	DATOS	PARÁMETRO HALLADO
16	and Singh Humberto et al.	2018	Estimación de propiedades del proceso	Inestable disponibilidad de aguas subterráneas	- Tipo de suelo - Precipitación - Capacidad del acuífero - Depósitos - Conductividad eléctrica	- Evaluación cambio en la huella hídrica - Capacidad de infiltración - Evolución de calidad del agua - Volumen de recarga

Fuente: Elaboración propia

Figura 6: Incidencia de la problemática recurso hídrico subterráneo.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 6, consideramos la problemática, que mediante la implementación de estos parámetros se buscan solucionar, una incidencia en calidad y cantidad a largo plazo del recurso hídrico junto con intensidad de riego conllevan a 3 artículos cada uno, explicando en factor de intensidad de riego se ha evidenciado con la creciente demanda de agua en los cultivos, creciente expansión agrícola, que aún considerando un sistema de riego por goteo óptimo, este no genera una recarga potencial al acuífero.

Por otra parte, considerando también el tiempo en clima seco, Sidhu, Sharda and Singh (2021) analiza el cambio de calendario de cultivos, donde en el caso de la siembra de arroz en Punjab esta prohibido realizarla antes del 10 de mayo y transplantarlo antes del 10 de junio ya que la tasa de evapotranspiración es la más alta.

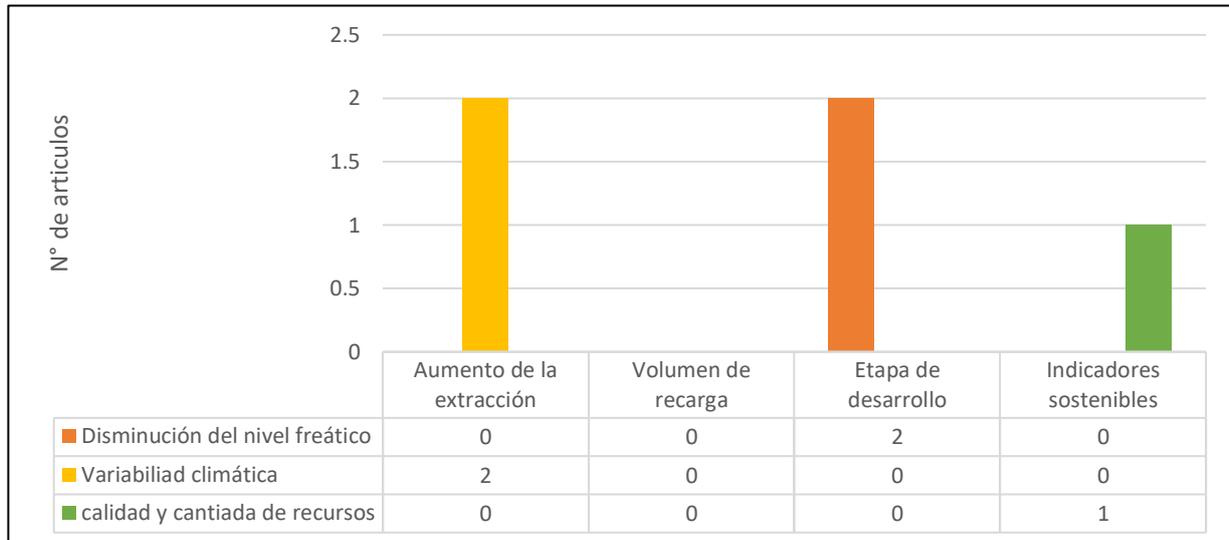
En cuanto a nivel del agua, el sistema acuífero presenta diferentes cambios temporales expresando variabilidad espacio-temporal, para Chang et al. (2017) este factor es importante para la gestión sostenible del recurso hídrico.

Tabla 10: Relación problema - parámetros de los métodos

PROBLEMA	PARÁMETROS
Reducción del nivel freático subterráneo	Capacidad de almacenamiento Volumen de AS contaminada Perdida de AS virtual Nivel relativo de la zonificación de aguas subterráneas Etapa de desarrollo Evapotranspiración Precipitación Recarga potencial
Inestable disponibilidad a largo plazo de aguas subterráneas	Valores de sustentabilidad Índice integrado de gestión sostenible de las AS Valores de sustentabilidad Sensibilidad Escenarios futuros
Inestable disponibilidad de aguas subterráneas	Intensidad de lluvia Cantidad Anual de recarga Recarga de precipitación Volumen extraído Capacidad de infiltración Evolución de calidad del agua
Extracción de aguas subterráneas a nivel cultivo	Análisis espacial Huella hídrica azul Índice de sostenibilidad del agua azul Uso de agua a nivel cultivo (m ³ / h) Valor agregado bruto anual Implementación de sistemas de riego
Variabilidad del clima afecta la disponibilidad de aguas subterráneas	Aumento de abstracción Disminución de recarga Reducción de los flujos base de ET y superficiales

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7: Análisis de parámetros.



Fuente: Elaboración propia.

Para el parámetro de etapa de desarrollo, Prasad and Rao (2018) analizan este parámetro para calcular o determinar el estado de la cuenca, según su estudio concluye con el resultado de 150% como valor del parámetro de etapa de desarrollo lo que indica que la cuenca está sobreexplotada, análisis en función a la problemática de disminución del nivel freático.

Así mismo Ramos et al. (2020), analiza el parámetro de aumento de la extracción enfocado en la sostenibilidad con estudio del problema variabilidad climática, donde se concluye que el parámetro de aumento de la extracción debido al crecimiento socioeconómico ejerce un impacto mínimo en comparación con los impactos de variabilidad.

Como parte final se presenta la tabla 11, donde se analiza la estimación de recarga expresado en tres cuestiones de acuerdo a la evaluación del lugar, donde se evalúa las características hidrogeológicas que presenta la cuenca o el acuífero; de acuerdo a su estimación, analiza la recarga potencial en función al factor de sobreexplotación y como último factor se evalúa de acuerdo al impacto-resultados, aquí se muestra la extracción sostenible y si al final del estudio se logra una recarga anual significativa.

Tabla 11: Análisis de la evaluación de recarga

N°	AUTOR	AÑO	DE ACUERDO CON LA EVALUACIÓN DEL LUGAR			DE ACUERDO A SU ESTIMACIÓN		DE ACUERDO AL IMPACTO-RESULTADOS	
			CARACTERÍSTICA DE ACUÍFERO	GRADO CONFINADO	PRECIPITACIÓN	RECARGA ANUAL	FACTOR EXTRACCIÓN	TIEMPO DE PROYECCIÓN	RECARGA ANUAL SIGNIFICATIVA
1	Salmoral et al.	2020	Arenoso-arcilloso Arenoso-limoso	NO SE IDENTIFICÓ	10 mm	142	286	10 años	NO
2	Schwarz and Mathijs	2017	NO SE IDENTIFICÓ	NO SE IDENTIFICÓ	25,5 mm	252	399	10 años	NO

N°	AUTOR	AÑO	DE ACUERDO CON LA EVALUACIÓN DEL LUGAR			DE ACUERDO A SU ESTIMACIÓN		DE ACUERDO AL IMPACTO-RESULTADOS	
			CARACTERÍSTICA DE ACUÍFERO	GRADO CONFINADO	PRECIPITACIÓN	RECARGA ANUAL	FACTOR EXTRACCIÓN	TIEMPO DE PROYECCIÓN	RECARGA ANUAL SIGNIFICATIVA
3	Soula et al.	2021	Acuífero profundo	CONFINADO	284 mm	22.58	24.81	NO SE IDENTIFICÓ	NO
4	Prasad and Rao	2018	Libre Erosionado Fracturado	Semiconfinado No confinado	1131 mm	13.27	16.96	2 años	NO
5	Ramos et al.	2020	Poco profundo (NC)/ Profundo (C/SC)	Superior: NO CONFINADO Inferior: Confinado/ semiconfinado	1200 mm	51-160	23.589	7 años	NO
6	Hossain et al	2021	Aluvial Superior e inferior	4_ Superior: 1: no confinada a semiconfinada	17,2 % (anual) 81-2010 (media anual)	635,35 mill m3 2065 m	117 a 320%	NO SE IDENTIFICÓ	NO

N°	AUTOR	AÑO	DE ACUERDO CON LA EVALUACIÓN DEL LUGAR			DE ACUERDO A SU ESTIMACIÓN		DE ACUERDO AL IMPACTO-RESULTADOS	
			CARACTERÍSTICA DE ACUÍFERO	GRADO CONFINADO	PRECIPITACIÓN	RECARGA ANUAL	FACTOR EXTRACCIÓN	TIEMPO DE PROYECCIÓN	RECARGA ANUAL SIGNIFICATIVA
7	Mamo et al.	2021	Superior: Libre 2 capas	Inferior: 1: semiconfinada a confinada Superior: no confinado Medio: semiconfinado Inferior: semiconfinado	276.5 mm	284.7 mm/año	190%	15 años	NO
8	Hashem y Shahdany et al	2018	NO SE IDENTIFICÓ	NO SE IDENTIFICÓ	125 mm	280	180	NO SE IDENTIFICÓ	SI
9	Sidhu, Sharda and Singh	2021	Arena fina-arcilla	NO SE IDENTIFICÓ	725 mm	NO SE IDENTIFICÓ	168%	NO SE IDENTIFICÓ	NO

Fuente: Elaboración propia

En la tabla N°11, se asignó los criterios para establecer una relación directa entre la recarga y extracción, subdividiendo criterios de acuerdo a la evaluación del lugar, a su estimación y al impacto-resultados.

En cuanto a la característica del acuífero, es un punto importante a considerar en una recarga, por ejemplo, en el punto de permeabilidad, tal como el autor Chang et al. (2017) analizó que el procesamiento más rápido sucede en una composición estratificada mayormente de gravas, en comparación a una acumulación más lenta del recurso hídrico en capas de gravas, arena, lodo y rocas metamórfica.

En el caso de precipitación, es relevante considerar este criterio ya que es una fuente natural de recarga, aun cuando el clima es cálido / seco, este recurso es gestionable. Se pueden considerar, como resultado de la precipitación, el tipo de infiltración tales como flujo de pistón y flujo preferencial (Chen et al. 2021).

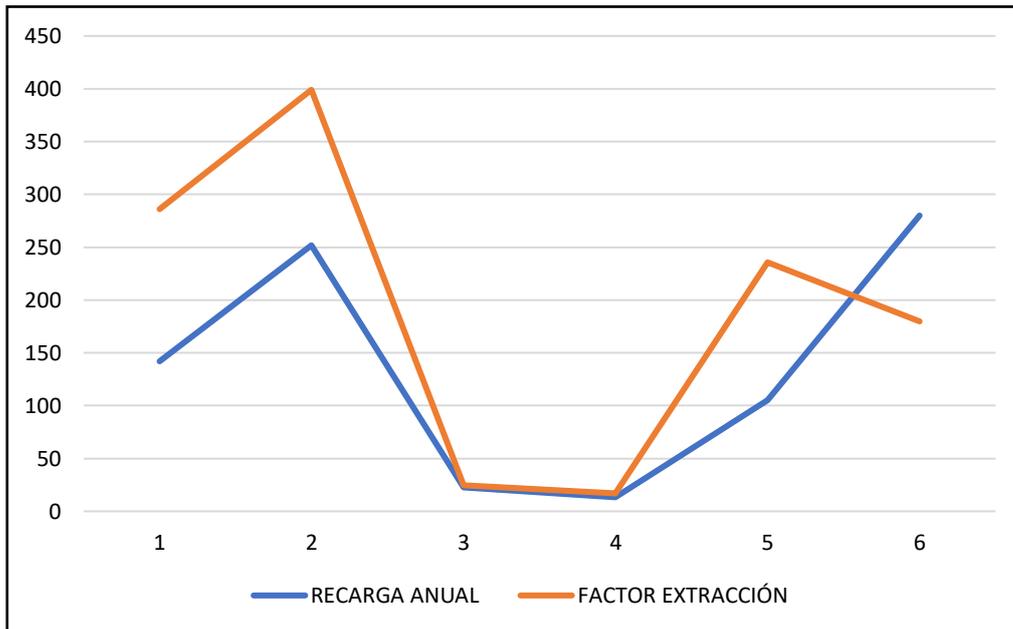
Tabla 12: Flujo de recarga.

	VELOCIDAD	PROCESO
FLUJO PISTÓN	Lento	Regulada por la matriz del suelo
FLUJO PREFERENCIAL	Rápido	No es regulada por la matriz y circula a través de canales preferenciales naturales del suelo

Fuente: Elaboración propia.

Es importante considerar el aspecto de flujo preferencial, ya que es poco probable que las trayectorias de flujo vertical, como la preferencial, lleguen a zonas profundas, por lo que puede detenerse en cierta profundidad, no mayor a 12 m, en este caso, es donde el flujo pistón se convierte en la principal fuente de recarga del acuífero.

Figura 8: Análisis de recarga evaluada.



Fuente: Elaboración propia

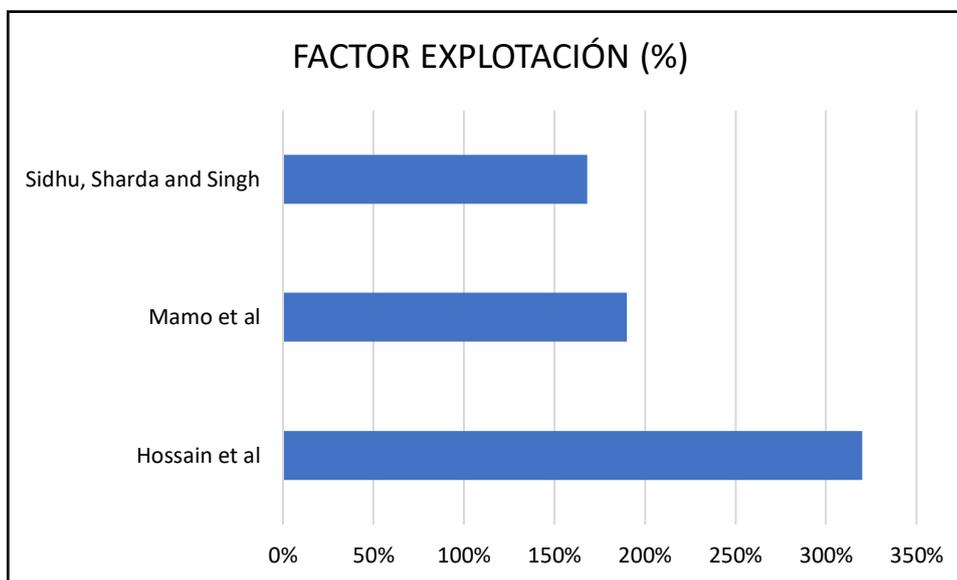
En el criterio de recarga anual significativa (figura 8) todas las investigaciones dieron un resultado negativo, solo en un estudio, hemos considerado enfocarnos a la solución que abarca el autor, en este caso el autor propone tres alternativas de operación de canales automatizadas para que la gestión se enfoque en el aprovechamiento de aguas superficiales y así reducir la extracción del recurso hídrico subterránea, además de reducir energía y carbono. En la tabla 13 claramente se expresa en sus resultados una reducción en la extracción de acuerdo a la alternativa, en el caso A3, la más eficiente, aunque en caso de que se presentes limitaciones económicas de aplicación de métodos, la mejor opción serán las alternativas A1 y A2.

Tabla 13: Alternativas de automatización de canales.

	A1	A2	A3
Reducción extracción	120	180	300
Reducción de KW/h	170	280	450
Reducción de Carbono	23000	34500	57500

Fuente: Hashemy Shahdany et al., (2018)

Figura 9: Análisis de explotación porcentual



Fuente: Elaboración propia

En el caso de los criterios para evaluar la recarga en relación a una realidad de sobreexplotación, el criterio fundamental está en una comparación entre estos dos factores, pero debido a la estimación de extracción en porcentaje (figura 9), es importante considerar los tipos de explotación mencionados por Soula et al. (2021).

Tabla 14: Tipos de explotación porcentual

TIPOS DE EXTRACCIÓN	VALOR PORCENTUAL
Subexplotado: >90%	>90%
Equilibrio: 90 y 110%	90 y 110 %
Sobreexplotación	110%

Fuente: Soula et al. (2021).

En un amplio enfoque del objetivo de la investigación, en la tabla 15 analizamos cómo el estudio de los métodos evalúa la sobreexplotación de las aguas subterráneas en zonas áridas.

Tabla 15: Aspectos del estudio de los métodos

ENFOQUE	MÉTODO	HERRAMIENTA / SIMULADOR	PARÁMETRO
Sostenibilidad	Análisis DPSIR	<ul style="list-style-type: none"> - MODFLOW - GIS - Landsat 	Valores de sustentabilidad
	WTF		Etapa de desarrollo
	Evaluación espacio-temporal		Agotamiento del nivel freático Dirección de flujo de GW Evaluación cambio en la huella hídrica
	Automatización de canales		Reducción extracción Reducción de KW/h Reducción de Ca
	Método de fluctuación		Aumento de abstracción Disminución de recarga Reducción de los flujos base de ET y superficiales
	SPI		Recarga de precipitación Escenarios futuros (variabilidad climática, aumento de la extracción) Volumen extraído
	ASR		Compatibilidad de las aguas de origen y subterránea
	Examen a profundidad de datos		Uso del agua
	PCA		Nivel relativo de la zonificación de aguas subterráneas
	MUSIASSEM		Uso de agua Valor agregado bruto anual
	Evaluación multicriterio del uso del agua de riego		Análisis espacial Huella Hídrica azul Índice de sostenibilidad del agua azul
	Flujo de agua subterránea		Capacidad de almacenamiento Volumen de AS contaminada
Recarga	Cuantificar características de recarga	Intensidad de lluvia cantidad anual de recarga	
	Programa piloto de recarga artificial	Volumen de recarga Capacidad de infiltración	

Fuente: Elaboración propia

V. CONCLUSIONES

En la presente investigación científica, se estuvo evaluando las características más importantes que presenta cada método que evalúan la sobreexplotación de aguas subterráneas en zonas áridas, con respecto a este punto de estudio se logra concluir que aquellas características importantes que determinan a un método como principal es el enfoque, lo cual se pudo identificar que estos pueden estar enfocados en base a la sostenibilidad y recarga, por otra parte otra característica de valor importante es la elección de un simulador, modelo o herramienta y por último el objetivo del estudio, estas tres características son esenciales para la aplicación de un método como solución, ya que esto permitirá tener claro lo que se desea realizar. Por otra parte, también se concluye que el modelo más utilizado fue ArcGIS (SIG) por su flexibilidad y adaptación, por su alcance y determinación de diversos parámetros en función a los paquetes adicionales MODFLOW.

Por consiguiente, para el caso del estudio de los parámetros más requeridos de acuerdo con la problemática estudiada, se llega a concluir que para cada problemática presentada hay parámetros específicos que se evalúan, en el presente estudio se identifica como problemática común a la disminución del nivel de las aguas subterráneas donde aquí el parámetro determinante es la etapa de desarrollo, este parámetro permite saber si un acuífero está en sobreexplotación o no expresado en porcentual.

En el caso de una evaluación de recarga en relación a la sobreexplotación se resaltan dos casos, en el primer caso es determinando la sobreexplotación relacionando la extracción de aguas subterráneas evaluadas con la estimación de recarga, en el segundo caso, la estimación directa de extracción permite denominar el tipo la explotación (subexplotado, equilibrio, sobreexplotación), en los casos presentados todos brindaron sobreexplotación. Se mostró un caso especial de automatización de canales, donde su aplicación permite la reducción de extracción, además de reducir energía, y reducción de emisión de carbono.

VI. RECOMENDACIONES

Tras el estudio y el análisis se sugiere tener en cuenta lo siguiente:

Se recomienda que para la determinación del uso de cualquier método en particular se evalúe con más profundidad los objetivos que requiere cada método, así como la determinación del modelo adecuado para la simulación de datos, por lo que también se podría sugerir realizar una fusión de estos modelos y lograr un mayor alcance de datos.

Explícitamente se vienen realizando investigaciones de las subterráneas en función a su sobreexplotación, es necesario que no solo los estudios estén enfocados a la determinación de ese punto sino buscar soluciones más allá de solo llegar a la gestión de este recurso, es necesario la mayor investigación profunda de las aguas subterráneas y evitar su deterioro.

Así mismo es importante tener en cuenta algo, que cuando se halla o visualiza un problema se propague un fin de soluciones que lleven a la recuperación y preservación de estas redes de aguas en el subsuelo, ya que no solo proporciona beneficios a la humanidad sino a la formación de ecosistemas.

Por último, se recomienda tener en cuenta la expresividad de las frase o palabras de los diferentes estudios en función al país ya que esto puede dar a malas conclusiones.

REFERENCIAS

1. AHANI AMINEH, Z.B., HASHEMIAN, S.J.A.D. and MAGHOLI, A., 2017. Integrating Spatial Multi Criteria Decision Making (SMCDM) with Geographic Information Systems (GIS) for delineation of the most suitable areas for aquifer storage and recovery (ASR). *Journal of Hydrology*, vol. 551, pp. 577–595. ISSN 00221694. DOI 10.1016/j.jhydrol.2017.05.031.
2. ALFARRAH, N. and WALRAEVENS, K., 2018. Groundwater overexploitation and seawater intrusion in coastal areas of arid and semi-arid regions. *Water (Switzerland)*, vol. 10, no. 2. ISSN 20734441. DOI 10.3390/w10020143.
3. ANDREU RODES, J.M. and FERNÁNDEZ MEJUTO, M., 2019. *Las aguas subterráneas en España: hacia la sostenibilidad del recurso*. S.l.: s.n. ISBN 9788413020341.
4. CHANG, F.J., HUANG, C.W., CHENG, S.T. and CHANG, L.C., 2017. Conservation of groundwater from over-exploitation—Scientific analyses for groundwater resources management. *Science of the Total Environment*, vol. 598, pp. 828–838. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.04.142.
5. CHEN, X. yu, ZHANG, K., CHAO, L. jun, LIU, Z. yu, DU, Y. huan and XU, Q., 2021. Quantifying natural recharge characteristics of shallow aquifers in groundwater overexploitation zone of North China. *Water Science and Engineering*, vol. 14, no. 3, pp. 184–192. ISSN 24058106. DOI 10.1016/j.wse.2021.07.001.
6. DE GRAAF, I.E.M., VAN BEEK, L.P.H., GLEESON, T., SUTANUDJAJA, E.H., WADA, Y. and BIERKENS, M.F.P., 2017. How sustainable is groundwater abstraction? A global assessment. [en línea]. S.l.: [Consulta: 23 February 2022]. Disponible en: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017AGUFM.H12D..01D>.
7. EBRAHIM, G.Y., LAUTZE, J.F. and VILLHOLTH, K.G., 2020. Managed aquifer recharge in Africa: Taking stock and looking forward. *Water (Switzerland)*, vol. 12, no. 7. ISSN 20734441. DOI 10.3390/W12071844.
8. EPA, 2021. Groundwater. . United States:
9. FAMIGLIETTI, J.S., 2014. *The global groundwater crisis*. 5 November 2014. S.l.: Nature Publishing Group.

10. FARRUGIA, L., 2019. WASP (write a scientific paper): The ongoing process of ethical decision-making in qualitative research: Ethical principles and their application to the research process. *Early Human Development*, vol. 133, pp. 48–51. ISSN 18726232. DOI 10.1016/j.earlhumdev.2019.03.011.
11. FITZPATRICK, B., 2019. *Validity in qualitative health education research*. 1 February 2019. S.I.: Elsevier Inc.
12. G20 PRESIDENCY OF GERMANY, 2017. *Water for Sustainable Food and Agriculture A report produced for the G20 Presidency of Germany* [en línea]. S.I.: s.n. ISBN 9789251099773. Disponible en: www.fao.org/publications.
13. GLEESON, T., VANDERSTEEN, J., SOPHOCLEOUS, M.A., TANIGUCHI, M., ALLEY, W.M., ALLEN, D.M. and ZHOU, Y., 2010. *Groundwater sustainability strategies*. June 2010. S.I.: s.n.
14. HARTER, T., 2003. Farm Water Quality Planning A Water Quality and Technical Assistance Program for California Agriculture Basic Concepts of Groundwater Hydrology. [en línea]. S.I.: Disponible en: <http://www.nrcs.usda.govhttp://waterquality.ucanr.orghttp://anrcatalog.ucdavis.edu>.
15. HASHEMY SHAHDANY, S.M., FIROOZFAR, A., MAESTRE, J.M., MALLAKPOUR, I., TAGHVAEIAN, S. and KARIMI, P., 2018. Operational performance improvements in irrigation canals to overcome groundwater overexploitation. *Agricultural Water Management*, vol. 204, pp. 234–246. ISSN 18732283. DOI 10.1016/j.agwat.2018.04.014.
16. HESS, T. and COUNSELL, C., 2000. A water balance simulation model for teaching and learning-WaSim Review Collaboration View project Reuse of oil and gas produced water for the irrigation of food crops in drylands View project. [en línea]. S.I.: Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/312619882>.
17. HOFSETH, L.J., 2018. Getting rigorous with scientific rigor. *Carcinogenesis* [en línea], vol. 39, no. 1, pp. 21–25. DOI 10.1093/carcin/bgx085. Disponible en: www.nature.com/authors/policies/checklist.pdf.
18. HUGO SÁNCHEZ, H., CARLOS, C., ROMERO, R. and MEJÍA SÁENZ, K., 2018. Vicerrectorado de Investigación. . S.I.:

19. HUMBERTO, H.A.M., RAÚL, C.C., LORENZO, V.V. and JORGE, R.H., 2017. Aquifer recharge with treated municipal wastewater: long-term experience at San Luis Río Colorado, Sonora. *Sustainable Water Resources Management*, vol. 4, no. 2, pp. 251–260. ISSN 23635045. DOI 10.1007/s40899-017-0196-2.
20. JIA, X., O'CONNOR, D., HOU, D., JIN, Y., LI, G., ZHENG, C., OK, Y.S., TSANG, D.C.W. and LUO, J., 2019. Groundwater depletion and contamination: Spatial distribution of groundwater resources sustainability in China. *Science of the Total Environment*, vol. 672, pp. 551–562. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2019.03.457.
21. JOHNSON, J.L., ADKINS, D. and CHAUVIN, S., 2019. RESEARCH-THEME ISSUE QUALITATIVE RESEARCH IN PHARMACY Quality Indicators of Rigor in Qualitative Research. . S.I.:
22. KALTEH, A.M., HJORTH, P. and BERNDTSSON, R., 2008. Review of the self-organizing map (SOM) approach in water resources: Analysis, modelling and application. *Environmental Modelling and Software*, vol. 23, no. 7, pp. 835–845. ISSN 13648152. DOI 10.1016/j.envsoft.2007.10.001.
23. LUIS, J. and GONZÁLES, A., 2020. *TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA ENFOQUES CONSULTING EIRL* [en línea]. S.I.: s.n. ISBN 9786124844409. Disponible en: www.cienciaysociedad.org.
24. LUIS, J. and GONZÁLES, A., 2021. *DISEÑO Y METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN* [en línea]. S.I.: s.n. ISBN 9786124844423. Disponible en: www.tesisconjosearias.com.
25. MAMO, S., BIRHANU, B., AYENEW, T. and TAYE, G., 2021. Three-dimensional groundwater flow modeling to assess the impacts of the increase in abstraction and recharge reduction on the groundwater, groundwater availability and groundwater-surface waters interaction: A case of the rib catchment in the Lake Tana sub-basin of the Upper Blue Nile River, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 35. ISSN 22145818. DOI 10.1016/j.ejrh.2021.100831.
26. MASSUEL, S. and RIAUX, J., 2017. Surexploitation de l'eau souterraine: pourquoi agite-t-on le drapeau rouge? Etude de cas dans l'aquifère de la

- plaine de Kairouan (Tunisie centrale). *Hydrogeology Journal*, vol. 25, no. 6, pp. 1607–1620. ISSN 14350157. DOI 10.1007/s10040-017-1568-2.
27. MOMIY-HADA, F., ROJAS-MOROTE, A., RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, A. and MENDEZ-VEGA, M., 2017. NUEVO RÉGIMEN ESPECIAL DE MONITOREO Y GESTIÓN DE USO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS A CARGO DE LAS EPS-SUNASS NUEVO RÉGIMEN ESPECIAL DE MONITOREO Y GESTIÓN DE USO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS A CARGO DE LAS EPS Metodología, criterios técnico-económicos y procedimiento para determinar la tarifa. . S.I.:
28. NECHIFOR, V. and WINNING, M., 2017. Projecting irrigation water requirements across multiple socio-economic development futures – A global CGE assessment. *Water Resources and Economics*, vol. 20, pp. 16–30. ISSN 2212-4284. DOI 10.1016/J.WRE.2017.09.003.
29. OCHOA, R., NAVA, N., FUSIL, D. and FUNDACIÓN UNAMUNO, 2020. EPISTEMOLOGICAL UNDERSTANDING OF THE TESTIST ON QUANTITATIVE, QUALITATIVE AND MIXED INVESTIGATIONS COMPRENSIÓN EPISTEMOLÓGICA DEL TESISTA SOBRE INVESTIGACIONES CUANTITATIVAS, CUALITATIVAS Y MIXTAS. [en línea], ISSN 1856-1594. Disponible en: www.revistaorbis.org.ve/núm45.
30. PAGE, D., BEKELE, E., VANDERZALM, J. and SIDHU, J., 2018. Managed aquifer recharge (MAR) in sustainable urban water management. *Water (Switzerland)*, vol. 10, no. 3. ISSN 20734441. DOI 10.3390/w10030239.
31. PRASAD, Y.S. and RAO, B.V., 2018. Groundwater depletion and groundwater balance studies of Kandivalasa River Sub Basin, Vizianagaram District, Andhra Pradesh, India. *Groundwater for Sustainable Development*, vol. 6, pp. 71–78. ISSN 2352801X. DOI 10.1016/j.gsd.2017.11.003.
32. RAMOS, N.F., FOLCH, A., FERNÁNDEZ-GARCIA, D., LANE, M., THOMAS, M., GATHENYA, J.M., WARA, C., THOMSON, P., CUSTODIO, E. and HOPE, R., 2020. Evidence of groundwater vulnerability to climate variability and economic growth in coastal Kenya. *Journal of Hydrology*, vol. 586. ISSN 00221694. DOI 10.1016/j.jhydrol.2020.124920.

33. ROSA, L., CHIARELLI, D.D., TU, C., RULLI, M.C. and D'ODORICO, P., 2019. Global unsustainable virtual water flows in agricultural trade. *Environmental Research Letters*, vol. 14, no. 11. ISSN 17489326. DOI 10.1088/1748-9326/ab4bfc.
34. SALMORAL, G., VIÑARTA CARBÓ, A., ZEGARRA, E., KNOX, J.W. and REY, D., 2020. Reconciling irrigation demands for agricultural expansion with environmental sustainability - A preliminary assessment for the Ica Valley, Peru. *Journal of Cleaner Production*, vol. 276. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2020.123544.
35. SAMANI, S., 2021. Assessment of groundwater sustainability and management plan formulations through the integration of hydrogeological, environmental, social, economic and policy indices. *Groundwater for Sustainable Development*, vol. 15, pp. 100681. ISSN 2352801X. DOI 10.1016/j.gsd.2021.100681.
36. SÁNCHEZ SAN ROMÁN, F.J., 2019. Conceptos Fundamentales de Hidrogeología. [en línea]. S.l.: Disponible en: <http://hidrologia.usal.es> Pág.1.
37. SANCHEZ SAN ROMAN and FRANCISCO JAVIER, 2019. Conceptos Fundamentales de Hidrogeología. [en línea]. S.l.: Disponible en: <http://hidrologia.usal.es> Pág.1.
38. SARAH, S., AHMED, S., VIOLETTE, S. and DE MARSILY, G., 2021. Groundwater sustainability challenges revealed by quantification of contaminated groundwater volume and aquifer depletion in hard rock aquifer systems. *Journal of Hydrology*, vol. 597. ISSN 00221694. DOI 10.1016/j.jhydrol.2021.126286.
39. SCHWARZ, J. and MATHIJS, E., 2017. Globalization and the sustainable exploitation of scarce groundwater in coastal Peru. *Journal of Cleaner Production*, vol. 147, pp. 231–241. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2017.01.067.
40. SIDHU, B.S., SHARDA, R. and SINGH, S., 2021. Spatio-temporal assessment of groundwater depletion in Punjab, India. *Groundwater for Sustainable Development*, vol. 12. ISSN 2352801X. DOI 10.1016/j.gsd.2020.100498.

41. SOULA, R., CHEBIL, A., MCCANN, L. and MAJDOUB, R., 2021. Water scarcity in the Mahdia region of Tunisia: Are improved water policies needed? *Groundwater for Sustainable Development*, vol. 12. ISSN 2352801X. DOI 10.1016/j.gsd.2020.100510.
42. WADA, Y., VAN BEEK, L.P.H. and BIERKENS, M.F.P., 2012. Nonsustainable groundwater sustaining irrigation: A global assessment. *Water Resources Research*, vol. 48, no. 1. ISSN 00431397. DOI 10.1029/2011WR010562.
43. ZEVALLOS PITZUHA, S.L., 2020. Elaboración de un glosario terminológico español-inglés en investigación científica, Lima, 2020. . S.I.:

ANEXOS

ANEXO 01: FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS

	FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS	
TÍTULO: Revisión sistemática: Estudio de métodos que evalúan la sobreexplotación de aguas subterráneas en zonas áridas		
REVISTA: ScienceDirect	AÑO DE PUBLICACION: 2020	LUGAR DE PUBLICACION: Reino Unido
TIPO DE INVESTIGACION: Cualitativa	CÓDIGO: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123544	
AUTOR(ES):	Gloria Salmoral, Araceli Vinarta Carbo, Eduardo Zegarra, Jerry W. Knox, Dolores Rey	
PALABRAS CLAVES:	Abstracción Agroexportación Agua subterránea Huella de agua Productividad del agua	
METODO:	Evaluación multicriterio	
OBJETIVO:	Análisis espacial, tendencias de riego, dimensión económica del agua	
PARAMETROS:	Clima Suelo Cultivo	
RESULTADOS:	Huella hídrica que expresa agotamiento, extracción sostenible 252, tendencias de granjas grandes	
CONCLUSIONES:	Se necesitan técnicas de sostenibilidad en riego	

Fuente: Elaboración propia