

CONSIDERACIONES PARA LA APLICACIÓN DE LA TÉCNICA FLOOD MAR EN COLOMBIA.

CONSIDERATIONS FOR THE APPLICATION OF THE FLOOD MAR TECHNIQUE IN COLOMBIA.

MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

Presentado por:

D./D^a SANDRA YOHANA ALVAREZ F.

Dirigido por:

Dr./Dra. D./D^a FRANCISCO CARREÑO CONDE.

Alcalá de Henares, a 13 de septiembre de 2021.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, mis agradecimientos infinitos al creador y Padre celestial por concederme las capacidades necesarias para desarrollar y culminar este proyecto académico. Su infinito amor, su gran misericordia y sus inmensas bendiciones son mi soporte principal de vida para cumplir con éxito este sueño.

Muchas gracias a mi familia por su cariño e incondicionalidad y muy especialmente agradezco en gran manera a mi esposo e hijos por su paciencia y su comprensión, por su apoyo y amor constante que me impulsó a llegar a la meta por este sueño.

Por último, un sincero agradecimiento a todas las personas maravillosas que hicieron agradable cada momento en este máster y que fue posible compartir gracias a este proceso formativo.

CONTENIDO

RESUMEN.....	7
1. INTRODUCCIÓN	8
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	10
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	10
2. METODOLOGÍA	11
3. RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS	12
4. METODOLOGIA DE RECARGA ARTIFICIAL.....	14
4.1.1 Método de recarga superficial por dispersión/infiltración.....	15
4.1.2 Métodos de recarga profunda por inyección mediante pozos.	15
5. RECARGA DE ACUÍFEROS GESTIONADA FLOOD-MAR.....	16
5.1 BENEFICIOS DE USAR AGUA DE INUNDACIÓN PARA RECARGA DE ACUÍFEROS.....	18
5.2 ANÁLISIS DE FACTORES DE IMPLEMENTACION DE FLOOD MAR.....	19
5.2.1 Gobernanza y coordinación.....	21
5.2.2 Financiación e incentivos	21
5.2.3 Fuente de agua.....	21
5.2.4 Transporte.....	22
5.2.5 Idoneidad del emplazamiento.....	22
5.2.6 Métodos de recarga.....	23
5.2.7 Usos de las aguas Subterráneas	23
5.2.8 Análisis de viabilidad	23
5.3 HERRAMIENTAS Y MÉTODOS PARA EL ANÁLISIS TÉCNICO.	24
5.3.1 Análisis hidrológico.....	24
5.3.2 Análisis de recarga.....	24
5.3.3 Interpretación de resultados.....	26
6. AGUAS SUBTERRÁNEAS EN COLOMBIA.	27

6.1 EXPERIENCIAS EN RECARGA ARTIFICIAL EN COLOMBIA	29
6.2 CONDICIONES DE LA REGION LLANOS PARA EVALUAR FLOOD MAR... 31	
6.3 EVALUACION DE FACTORES PARA IMPLERAR FLOOD -MAR EN LA CUENCA LLANOS.....	37
6.3.1 Gobernanza y Coordinación:	37
6.3.2 Financiación e incentivos	40
6.3.3 Fuente de agua:	41
6.3.4 Transporte:.....	43
6.3.5 Idoneidad del emplazamiento:.....	43
6.3.6 Métodos de Recarga:	44
6.3.7 Uso de las aguas subterráneas:	45
6.3.8 Análisis y Viabilidad (Proyecto Piloto).....	45
6.4 CONSIDERACION DE LOS MODELOS PARA EL PROCESO DE INTEGRACION.....	46
7. CONCLUSIONES	47
8. BIBLIOGRAFÍA.....	50
9. ANEXOS.....	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores de implementación del proyecto (A partir de DWR, 2018).....	20
Tabla 2. Consolidado de experiencias de Recarga de Acuíferos en Colombia (IGRAG, 2016; Perez Lizarazo, 2002; Navarro Mercado, 2020).	30
Tabla 3. comparación de eventos de Sequias locales y Fenómeno del Niño (Modificado de IDEAM, 2018).....	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Métodos y Dispositivos de Recarga de Acuíferos. (Modificado de IGME, s.f.).	14
Figura 2. Componente del proyecto Flood MAR. (Modificado de DWR, 2018).....	17
Figura 3. Herramientas y Métodos analíticos (Modificado de DWR, 2018).	24
Figura 4. Flujo del Proceso sobre el Desarrollo e Integración del Modelo (Modificado de DWR, 2018).....	25
Figura 5. Provincias Hidrogeológicas y Sistemas de Acuíferos en la Cuenca Llanos de Colombia (A partir de SINA, 2021).	28
Figura 6. Mapa de Zonas Potencialmente Inundable en Colombia (A partir de SINA, 2021).	32
Figura 7. Esquema de la Organización de la Gestión Integral del Recurso Hídrico en el Gobierno de Colombia (A partir de MADS, 2021).	38
Figura 8. Estaciones hidrológicas, hidrometeorológicas y meteorológicas en Colombia (color café) y para la Cuenca Llanos (color rojo) (A partir de SINA, 2021).....	42
Figura 9. Mapa de Zonas Potenciales de Recarga de Aguas Subterráneas para Colombia MZPRAS (Mofificado de IDEAM, 2018).....	44

TABLA DE ABREVIATURAS

ACH: Asociación Colombiana de Hidrogeólogos

ARA: Almacenamiento y recuperación de acuíferos

BID: Banco Interamericano de Desarrollo

CAR: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.

CIAT: Centro Internacional de Agricultura Tropical

DWR: Departamento de Recursos Hídricos de California

ENA: Estudio Nacional de Aguas

ENSO: El Niño, Southern Oscillation

Flood-MAR: Flood-Managed Aquifer Recharge (Gestión de la recarga del acuífero por inundación)

GRA: Gestión de recarga de acuíferos

I&D: Marco de Investigación y Desarrollo

IDEAM: Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales de Colombia.

IGAC: Instituto Geográfico Agustín Codazzi

IGRAC: International Groundwater Resources Assessment Center

INCODER: Instituto Colombiano de Desarrollo Rural

MADS: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

MAR: Managed Aquifer Recharge (MAR) en inglés

MME: Ministerio de Minas y Energía

MZPR: Mapa de zonas potenciales de recarga de agua subterránea

PHN: Plan Hídrico Nacional

PNASUB: Plan Nacional de Aguas Subterráneas

POMCA: Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas

PRICCO: Plan Regional Integral de Cambio Climático para la Orinoquía

SGC: Servicio Geológico Colombiano.

SGMA: Ley de Gestión Sostenible de Aguas Subterráneas

SINAP: Sistema Nacional de Áreas Protegidas

UN: Universidad Nacional de Colombia

UNGRD: Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.

RESUMEN

La recarga artificial de acuíferos es una estrategia basada en aumentar los volúmenes de aguas subterráneas de manera intencional para luego ser gestionada con eficiencia en tiempos de escases, permitiendo garantizar la seguridad hídrica. Esta técnica a medida que pasa el tiempo y su implementación en muchos países del mundo ha obtenido un avance en experiencia a nivel de conocimiento técnico, de gestión y procedimientos con resultados muy favorables a la solución de problemáticas del recurso hídrico.

En el presente estudio se realizará una revisión bibliográfica de las diferentes investigaciones y experiencias que se han efectuado a nivel global frente al proceso de recarga de acuíferos, metodología, dispositivos, ventajas y desventajas del procedimiento, además de las características más relevantes para su determinación.

El análisis de este trabajo será fundamentado sobre el plan de investigación y desarrollo propuesto para California mediante una estrategia de gestión de aguas de inundación resultante de lluvias y nieve, llamada Flood – MAR. Este proyecto es novedoso debido a que la evaluación de recarga de acuíferos se propone principalmente a escala de cuenca, pero con factibilidad a múltiples escalas, la evaluación ofrece una amplia variedad de beneficios generales como reposición del acuífero, la reducción del riesgo de inundación, y restauración de ecosistemas (DWR, 2018).

Considerando los múltiples beneficios y ventajas de estos proyectos de recarga gestionada que fortalecen la administración del recurso hídrico, se analizó el nivel de desarrollo y conocimiento en el territorio nacional y su viabilidad de implementación para la Cuenca Llanos Orientales. Para este análisis se tiene en cuenta los aspectos técnicos como herramientas y aplicaciones, estructura, factores de implementación, aspectos sociales y políticos que fueron puestos a prueba en el proyecto de Flood MAR, con el propósito de identificar las problemáticas y desafíos que presenta la región de la Orinoquia en la actualidad, e identificar las fortalezas y debilidades frente al manejo y gobernanza del agua para finalmente visualizar la factibilidad del plan de recarga gestionada de acuíferos mediante aguas de inundación, lo que podría ser a futuro un plan para afrontar la sobreexplotación de acuíferos y la adaptación al cambio.

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial en los últimos años la recarga de acuíferos se ha convertido en una excelente alternativa para gestionar los recursos hídricos. El objetivo de esta técnica es acumular agua para ser usada en tiempos futuros de sequía para sectores agrícolas, industriales o consumo humano, también ayuda al control de la intrusión marina, reduce procesos de escorrentía y erosión, contribuye a control de inundaciones, mitiga eventos de subsidencia de suelos e impacta favorablemente a los ecosistemas.

En Colombia este tema no se encuentra desarrollado ampliamente ya que las favorables condiciones hídricas del país en algunos sectores nos han creado una impresión de seguridad frente a la disponibilidad de recurso, sin embargo, al evaluar a detalle la gestión y uso de estos, se puede identificar que tenemos enormes retos para contrarrestar la inseguridad hídrica que a futuro se presentara en varios sectores del país (Global Water Security y Sanitation Partnership, 2020).

Actualmente la recarga de acuíferos en Colombia está en desarrollo mediante proyectos piloto, algunos con buenos resultados que favorecen el proceso en cuanto a la experiencia y lecciones aprendidas como el acuífero de Morroa. La importancia de esta herramienta en el país se extenderá y avanzará en su desarrollo cuando la sobreexplotación de acuíferos cause efectos en la disponibilidad del recurso, o cuando el proceso de recarga natural este perjudicado por el impacto del cambio climático y procesos antrópicos (Universidad de Antioquia, 2019).

El cambio climático es un fenómeno mundial, pero incide en cada país de diferente manera y magnitud según las características geográficas y la capacidad de respuesta. Según el pronóstico del IDEAM las principales variables que afectaran al territorio colombiano será el aumento de temperatura y la variación significativa de la precipitación, lo que conllevaría a eventos extremos como riesgos de inundaciones, sequias con mayor frecuencia y magnitud, aumento del nivel marino y problemas en la disponibilidad del recurso hídrico. Estas futuras condiciones nos conducen a plantear propuestas y consolidar soluciones para fortalecer políticas de desarrollo sostenible garantizando un uso racional de los recursos con el objetivo de mitigar el impacto del cambio climático (COMANA 2018, 2018; Ecointeligencia, 2016).

En búsqueda de información y experiencias enriquecedoras que fueran guía de implementación en nuestro país, se identificó el plan desarrollado en California, que bajo condiciones de periodos extremos de sequias e inundaciones, proponen una estrategia

llamada Flood MAR, buscando integrar aguas subterráneas y superficiales con beneficios públicos y privados en los ecosistemas del estado. (DWR, 2018). La evaluación y análisis de esta estrategia se realiza para la Cuenca llanos en Colombia, determinada por la cuenca del Rio Orinoco, y microcuencas del Rio Meta, Guaviare y Guainía, área que comprende la mayor extensión de sabanas naturales en el país y 199 áreas protegida según SINAP (Global Water Security y Sanitation Partnership, 2020; MADS, 2017).

Las condiciones del área han hecho que el Gobierno en los últimos años proyecte un crecimiento económico por sus múltiples ventajas, para este objetivo se debe evaluar la planificación de la sostenibilidad de nuestros recursos hídricos, dimensionar el riesgo en que se encuentra la conservación de la biodiversidad y buscar medios para controlar y mitigar las problemáticas de variabilidad climática locales y fenómenos globales como ENSO que producen grandes impactos. El propósito es promover la orientación estratégica al conocimiento, uso y manejo de los recursos hídricos en pro de fortalecer la estructura de una gestión integral sostenible basado en un fortalecimiento institucional que promuevan la gestión y procesos participativos de la gobernanza del agua (MADS, 2014).

1.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal de este trabajo es conocer, identificar y sintetizar la estrategia novedosa de Flood MAR, evaluando sus beneficios e impactos para definir su factibilidad en la Cuenca Llanos de Colombia.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Como objetivos secundarios se plantean:

- Conocer e identificar la técnica de recarga artificial, sus ventajas y dificultades.
- Determinar los métodos de recarga y su aplicabilidad.
- Identificar, sintetizar y analizar las ventajas de implementación del proyecto Flood MAR.
- Analizar la gestión hídrica y evolución del conocimiento de las aguas subterráneas en Colombia, conocer las experiencias en recarga de acuíferos que ha tenido nuestro país y evaluar las condiciones actuales para la implementación de Flood MAR.
- Valorar las condiciones técnicas y políticas en Colombia para la implementación de la recarga de acuíferos gestionada.

2. METODOLOGÍA

Este trabajo se ha realizado a partir de la revisión bibliográfica en temas relacionados con experiencias frente a la recarga gestionada de acuíferos en Chile, España, México, Perú, California y otros países donde ha sido favorable esta medida, además de literatura que muestra las herramientas aplicadas a la gestión de recursos hídricos e información actualizada de artículos, memorias de congresos, foros, talleres con expertos, páginas web relacionadas con experiencias a nivel mundial, tesis magister, trabajos de fin de master, páginas web del sector público y privado.

El proceso de revisión se planteó de la siguiente manera:

- a. Búsqueda de información respecto al proceso, metodología, experiencias de recarga de acuíferos y revisión bibliográfica en la Biblioteca virtual de la Universidad Nacional, Universidad Militar Nueva Granada, Semillero de investigación en Aguas subterráneas EAFIT, Google académico; Biblioteca ministerio de defensa Colombia (Proquest) y portal de revistas latinoamericanas Scielo, lo que permitió un conocimiento general del tema.
- b. Basados en la lectura y el análisis del material bibliográfico se seleccionó información relevante y actualizada de procesos, metodologías con avanzada experiencia en diferentes países como Chile, México, España y especialmente en California donde se realizó un seguimiento a la página de Department of Water Resources DWR con el objetivo de comprender, sintetizar y revisar el proyecto llamado Flood MAR, con sus procesos.
- c. Planteamiento y análisis de información específica de las aguas subterráneas para el territorio colombiano, basados en el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y las publicaciones técnicas del IDEAM.
- d. Desarrollo, análisis y conclusiones del TFM.

3. RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS

En la actualidad el planeta enfrenta desafíos frente al desabastecimiento y seguridad del recurso hídrico a causa de problemáticas como alta demanda por aumento de población, efectos del cambio climático y falta de administración en el manejo del recurso, lo que obliga a evaluar instrumentos e identificar soluciones innovadoras que contribuyan a la seguridad de este líquido vital. En varias partes del mundo se han desarrollado soluciones como ARA almacenamiento y la recuperación de acuíferos y GRA gestión de recarga de acuíferos, con la finalidad de incrementar el almacenamiento de agua dulce, pero teniendo presente su factibilidad en aspectos sociales, institucional, económicos y técnicos (Daus, 2019).

Según (Murillo Diaz, 2000), “la recarga es el flujo de agua que entra en la zona saturada aumentando el volumen almacenado, el flujo puede producirse producto de la percolación del agua en superficie, intercambio con fuentes hídricas u otras unidades hidrogeológicas, así como la recarga natural propiciada por el ciclo hidrológico. Este es un proceso que depende de muchas variables como la precipitación, características del suelo, cobertura vegetal y los parámetros capacitivos del acuífero”.

La recarga artificial gestionada de un acuífero se produce por medio de varias técnicas que dejan pasar agua de forma directa o inducida a los acuíferos aumentando su volumen para luego a futuro recuperarla y usarla, esta técnica tiene gran aceptabilidad por combatir efectos negativos del cambio climático (UMAN Instituto de Ingeniería, 2017).

Estas técnicas en países de Europa son una alternativa de primer orden, mediante las experiencias a través de su implementación han destacado las siguientes ventajas:

- Almacenar agua en los acuíferos en zonas con escasa disponibilidad de terreno para su uso a futuro, o donde se dificulte otras formas de almacenamiento como presas.
- Uso del acuífero como embalse de regulador, capacidad de almacén y red de distribución para generar un balance de la demanda y no llegar a sobreexplotación.
- Desarrollar estrategia de manejo integral del agua a nivel cuenca para efectos del cambio climático.
- Al aumentar los niveles del agua subterránea se dispone de recursos hídricos seguros en tiempos de sequía o escasez del agua.

- El acuífero es un almacén cubierto que reduce las pérdidas por evaporación y el agua puede estar menos expuesta a cualquier actividad antrópica que en superficie.
- El proceso de infiltración que se desarrolla a través del suelo favorece la calidad del agua ya que puede mejorarla, eliminando patógenos, sustancias químicas, y así disminuir riesgos medioambientales.
- Esta técnica contribuye al marco de un desarrollo sostenible ya que es favorable para controlar la intrusión marina, problemas de subsidencia, beneficia caudales ecológicos en ríos o arroyos, y fomenta mucho la reutilización de agua.
- Disponer/reusar el agua de desecho o de las tormentas, mitigación a riesgos de inundación y gestión en eventos climáticos extremos (Grupo Tragsa, 2019).

Sin embargo, para estos proyectos también se presentan factores limitantes en su proceso como:

- Debido a que esta técnica se visualiza como “especial o alternativa” en países en desarrollo su grado de conocimiento y experiencia es baja o incipiente, además la aceptabilidad política y social también lo es.
- El problema de colmatación en las áreas de recarga, debido a la falta de tratamiento previo, creando la necesidad de un control ambiental continuo y monitoreo a largo plazo.
- Se identifican la falta de interés por realizar estudios de viabilidad, ya que estos requieren de investigaciones a detalle para identificar riesgos antes del proceso de la construcción de los dispositivos, lo que aumenta los costos.
- El inadecuado contenido técnico, ya sea por falta de información o interpretación genera dificultades para el desarrollo como; mal diseño de las estructuras de infiltración, pozos en malas condiciones de funcionamiento y mala operatividad.
- Agua resultante en el acuífero de baja calidad.
- Pérdidas de agua debido a fallas geológicas no conocidas o mal identificadas.
- La falta de compromiso social o apoyo político dejan proyectos piloto abandonados, sin mantenimiento lo que produce una disminución en su efectividad (UNESCO-PHI, 2005; Grupo Tragsa, 2019).

4. METODOLOGIA DE RECARGA ARTIFICIAL

La metodología que se dispone para la recarga de acuíferos gestionada cubre una gran variedad de métodos que deben valorar según las condiciones locales del área como: el tipo de acuífero, condiciones hidrogeológicas locales, costos, terreno disponible, calidad de la fuente de agua y otros factores para son indispensables para definir la técnica. Se clasifican en técnicas de recarga por infiltración o dispersión para acuíferos no confinados y técnicas de recarga por inyección cuando los acuíferos son profundos y están cubiertos por capas impermeables, como se observa en la Figura 1 (CSIRO, 2020).

METODOS Y DISPOSITIVOS PARA RECARGA DE ACUÍFEROS		
TIPOS DE RECARGA	ZONA	DISPOSITIVO
Recarga por infiltración/Dispersión (Métodos Superficiales)	Fuera de cauces	Balsas de infiltración
		Humedales
		Canales artificiales de infiltración
		Inundación de terrenos (campos de infiltración)
		Tratamiento suelo - acuífero (TSA)
		Presas subterráneas
		Recarga por riego
	En cauces de Ríos	Diques de retención y represas
		Diques permeables y semipermeables
		Serpenteos
		Escarificación del lecho
		Diques perforados
		Bancos filtrantes en los ríos
	Con agua de lluvia	Filtración a través de las dunas
Captación de agua de lluvias en improductivo		
Sistema de drenaje	Recarga accidental por conducciones urbanas	
Recarga por inyección mediante pozos (Métodos profundos)	Pozos someros y profundos (ASR, ASTR)	
	Pozos abiertos de infiltración	
	Barrera de pozos	
	Simas y Dolinas	
	Drenes y galerías	
	Zanjas y sondeos	
	Inyección y almacenamiento en acuíferos salinos	

Figura 1. Métodos y Dispositivos de Recarga de Acuíferos. (Modificado de IGME, s.f.).

4.1.1 Método de recarga superficial por dispersión/infiltración.

Estos métodos tienen contacto directo el agua con el terreno para infiltrar en la formación acuífera. Las variables importantes por identificar son: área apta de recarga, cantidad de agua que se infiltrara y tiempo que requiere para llegar al acuífero.

- **Estanques y balsas de infiltración:** Estos se ubican en zanjas o depresiones naturales de la superficie del suelo que direcciona el flujo para que se infiltre.
- **Inundación de terrenos:** Esta técnica consiste en distribuir finas láminas de agua sobre grandes extensiones de tierra de pendientes muy bajas para que se infiltre lentamente. Este sistema requiere un acondicionamiento mínimo del suelo a recargar, pero se debe cumplir con las medidas de remediación para mantener la tasa óptima de infiltración.
- **Zanjas, surcos y drenajes de riego:** Para este se requiere de un río que se encuentre cerca de la zona a recargar, de donde se abastecerá el sistema de zanjas continuas y muy superficiales. Este puede ser utilizado en cualquier terreno con topografía plana o irregular (CSIRO Chile, 2018).
- **Riego:** El agua sobrante de riegos que viene de canales, mientras sea cuantificado y gestionado puede ser un recurso que favorece la recarga (UNESCO-PHI, 2005).

4.1.2 Métodos de recarga profunda por inyección mediante pozos.

Estos métodos se basan en inducir agua en el acuífero mediante sondeos y pozos. Son viables para terrenos formados por intercalaciones de estratos permeables e impermeables.

- **Pozos:** Mediante los pozos se inyecta agua de una fuente específica a la formación acuífera, es utilizado para estratos de gran espesor y confinados, además son muy viables cuando no se dispone de terrenos amplios, pero la exigencia es mayor en cuanto a la calidad del agua a recargar.
- **Pozos de recarga somera:** Son utilizados para recargar cuando el nivel freático es superficial y los estratos más someros son de baja permeabilidad.
- **Pozos de recarga profunda:** Son utilizados si los estratos sobre el acuífero son de gran espesor y con permeabilidad baja.

- I. Pozos de almacenamiento y recuperación (ASR), es cuando se realiza inyección de agua a un pozo y se realiza almacenamiento y recuperación en el mismo pozo, es muy utilizado en pozos profundos (CSIRO Chile, 2018).
- II. Pozos de almacenamiento, transferencia y recuperación (ASTR). Es inyectar agua en un pozo para almacenamiento, pero su recuperación es en otro pozo diferente ubicado a cierta distancia aprovechando la depuración natural (National Water Quality Management Strategy, 2019).

5. RECARGA DE ACUÍFEROS GESTIONADA FLOOD-MAR.

Dentro de las estrategias y soluciones que se han formulado para la problemática de la escasez de agua, la recarga gestionada es una opción económicamente viable y efectiva para enfrentar efectos adversos del cambio climático, favorable ambientalmente y con muchos otros beneficios, sin embargo, su nivel de implementación es baja por falta de concientización de su potencial, conocimientos insuficientes de los acuíferos y percepción de incertidumbre por la falta de experiencia (ISMAR 10, 2019).

La gestión integrada es “la coordinación y la utilización y la gestión coordinada de recursos tanto de aguas superficiales como subterráneas para maximizar la disponibilidad y confiabilidad del suministro de agua en una región, con el propósito de lograr diversos objetivos de gestión del agua” (California Department of Water Resources, 2018).

California es un estado que tiene una trayectoria desde el año 1865 con buenos resultados en el tema de recarga de acuíferos, pero sin resolver por completo la problemática de la demanda total para abastecimiento del sector agrícola y las comunidades. En los tiempos de sequía y en años donde el agua superficial disminuye, se produce una mayor extracción que recarga lo que pone en alerta la disponibilidad del recurso a futuro, debido a estas condiciones se propone la implementación de proyectos de ARA y GRA conjuntamente para la sostenibilidad de acuíferos, además de una estricta regulación y derechos del uso de aguas subterráneas (CSIRO, 2020).

En 2014 la legislación de California aprueba la Ley de Gestión Sostenible de Aguas Subterráneas SGMA, donde se da un marco de referencia frente a la gestión del conocimiento a nivel estatal y de cuencas para el manejo de aguas subterráneas con objetivo de equilibrar los recursos hídricos al año 2040 (CSIRO, 2020).

SGMA estructura planes de gestión de cuenca con prioridades en acuíferos con sobreexplotación, la escala de evaluación se amplía mediante la interacción de aguas subterráneas y superficiales y la necesidad de administrarlas. Además, proponen nuevas estructuras de gobernanza para que las agencias locales tengan autonomía e implementen sus propios planes de manejo de cuenca.

El Departamento de recursos Hídricos de California DWR inicia el programa Flood-MAR, una estrategia de gestión de recursos integrada y voluntaria que utiliza aguas de inundación producto de lluvia o deshielo para la recarga de aguas subterráneas en tierras agrícolas y llanuras de inundación. Es muy favorable en regiones con escasas del recurso hídrico en tiempo seco y catalogado como la mejor herramienta contra efectos del cambio climático (California Department of Water Resources, 2018).

Es un plan integral que comprender varios componentes como: Embalses, Bypass de la inundación, hábitat de llanuras inundables, huertos, tierras de cultivos activas, campo de seguimiento y estanque de recarga como se ilustra en la Figura 2 (DWR, 2018).



Figura 2. Componente del proyecto Flood MAR. (Modificado de DWR, 2018).

La implementación de SGMA busca que las entidades que se encargan del manejo y control de las inundaciones en los predios y la encargada de la gestión de las aguas subterráneas se asocien e integren fuerzas para disminuir los impactos de estas dos variables y favorecer ecosistemas de llanura de inundación, paisajes de trabajo y participación de

sector agrícola. Flood-Mar se puede implementar a múltiples escalas, desde usuarios de predios individuales hasta grandes extensiones de tierras, el gran potencial se basa en una mejor integración de aguas superficiales y subterráneas con mejoras en el transporte, almacenamiento y las operaciones.

5.1 BENEFICIOS DE USAR AGUA DE INUNDACIÓN PARA RECARGA DE ACUÍFEROS.

Existen gran cantidad de beneficios potenciales con el desarrollo de Flood MAR, pero según el proyecto y las consideraciones del área se obtendrá beneficios y también limitaciones, es por ello importante evaluar a detalle antes de la implementación. Esta estrategia representa la gestión integrada del agua y está diseñada para obtener múltiples beneficios privados y públicos como:

- **Reducción de riesgo de inundación:** El proceso para mitigar el riesgo de inundación se realiza de acuerdo con los datos de registro del caudal y el monitoreo de puntos máximos de flujo, lo que permite generar alerta y reaccionar para desviar los flujos por medio de canales, desde el río a los terrenos dispuestos para infiltración como llanuras aluviales y tierras de cultivo. Esta distribución de agua también es favorable en la disminución del proceso de escorrentía, favoreciendo el ecosistema.
- **Preparación para la sequía:** Con la evaluación de la capacidad del acuífero, se identifica su máximo volumen para recarga y su factibilidad para el almacenamiento.
- **Reposición de acuíferos:** Se puede recupera el nivel freático con aguas de inundación para después utilizarlas en recreación o respuestas a emergencia.
- **Mejoras en los ecosistemas:** Los procesos de inundación generan que el nivel freático aumente y con la interacción de aguas superficiales se genera que la temperatura de la superficie disminuya, beneficiando a especies terrestres y algunas acuáticas. Las llanuras aluviales son ecosistemas que dependen del agua subterránea, donde se benefician pantanos, esteros, humedales y ambientes de rivera.
- **Mitigación de subsidiariedad:** El proceso de subsidencia del terreno es mitigado cuando se recupera el volumen de agua en el acuífero y se controla la sobreexplotación, evitando efectos negativos en infraestructuras.
- **Mejora de la calidad del agua:** Este beneficio se obtiene cuando al inyectar agua promueve la dilución de un acuífero contaminado por sales o nutrientes, pero si la

fuentes de agua está contaminada afecta negativamente al acuífero, por ello es indispensable conocer la calidad del agua del acuífero y de la fuente de recarga.

- **Preservación y administración del paisaje del trabajo:** Se requiere compromiso por parte de autoridades de planificación local para preservar su uso específico en cuanto a la protección de cuenca hidrográficas, también de la voluntad por parte de los propietarios para permitir el uso los terrenos para inundación a cambio de compensación.
- **Fiabilidad del suministro:** Por medio de la recarga de acuíferos se asegura el suministro del agua para la comunidad, sectores agrícolas e industrial.
- **Reducción de los costos de bombeo de aguas subterráneas:** Cuando se aumenta el nivel del agua subterránea, se evitará la necesidad de profundizar los pozos lo que ayudará a los usuarios a reducir los costos de bombeo.
- **Recreación y estética:** Los beneficios que reciben los ecosistemas proporcionan un embellecimiento del entorno con un paisaje natural con gran variedad de especies vegetales, animales, creación de humedales y beneficios recreativos.
- **Adaptación al cambio climático:** Esta estrategia en la actualidad es muy favorable para mitigar los efectos del cambio climático como las altas temperaturas, ya que con la recarga gestionada se busca almacenar en su ambiente natural volúmenes de agua que estarán protegidos de la evaporación (DWR, 2018).

5.2 ANÁLISIS DE FACTORES DE IMPLEMENTACION DE FLOOD MAR

DWR inician el proyecto Flood MAR con la implementación del Marco de investigación y Desarrollo (I&D), buscan identificar temas relevantes y ampliar conocimientos con información segura en un plan de investigación común. La estrategia de gestión de recursos se fundamenta en unos factores de implementación considerados importantes para el desarrollo y se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Factores de implementación del proyecto (A partir de DWR, 2018).

FACTORES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE FLOOD MAR			
FACTORES	FORMULACIÓN	CONSIDERACIONES	FLOOD MAR - CALIFORNIA
1. Gobernanza y coordinación.	¿Cómo se coordinarán los proyectos?	<ul style="list-style-type: none"> • La voluntad de los propietarios • Necesidad y oportunidades locales y del sistema • Alianzas y acuerdos • Decisiones de coordinación y cooperación • Marco jurídico y regulatorio. 	No existe una estrategia única para la gobernanza y de cooperación que trabaje en todo el estado. Las estrategias deben ser apropiadas y específicas para la ubicación y las partes involucradas.
2. Financiación e incentivos	¿Cómo se financiará el proyecto y se compensará a los propietarios?	<ul style="list-style-type: none"> • Fuente de financiamiento disponibles • Incentivos al propietario o programa de compensación • Cuantificación de la recarga. 	Es muy importante asegurar los fondos para estudios, proyectos piloto, operación y mantenimiento. En general estos proyectos son financiados por entidades locales con apoyo estatal mediante préstamos.
3. Fuente de agua	¿De dónde vendrá el agua superficial?	<ul style="list-style-type: none"> • Caudales altos • Reservas de yacimientos • Tiempo y volumen de caudal • Cambio de caudales a futuro (pronóstico). 	Su evaluación se fundamenta en información del Plan de Aguas de California. Los factores por considerar para los flujos de recarga son: la cantidad de agua potencialmente disponible y el tiempo que se dispone de ella.
4. Transporte	¿Cómo llegara el agua superficial al sitio?	<ul style="list-style-type: none"> • Infraestructura existente • Infraestructura nueva 	Evaluación de medios para transportar el agua al área de recarga. Importante operaciones y capacidad de las instalaciones para maximizar el proceso.
5. Idoneidad del emplazamiento	¿Dónde están los posibles sitios para la recarga?	<ul style="list-style-type: none"> • Idoneidad del suelo • Idoneidad de los cultivos • Idoneidad del acuífero • Capacidad del acuífero • Calidad del agua del acuífero • Calidad de agua de zona de aireación o vadosa. 	Para identificar la idoneidad es indispensable conocer parámetros físicos, capacidad y velocidad de infiltración y características de los suelos
6. Métodos de Recarga	¿Cómo llegara el agua al subsuelo?	<ul style="list-style-type: none"> • En el campo • Terreno libre o en desuso • Cuenca especializada • Inyección directa. 	2 métodos para la recarga: Recarga activa (recarga directa e inyección de acuíferos) y Recarga en el lugar.
7. Uso de las aguas subterráneas	¿Cómo se recuperará el agua subterránea o se utilizará de otra manera?	<ul style="list-style-type: none"> • Pozos de extracción de agua subterránea • Usos beneficios • Incremento de aguas subterráneas para reposición/restauración 	Para identificar el porcentaje de recuperación del agua recargada se debe tener redes de monitoreo, herramientas de modelos de aguas subterráneas y herramientas contables.
8. Análisis y Viabilidad (Proyecto Piloto)	¿Es el proyecto viable?	<ul style="list-style-type: none"> • Beneficios y beneficiarios • Costos e impactos • Acuerdos y garantías 	En este análisis se requiere el proyecto piloto y evaluación de factibilidad que aseguren los beneficios potenciales.

5.2.1 Gobernanza y coordinación

La gobernanza es el factor más incidente en el desarrollo del proyecto, se fundamenta en identificar las necesidades y oportunidades en el área para fomentar acuerdos entre las entidades y personas involucradas. También implica identificar y manejar el proceso de permisos respecto al recurso hídrico, además de coordinar estratégicamente operaciones y ajustes planificados en tiempo real. En California la infraestructura del agua es propiedad, operada y mantenida por muchas entidades locales, regionales, estatales, tribales y privadas lo que genera un desafío para su gestión, las decisiones deben coordinarse a través de los límites jurisdiccionales, sectores del agua, intereses, usos y límites hidrológicos (DWR, 2018).

Para la gobernanza y la cooperación no hay un único planteamiento con el cual se trabaje en todo el estado, puesto que las estrategias deben considerarse favorables según la ubicación y las partes involucradas. La participación voluntaria de propietarios, la cooperación de muchas entidades y tener disposición de toma de decisiones y acuerdos es indispensable (DWR, 2018).

5.2.2 Financiación e incentivos

Los fondos de financiamiento deben ser seguros y suficientes para cubrir estudios e investigaciones, proyectos piloto, operación y mantenimiento. Normalmente estos proyectos son financiados por entidades locales con apoyo estatal mediante préstamos, y para desarrollo a gran escala se debe incluir el programa de incentivos para propietarios de terrenos privados.

5.2.3 Fuente de agua

La valoración de las aguas superficiales disponibles para la reposición de acuíferos se realizó por medio de registros en eventos de alta precipitación que superan las demandas y flujos base, en su análisis también es importante considerar los beneficios y riesgos asociados a la recarga, con el objetivo de no tener efectos adversos en ningún hábitat.

Los factores más relevantes para considerar los flujos de recarga son: la cantidad de agua potencialmente disponible, el tiempo que se dispone de ella, algunos flujos son requeridos para beneficios ambientales y para operaciones de embalses. Es esencial realizar proyecciones de análisis con los impactos del cambio climático, lo que podría generar cambios en la gestión del agua (DWR, 2018).

5.2.4 Transporte

En los proyectos se debe identificar infraestructuras o sistemas de riego que puedan ser utilizados para el transporte del agua a la zona de recarga. Si no existen generan un costo y en ocasiones restringe el desarrollo de Flood MAR, por eso es importante evaluar las operaciones y capacidades de las instalaciones para maximizar el proceso.

5.2.5 Idoneidad del emplazamiento

El lugar idóneo potencial para recarga de acuíferos requiere de conocer parámetros físicos del medio según el mecanismo y método a utilizar, algunos de ellos son: La capacidad y velocidad de infiltración, con la caracterización de sedimentos para adecuación de los suelos. Para su análisis se utilizan herramientas, pero además se requiere inspección de la zona específica y profesionales idóneas con experiencia en la zona.

En California han avanzado en herramientas de índices de idoneidad de recarga muy útiles como: Índice de almacenamiento de agua subterránea agrícola del suelo (SAGBI); Mapas integrados profundos y poco profundos que incorporan suelos, cobertura vegetal, geología y herramienta AquaCharge para planificación de recarga de acuíferos para servicios urbanos y otras (CSIRO, 2020).

- Uso del suelo y compatibilidad con cultivos: El uso del suelo es un insumo para el análisis en la técnica de Flood MAR, actualmente hay desafíos en la investigación de la zona de la raíz del cultivo respecto a su tolerancia para no causar pérdidas en el desarrollo de la siembra. Según el tipo de cultivo se identifican los fertilizantes y pesticidas para evaluar la afectación en el acuífero.
- Idoneidad del acuífero: Las áreas potenciales de recarga dependen de las características de los suelos y la profundidad del acuífero, la estructura geológica que controla la velocidad, el movimiento y la capacidad del agua subterránea para viajar a través del sistema del acuífero. Esta caracterización detallada es un aporte muy útil que aporta a la optimización de la recarga. En California se reconocen que los acuíferos no confinados se recargan naturalmente en estaciones del año, que lechos impermeables discontinuos favorecen los flujos laterales y los acuíferos confinados disponen de muchos años para su recarga (CSIRO, 2020).
- Capacidad de almacenamiento de agua subterránea disponible: Esta capacidad está definida según el volumen disponible de la zona no saturada en acuíferos no

confinados y a poca profundidad. Las mayores capacidades se evidencian en cuencas con niveles de explotación alta y nivel freático bajo.

- **Calidad del agua:** La calidad del agua es exigente según el uso, cuando se inicia el proyecto la información base, la valoración y el monitoreo local son indispensable para el agua dentro el acuífero y el agua superficial para recargar, además de la caracterización de la zona vadosa según su composición y características ya que también puede incidir en la calidad final del agua. Los componentes de interés para evaluar en general son sólidos disueltos totales, boro, arsénico, plomo, nitratos y sustancias orgánicas (CSIRO, 2020).

5.2.6 Métodos de recarga.

La estrategia se basa en utilizar grandes superficies de tierras en diferentes usos como agrícolas, tierras de barbecho, paisaje de trabajo o grandes espacios para el proceso de infiltración aprovechando la infraestructura del riego.

- **Recarga Activa:** Infiltración directa hacia el acuífero no confinado como piscina de percolación e inyección de acuíferos que se adecua a áreas pequeñas.
- **Recarga en el lugar:** Son fuentes alternativas para el usuario, buscando limitar el consumo del acuífero para incrementar el potencial y mejorar los niveles (DWR, 2018).

5.2.7 Usos de las aguas Subterráneas

El uso de las aguas subterráneas se define según la necesidad del proyecto y se considera favorable cuando un alto porcentaje del agua recargada pasa a ser recuperable. Para determinar el porcentaje recuperable se necesitan modelos de aguas subterráneas, herramientas de contabilidad y redes de monitoreo.

5.2.8 Análisis de viabilidad

En el último paso de revisión de viabilidad se requiere del proyecto piloto y estudio de factibilidad que den soporte para comprobar los beneficios e impactos del proyecto a nivel visual, ambiental y económico, también se proyectaran costos de construcción, operación y mantenimiento. El objetivo del análisis de viabilidad es tener claro las limitaciones, preocupaciones, costos y comparaciones de nivel beneficios (DWR, 2018).

5.3 HERRAMIENTAS Y MÉTODOS PARA EL ANÁLISIS TÉCNICO.

Las herramientas técnicas en la integración de la gestión de las aguas subterráneas y superficiales son muy productivas, aunque a nivel cuenca faltan técnicas analíticas para contribuir a la toma de decisiones para una gestión coordinada. Flood MAR propone explorar el análisis de cada elemento en aguas superficiales y subterráneas, por medio de la utilización de la herramienta para cuantificar beneficios y evaluar riesgos, proporcionando análisis para superar la escasa información de algunos sitios. Los puntos de análisis para las consideraciones técnicas se pueden observar en la Figura 3, representado por un diagrama de flujo.

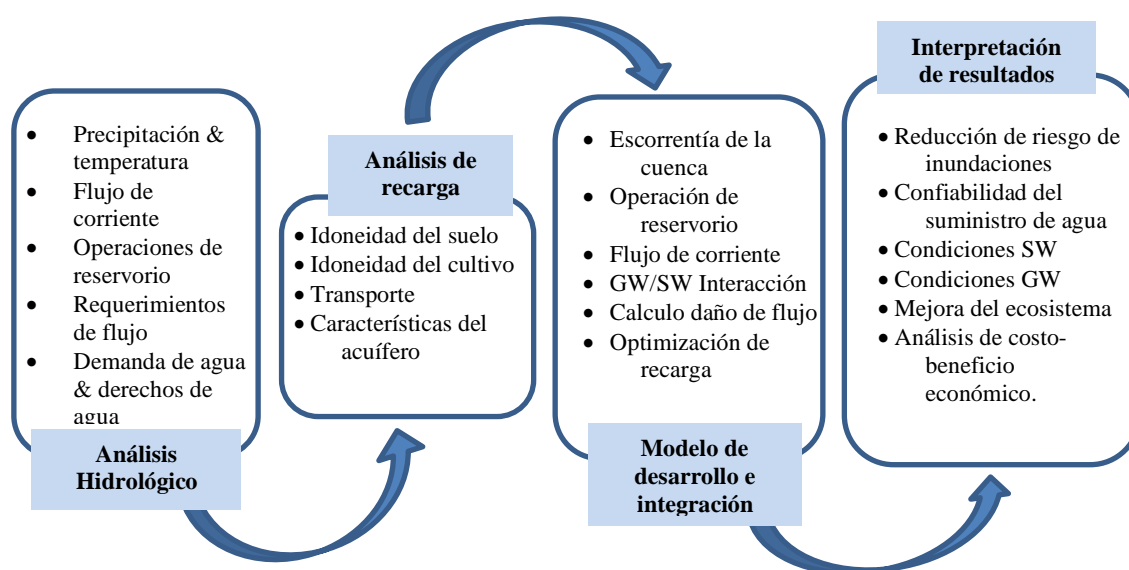


Figura 3. Herramientas y Métodos analíticos (Modificado de DWR, 2018).

5.3.1 Análisis hidrológico

Este análisis se basa en determinar el agua superficial disponible para la recarga, con datos de caudales de inundación, cuantificación de demandas e información necesaria para su evaluación. El resultado del análisis hidrológico es un aporte al modelo de aguas subterráneas e inundaciones y que sumado al análisis de datos de precipitación y temperaturas se visualiza los posibles impactos del cambio climático en el recurso a futuro.

5.3.2 Análisis de recarga

Esta fase busca identificar las mejores zonas de recarga, mediante recopilación de información y creación de mapas teniendo presente el uso del suelo, las características litológicas y condiciones del acuífero, también es preciso saber el método para recarga, sistemas de capacidad y transporte para que el agua llegue al sitio. Es importante evaluar

modelos que integren y calibren la información para medir las estrategias de Flood MAR y determinar costes de aplicación (DWR, 2018).

En California se realiza investigaciones frente al tema agrícola para revisar la idoneidad del sitio mediante tipo de cultivos, propiedades de la tierra para complementar información a la hora de evaluar la recarga. Herramientas como (Evaluación de las recargas de aguas subterráneas) GRAT aportan datos sobre la saturación de la zona de raíz, efectos de rendimiento y prácticas agrícolas y otros como Model Groundwater-Surface Water Simulation Model (FM2 Sim), se basa en el análisis de un sistema local para comprender la interacción, incluyendo los efectos del cambio climático, interacción del arroyo/acuífero y extracción, destino final del agua de recarga (CSIRO, 2020).

La integración del modelo implica la selección y aplicación de las mejores herramientas para comprender cada componente y cuantificar los beneficios potenciales, lo que exige una recopilación de información, control de calidad en la entrada y salida de datos, configuración, ejecución y el funcionamiento de los modelos (DWR, 2018).

En la Figura 4, Se observa la dinámica de los procesos en 3 niveles de análisis, con la finalidad de realizar seguimiento a riesgo de inundación, condiciones de aguas superficiales y subterráneas, y gestión del ecosistema.

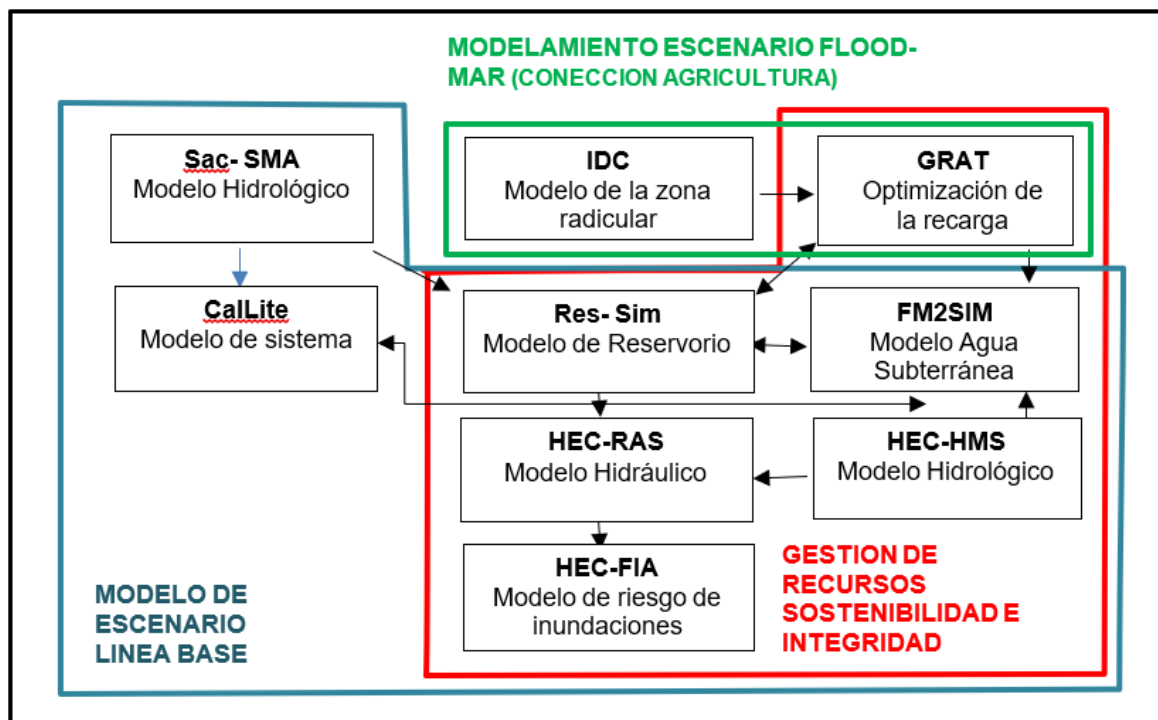


Figura 4. Flujo del Proceso sobre el Desarrollo e Integración del Modelo (Modificado de DWR, 2018).

NIVEL 1: Modelo del escenario de la línea base; Se utiliza modelo de escorrentía de cuencas (Sac-SMA), con datos de temperatura y precipitaciones, se calcula cantidad de agua que ingresa, se almacena y sale, pasando a un modelo de evaluación de gestión (cal lite) para realizar una mejor percepción de las operaciones del sistema de agua. Con la información de (Sac-SMA), sumado al modelo de reservorio (Res Sim) se consideran operaciones de embalses y gestión de inundaciones. Los datos anteriores se analizan con un modelo hidráulico (HEC-RAS), donde se simula flujos, niveles de agua con obras hidráulicas para obtener un modelo de riesgo de inundaciones (HEC-FIA), que evalúa consecuencias económicas, agrícolas y de personas. Con la información del modelo de reservorio se construye el modelo de aguas subterráneas (FM-2sim) en interacción con aguas superficiales y para la simulación de procesos completos en cuencas hidrográficas se utiliza HEC-HMS.

NIVEL 2: Modelamiento escenario Flood MAR; Con la información obtenida en el nivel 1, adicionado al análisis de la optimización de recarga GRAT, la cual integra datos agronómicos, con la ayuda del modelo de zona radicular (IDC) se define niveles de saturación compuesto del suelo y cultivo para conocer la duración de la recarga y mantener niveles oxígeno óptimos en las plantaciones.

NIVEL 3: Gestión de recursos (sostenibilidad e integridad): Finalmente procesada y relacionada la información del nivel 1 y 2, se busca identificar un escenario robusto donde se evalúan los beneficios de Flood MAR como riesgo de inundación, agua de superficie y subterránea, suministro y ecosistema, estos resultados de la integración son base principal para el análisis económico.

5.3.3 Interpretación de resultados

El resultado de la interpretación es la integración de los diversos modelos utilizados para el análisis de la estrategia y observar sus beneficios o efectos adversos. El análisis se representará en indicadores para ayudar a determinar el potencial, la eficacia y la viabilidad de la implementación de Flood MAR y se considera el seguimiento de 4 categorías:

1. Riesgo de inundación: Se definen eventos del caudal y condiciones del embalse.
2. Condiciones de aguas superficiales: Define el volumen de recarga.
3. Condiciones de aguas Subterráneas: Incremento de nivel freático.
4. Gestión del ecosistema: Se evalúa beneficios y riesgos potenciales (DWR, 2018).

6. AGUAS SUBTERRÁNEAS EN COLOMBIA.

Colombia es un territorio favorecido en cuanto a la oferta hídrica por la ubicación geográfica, la geología, la variación topográfica, y el régimen climático. Esta riqueza hídrica se visualiza en una gran red fluvial superficial interconectada con cuerpos de aguas lenticos, enormes humedales y sistemas de agua subterránea (IDEAM, 2010). Esta condición hídrica favorable no es igual en todas las regiones del país, ya que está sometida a variaciones climáticas locales y globales que condicionan la disponibilidad del recurso hídrico, generando zonas con déficit importante de agua y otras con excedentes. Para generar un análisis a esta situación de extremos en el país, es importante identificar la información oficial base, y la caracterización de las aguas subterráneas en el territorio.

La base principal de información oficial son los Estudios Nacionales el Agua ENA, donde está caracterizado las 16 provincias hidrogeológicas y 61 sistemas de acuíferos en todo el territorio colombiano. El último informe de ENA es del año 2018 y contiene información sobre el estado de las aguas superficiales, las aguas subterráneas, el uso y calidad del agua (IDEAM, 2015).

El análisis para la implementación de Flood MAR se realizará con la cuenca de los Llanos orientales ubicados en la región de la Orinoquía Colombiana, zona tropical, muy conocida a nivel petrolífero perforando más de 1730 pozos, con 89 campos productivos algunos muy importantes como Rubiales, Caño Limón y Cusiana - Cupiagua (Sarmiento, 2011).

Esta área geológicamente se diferencia de las provincias cercanas por su evolución tectónica y secuencia estratigráfica, el límite evidente del levantamiento de la cordillera oriental y la espesa secuencia cretácica es la falla de Guaicarano (IDEAM, 2013). Su extensa llanura corresponde a la zona plana que contrasta con el relieve abrupto de la Cordillera oriental adyacente (IDEAM, 1998). En esta estructura geológica se desarrollan acuíferos libres a semiconfinados en los sedimentos aluviales y de terraza y confinados en las rocas sedimentarias arenosas y conglomeráticas que presentan porosidad intergranular (INGEOMINAS, 1987).

Colombia se divide en 16 provincias hidrogeológicas, por su posición geográfica pueden ser montañas e intramontañas, costeras y pericratónicas. La provincia Hidrogeológica pericratónicas, se compone de 3 sistemas de acuíferos en los Llanos Orientales como se observa en la Figura 5. SAP 3.1 ubicado en el departamento del Meta,

SAP 3.2 situado en el departamento de Casanare y SAP 3.3 localizado en Arauca. Sin embargo, aquel con mayor cantidad de estudios corresponde al SAP3.1 (IDEAM, 2013).

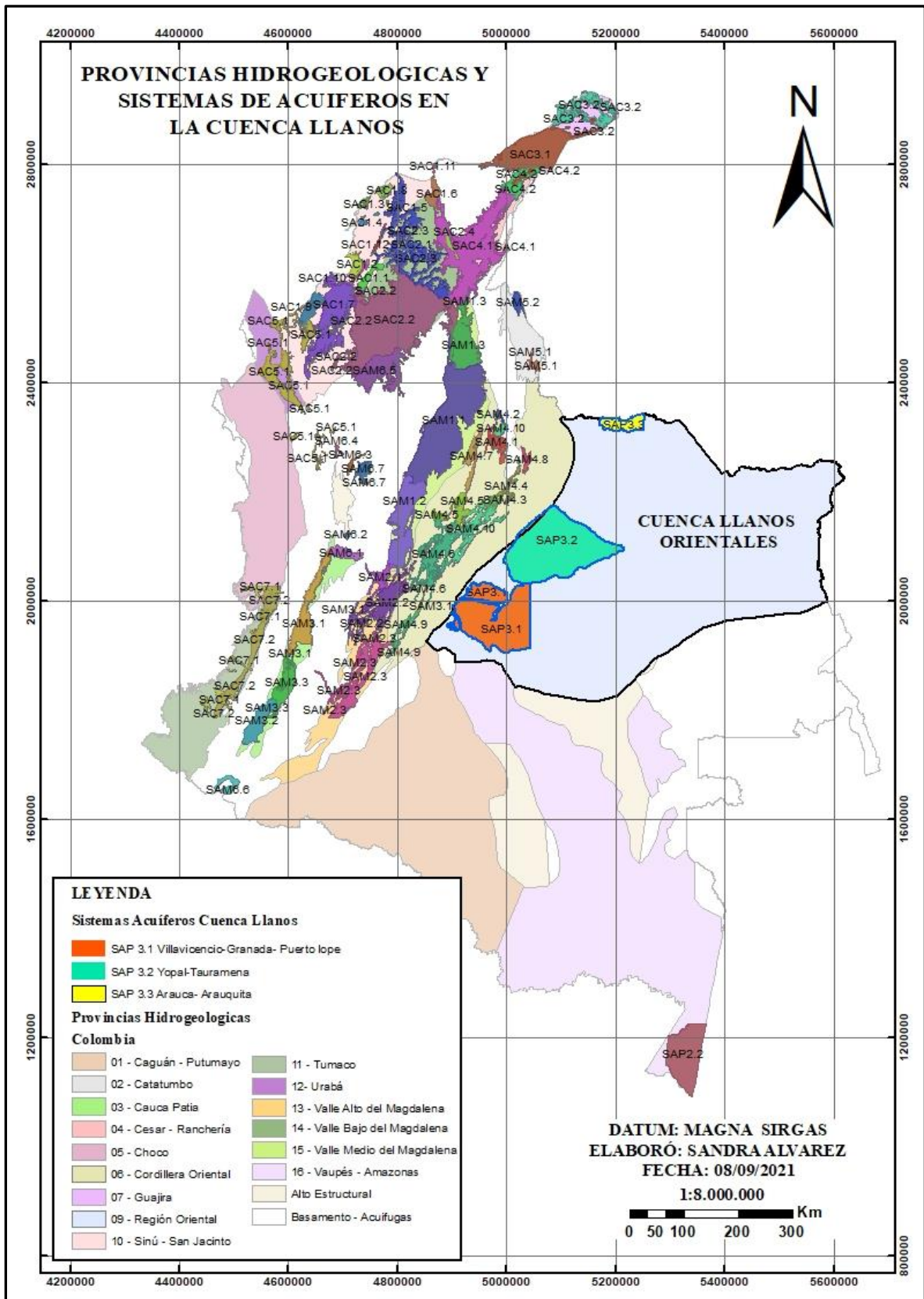


Figura 5. Provincias Hidrogeológicas y Sistemas de Acuíferos en la Cuenca Llanos de Colombia (A partir de SINA, 2021).

6.1 EXPERIENCIAS EN RECARGA ARTIFICIAL EN COLOMBIA.

El nivel de implementación de la recarga gestionada de acuíferos es diferente a nivel global, para los países bajos es una medida de primer orden y con experiencias exitosas, mientras que para países en desarrollo como Colombia esta técnica se visualiza como una medida opcional. No obstante, el interés ha ido aumentando en varios países de América latina, teniendo presente su bajo costo comparado con obras hidráulicas. Las experiencias con esta tecnología han sido favorables considerando un alternativa viable y sólida que contribuye a una gestión más racional del potencial hídrico en una cuenca, pero considerando una factibilidad técnica, institucional, social y económica (Grupo Tragsa, 2019).

En el último año en nuestro territorio, 19 de 32 municipios tenían problemas de desabastecimiento de agua durante la temporada de sequía, esta condición va en aumento y podría empeorar con los posibles efectos del cambio climático. Esta situación genera preocupación y obliga a buscar alternativas para administrar y gestionar el recurso adecuadamente, ya que en futuro el agua subterránea podría convertirse en una reserva estratégica durante largos períodos de sequía (Global Water Security y Sanitation Partnership, 2020). Para formular cualquier estrategia es indispensable consolidar el conocimiento de las aguas subterráneas, por esta razón la última formulación en cabeza de MADS y el IDEAM incorporo el Programa Nacional de Aguas Subterráneas para Colombia PNASUB (IDEAM, 2015).

En el país el proceso de recarga de acuíferos es un tema poco desarrollado pero que vale la pena evaluarlo como alternativa, por esta razón se evaluara si los factores de implementación de Flood MAR aplican en la Cuenca Llanos, puesto que según estudios se indica que, en esta década, el estrés hídrico afectara a las Macrocuencas del Orinoco y el Caribe y para la década de 2030, Magdalena-Cauca, Amazonas y Pacífico podrían contar con mayores riesgos de volverse hídricamente inseguros si no cambian radicalmente la demanda, incentivos instituciones y las dotaciones con el tiempo (Global Water Security y Sanitation Partnership, 2020).

En Colombia solo se tiene registro de 3 de recarga, el proyecto piloto del Acuífero de Morroa -Sucre propuesto como solución a problemáticas de descensos de niveles piezométrico, el Acuífero de Santa Marta por intrusión marina y en la Sabana de Bogotá por problemas de subsidencia. En la Tabla 2. Se realiza una recopilación de las experiencias de recarga en Colombia y sus resultados.

Tabla 2. Consolidado de experiencias de Recarga de Acuíferos en Colombia (A partir de IGRAG, 2016; Perez Lizarazo, 2002; Navarro Mercado, 2020).

EXPERIENCIAS DE RECARGA EN COLOMBIA					
REGIÓN - NOMBRE	TIPO	FUENTE DE AGUA	OBJETIVO	TIPO DE ACUÍFERO	INFORMACIÓN RELEVANTE
Bogotá (Plan Piloto) Acuífero de la sabana (Formación Cuaternario)	Pozos de inyección	Agua de río, aguas pluviales.	Aumentar disponibilidad del recurso controlar la subsidencia del terreno.	Confinado a semiconfinado	<ul style="list-style-type: none"> • Es viable la recarga artificial en el acuífero Cuaternario • Favorable la mitigación de la subsidencia • Facilita la delimitación de zonas subterráneas
Sucre (Plan Piloto)2008 Acuífero Morroa	- Laguna de sedimentación e infiltración - Dos trincheras de infiltración -1 pozo de gran diámetro.	Agua de río, lago, aguas residuales tratadas, aguas pluviales.	Controlar la sobreexplotación (descensos piezométricos)	Confinado a semiconfinado	<ul style="list-style-type: none"> • Trinchera de infiltración y pozo de gran diámetro = Mayor velocidad de infiltración. • La laguna de infiltración = Mayor recarga por volumen. • Se implementó un sistema de recarga permanente: de los niveles inferiores del acuífero surgente es utilizada para recargar niveles superiores del acuífero.
Santa Marta 1998 Acuífero de Santa Marta (Cuenca Rio Manzanares) (1° Prueba)	Barreras y bunds	Agua de lluvia	Aumentar disponibilidad del recurso Controlar intrusión salina	Acuífero libre conectado hidráulicamente al Rio Manzanares	<ul style="list-style-type: none"> •Mejoramiento de condiciones de almacenamiento. •Favorable en la mitigación de la intrusión marina. • Se sugirió la recarga para el plan maestro de aguas subterráneas. •Uno de los aspectos importantes es el mantenimiento programado.

El resultado de las experiencias piloto de recarga de acuíferos es positivo, porque se logra parcialmente la recuperación de los acuíferos, sin embargo, en los tres casos se llegó a la conclusión que esta técnica tiene que ser parte de un plan integral de gestión del recurso hídrico ya que el régimen de bombeo es mayor al volumen de recarga.

El proyecto piloto del acuífero de Morroa y el de Santa Marta están registrados en la página IGRAG como proyectos MAR en Colombia, actualmente se están desarrollando más estudios frente a esta técnica como en el acuífero de la Isla de San Andrés.

6.2 CONDICIONES DE LA REGION LLANOS PARA EVALUAR FLOOD MAR.

El análisis se realizará para la cuenca de los llanos orientales, ya que su biodiversidad es indispensable para lograr mantener la integridad ecológica del país y a nivel Latinoamérica. En esta área se concentra el 30% del agua dulce del país y está afectada por sobreexplotación y cambios de uso que ponen en peligro importantes ecosistemas (Alexander Von Humboldt, 2011).

En los últimos años la región ha sido atractiva para proyectar oportunidades económicas frente a la agricultura productiva, desarrollo de multicultivos e industrias, sin embargo, es importante revisar las limitaciones y problemáticas que aquejan esta región ya que basado en información del Banco mundial del agua para esta década la Macrocuencas del Orinoco tiene una alta incidencia de afectación frente a la disponibilidad del recurso hídrico. A continuación, se exponen las problemáticas de la cuenca para evaluar la aplicación de Flood MAR.

Riesgo de inundaciones: Las inundaciones en el país se producen de manera fluvial, producto de desbordamientos de ríos y pluviales por aumentos de precipitación, son fenómenos naturales de la dinámica propia de cuerpos de agua, pero se configura un problema cuando el desarrollo de sistemas como infraestructura o agrícola interviene.

La cuenca de los llanos tiene un régimen de lluvias monomodal, donde la época de altas precipitaciones se presenta de abril a noviembre y una temporada seca de diciembre a marzo. Estos cambios climáticos y las características de su condición de llanura generan dos eventos extremos, en invierno inundaciones con alta afectación en cultivos e infraestructuras y una temporada fuerte de sequía con desabastecimiento de agua para la población y el medio ambiente. En el periodo de 2010 y 2014, mediante estudios se identificaron que 190.935 km² de área tienen condiciones favorables a la inundación en el territorio colombiano, de los cuales el 31% del área total pertenece a la Orinoquía, las características de planicie, cobertura vegetal y presencia de morichales favorecen mantos de agua con diferentes estacionalidades (The Nature Conservancy, 2021). Siendo catalogada como el área hidrográfica de mayor superficie con potencial inundable en el país, es un recurso que se puede evaluar considerando las excedencias hídricas a favor en las temporadas de invierno para la implementación de la recarga por medio de inundaciones como se identifica en la figura 6.

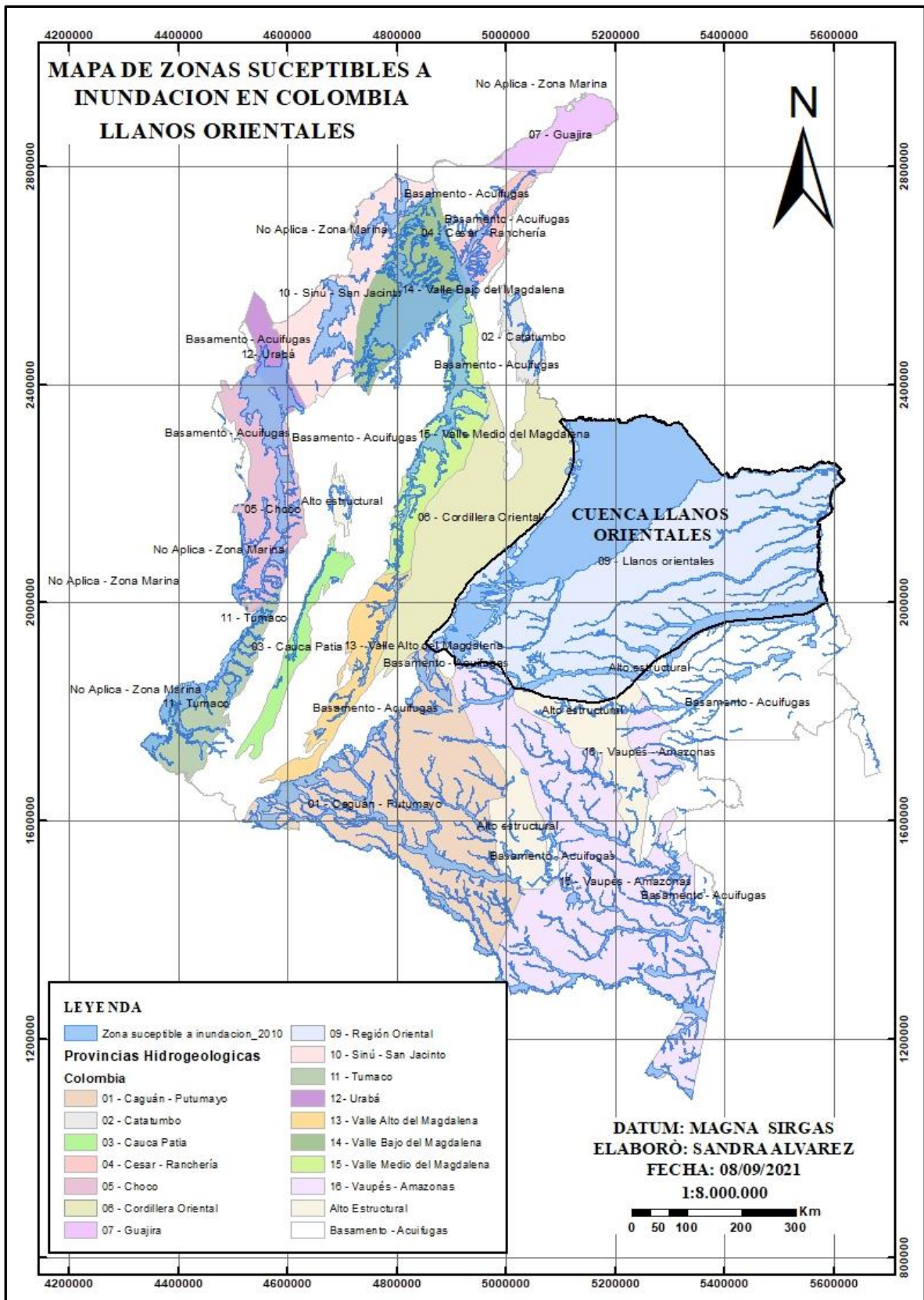


Figura 6. Mapa de Zonas Potencialmente Inundable en Colombia (A partir de SINA, 2021).

Riesgo de sequía: Otro de los eventos naturales en esta cuenca son las sequías extremas, normalmente se presentan de diciembre a marzo, pero en los últimos años su intensidad esta aumentado. Según los pronósticos del IDEAM sobre el aumento de temperatura media del orden de 0.13 ° C y la proyección de expansión agropecuaria, la disponibilidad del agua superficial se reduciría en un 40%. Este escenario sumado a la falta de gestión de las cuencas hídricas e intensos procesos de deforestación afecta gravemente la disponibilidad del recurso para comunidades, agricultura y ecosistemas. A nivel país este tema no se ha desarrollado, los datos son carentes debido a la falta de estaciones de medición, y la poca investigación de estos eventos (Vargas Martinez, 2005; The Nature Conservancy, 2021).

En los últimos 10 años, el verano más fuerte sobre esta región fue en 2014, según los reportes la población de Paz de Ariporo sufrió desabastecimiento, murieron por deshidratación alrededor de 25000 animales y un fuerte efecto en ambientes como esteros, abrevaderos naturales impactando severamente la biodiversidad (BBC NEWS, 2014). Este nivel de afectación podría ser el resultado del evento de sequía local coincidente con el evento del Fenómeno del niño (Ver Tabla 3).

Es importante resaltar que la Orinoquía y Amazonía presentan eventos de sequía a nivel nacional no coincidentes con los fenómenos del niño como se observa en la Tabla 3, lo que da lugares de investigación para obtener un análisis más preciso.

Tabla 3. Comparación de eventos de Sequías locales y Fenómeno del Niño (Modificado de IDEAM, 2018).

Eventos históricos de sequías en Colombia vs. Eventos de El Niño, con base en el ONI.	
Eventos de sequía Nacional	Eventos "El Niño" ENSO
1982-1983	MAM 1982-MJJ 1983
1985	No coincidente
1987-1989	ASO 1986-EFM 1988
1990-1992	AMJ 1991-MJJ 1995
1994-1995	AMJ 1997-AMJ 1998
1997-1998	MJJ 2002-EFM 2003
	JJA 2004-EFM 2005
	ASO 2006-DEF 2007
2009-2010	JJA 2009-FMA 2010
2013	No coincidente
2014-2016	OND 2014-AMJ 2016

Demanda de agua para sectores agrícolas: La demanda hídrica sectorial corresponde al 12,9% del consumo nacional, los mayores sectores usuarios del recurso son: agricultura con el 34,7% del total de la demanda hídrica de la cuenca, energía con el 22,9%, piscícola 13,3%, pecuario 10,30%, hidrocarburos 8,93% y el sector doméstico con 4,2% (The Nature Conservancy, 2021). Basados en la información anterior la mayor demanda de agua en esta área obedece al sector agrícola, donde actualmente predominan plantaciones caucheras, palma africana o aceite de palma, caña de azúcar y cereales, pero con proyección a impulsar su crecimiento económico basados en un modelo agroindustrial. Las condiciones agroclimáticas, dominadas por las precipitaciones son suficientes para cultivos de secano que se concentren en los meses de marzo, abril y mayo, pero durante tiempo de sequía disminuyen el nivel de los ríos y el agua subterránea es insuficiente para responder a la demanda agrícola y proteger el flujo ambiental mínimo.

Una de las dificultades para el progreso y modernización del sector agropecuario es la falta de infraestructura de riego para la administración del recurso, esta condición perturba la ejecución de grandes proyectos (Federación Nacional de Arroceros, 2011).

Riesgo de la conservación de la biodiversidad: La Región de la Orinoquia comprende la mayor extensión de las sabanas naturales del país con gran biodiversidad. Las consideraciones de expansión agropecuaria en el modelo hidrológicos al 2040 supone un 40% de reducción en la disponibilidad del recurso que, sumado a los impactos del cambio climático, actividades antrópica y mala gestión de las cuencas ponen en peligro la conservación de la biodiversidad (The Nature Conservancy, 2020).

La falta de datos, seguimiento y análisis de información en esta materia se consideran una amenaza ya que implican inseguridad hídrica y desconocimiento que hace más vulnerable el cuidado de los ecosistemas. Esta condición crea la necesidad de dar orientación estratégica al conocimiento, uso y manejo a los acuíferos que corresponden a un total de 33,000 km², una de reservas más grandes del agua subterránea en el país. Esta reserva no es ilimitada y está sujeta a problemas de agotamiento y contaminación cada vez mayores (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020).

Problemática social: La región de la Orinoquia estuvo demarcada por tiempo de violencia donde grupos al margen de la ley gobernaban y disponían de estas tierras impidiendo su desarrollo. Tiempo después cuando se logró su recuperación, se implementó el plan de gobierno de la restitución de tierras y reparación de víctimas, con el objetivo de impulsar esta región a la productividad agrícola, sin embargo, para cumplir los planes de

desarrollo el gobierno debía realizar inversiones en infraestructura de riego, y planes gestión en el recurso hídrico teniendo presente los regímenes de lluvia y las condiciones climáticas, para así lograr la disponibilidad de agua en toda la región y durante todo el periodo del año.

Las poblaciones asentadas allí se caracterizan por elevados índices de pobreza, déficits cualitativos de vivienda, menores coberturas de acueducto y alcantarillado, mayores rezagos y índices de ruralidad (PNUD, 2011).

Falta de conocimiento de los recursos hídricos: La falta de conocimiento es una problemática a nivel país, sin embargo, el proyectar un plan de recarga de acuíferos obligaría a generar exploración y aprovechar este conocimiento en pro de generar gestión en muchos aspectos. Según clasificación del IDEAM el nivel de conocimiento de los sistemas de acuífero para la provincia hidrogeológica PP1 Llanos Orientales es insuficiente para una adecuada gestión de las aguas subterráneas. Existe poca información frente al comportamiento hidrogeológico, dinámicas de flujo (zonas de recargar, tránsito y descarga), modelos de integración entre aguas subterráneas, superficiales e información cuantitativa de uso del agua (IDEAM, 2013). Para esta cuenca están caracterizados 3 sistemas de acuíferos de los cuales el SAP 3.1 Villavicencio -Granada-Puerto López, está catalogado con información suficiente, SAP 3.2 Yopal-Tauramena tiene una actualización en ENA 2018 y SAP 3.3 Arauca-Arauquita, información insuficiente.

Adaptación al cambio climático: La cuenca llanos está caracterizada por ecosistemas estratégicos altamente vulnerables al cambio climático y con baja capacidad de resiliencia, el impacto de estos ecosistemas naturales afecta directamente en la disminución de la capacidad de infiltración del suelo, impidiendo la recarga natural de los acuíferos y la retención de humedad en suelos forestales, además de la degradación de ecosistemas de humedal. Según la información del Plan Regional Integral de Cambio Climático para la Orinoquía PRICCO, se proyectan incrementos de temperatura mínima (entre 0.3°C-1.8°C) y máxima (0.8°C – 1,9°C); probables sequias y también excesos de lluvia (sobre los 90 mm) que aumentarán y serán más frecuentes en zonas de sabanas inundables (The Nature Conservancy, 2021).

Uno de los sectores más amenazados es la biodiversidad, pero también en la producción agropecuaria por falta o exceso de lluvias asociados a costos, riesgo muy alto para toda la región en seguridad alimentaria, escasez del recurso hídrico para la población y riesgo en la salud por aumentos en proliferación de nuevos vectores (CORPORINOQUIA, 2016). Para el análisis de la vulnerabilidad al cambio climático, se requiere datos e

información que no se tiene en la actualidad, por tal motivo se trabaja con modelos de referencia global que definen 3 consecuencias del impacto en la región de los llanos: la desertificación de las zonas por cambios en las precipitaciones; cambios del régimen hidrológico en llanuras de inundación y variación de especies vegetales en cuanto a su distribución geográfica (Alexander Von Humboldt, 2011).

Prevención y mitigación de riesgo: Colombia está catalogado con una alta exposición a riesgos naturales y bajo nivel de respuesta, sus características geográficas y condiciones climáticas favorecen para clasificar el 12% del territorio nacional como zonas inundables y se incrementa en 28% en épocas de altas precipitaciones. El aumento de población sin una adecuada planificación, actividades antrópicas y efectos del cambio climático configuran un escenario propicio de eventos de inundación.

Esta categorización obliga a evaluar e identificar zonas de vulnerabilidad para formular planes de emergencia y atención de desastres basados en modelos matemáticos y productos cartográficos donde se identifique la amenaza de inundación. En una escala local y regional, los estudios de las inundaciones buscan proporcionar información sobre la amenaza y riesgo, para desarrollar los procesos de ordenamiento y planificación del territorio con criterios que permitan prevenir y mitigar el riesgo de sus pobladores o de la infraestructura expuesta de acuerdo con lo establecido en la Ley 1523 de 2012 y en el Decreto 1077 de 2015 (Decreto 1807 de 2014) (MADS, 2021).

Degradación de suelos y tierras: Este es un fenómeno que avanza en nuestro territorio silenciosamente, el 50% de tierras presentan degradación por procesos erosivos, el 5% por salinización y el 24% expuesto a desertificación por impacto de baja fertilización y contaminación. La cuenca llanos en la zonificación de suelos degradados por erosión del IDEAM presenta un nivel de moderado a ligero, estado que según modelos del cambio climático aumentara, poniendo en riesgo la seguridad alimentaria, ciclos hidrológicos, la biodiversidad e impactos negativos en la sociedad (IDEAM, 2012). El proyecto de Flood MAR podría ser aliada para la evaluación, control y solución a esta problemática, ya que el agua es el factor principal para cambiar su condición de las tierras, mantener ecosistemas y promover una sostenibilidad económica y social.

6.3 EVALUACION DE FACTORES PARA IMPLERAR FLOOD -MAR EN LA CUENCA LLANOS.

6.3.1 Gobernanza y Coordinación:

En Colombia el tema de la gobernanza está en proceso de desarrollo a nivel local, regional y nacional buscando una mejor gestión de los recursos hídricos, está estructurado desde el Estado Colombiano, encabezado por el Presidente de la Republica y bajo la dirección del mismo se encuentran los 16 ministerios, dentro de los cuales está el Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible MADS, encargado de la gestión del ambiente y recursos naturales renovables, dirigiendo el Sistema Nacional Ambiental -SINA- organizado de conformidad con la ley 99 de 1993 y apoyado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM como establecimiento público para apoyo a nivel técnico y científico.

Para el apoyo de SINA, se creó el Sistema de Información de Recursos Hídricos SIRH, herramienta que integra y estandariza la recolección, manipulación, registro y consultas, modelos, sistemas, estadísticas e información bibliográfica y documental, normatividad y protocolos que facilitan la gestión integral del recurso hídrico considerando las variables como calidad, oferta, demanda y gestión (MADS, 2021).

A nivel nacional en 2018 inicio labores el Consejo Nacional del Agua, conformado por los ministerios de Ambiente, Agricultura, Minas, Salud, el Departamento Nacional de planeación y el IDEAM, como miembro permanente, con el objetivo de promover el desarrollo de planes, programas y proyectos que promuevan la conservación y sostenibilidad del recurso hídrico, uso eficiente y ahorro del agua, mejoramiento de la calidad y gestión del riesgo asociado al recurso hídrico (IDEAM, 2019).

Dentro de las directivas de MADS está la Gestión Integral de Recurso Hídrico GIRH que orienta el desarrollo de las políticas públicas en materia del recurso hídrico, a través de una combinación de desarrollo económico, social y la protección de los ecosistemas, en la Figura 7 se observa el esquema de organización donde se encuentra estructurada la GIRH.

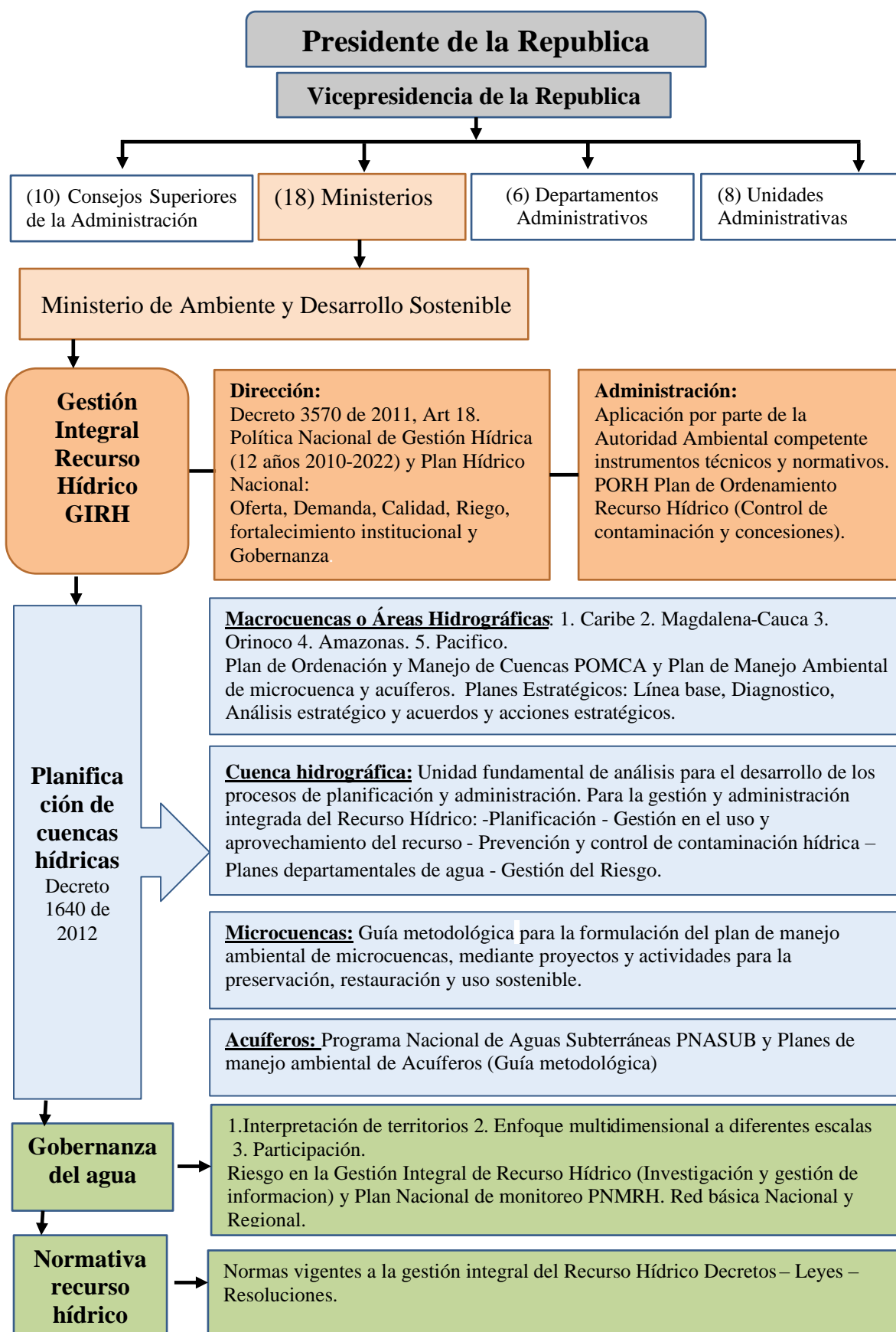


Figura 7. Esquema de la Organización de la Gestión Integral del Recurso Hídrico en el Gobierno de Colombia (A partir de MADS, 2021).

El gobierno colombiano en 2010 inicia con la Política Nacional Hídrica PHN y para el 2012 se aprueba el Decreto 1640, que plantea el esquema de planificación hídrica para las cuencas, microcuencas y acuíferos (creación de concejos de cuenca), creando sistemas de articulación para una gestión integrada e introducir el concepto de la gobernanza. Es importante resaltar que en esta estructura de planificación hídrica se incluyó la gestión del riesgo y la gobernanza motivada por los desastres producidos de las olas invernales que impactaron gravemente el territorio nacional entre los años 2008 a 2011 (Velez Echeverria, Castro Buitrago, & Madrigal Perez, 2019).

Para la PHN, los Consejos de cuenca son la principal expresión jurídica y práctica de la gobernanza del agua en el país, con la participación de actores sociales en el desarrollo de los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuenca POMCA, los cuales tiene mayor jerarquía que los Planes de Ordenamiento Territorial POT.

Con la finalidad de fortalecer la regulación del espacio de cuencas, los lineamientos jurídicos por los cuales debemos regirnos, cuando hablamos de gobernanza son los acuerdos el Acuerdo de Escazú y los estándares formulados para el derecho del agua. El Decreto 1460 del 2012 es la herramienta por el cual se desarrolló jurídicamente la gobernanza del agua, sin embargo, de acuerdo de los lineamientos anteriores se evidencian unos vacíos como:

- La falta de apoyo logístico y financiero de parte del estado para el desarrollo de estos espacios limita la participación a población en condición de vulnerabilidad, se necesita incentivar, promover y facilitar los espacios, materiales, equipos y personal capacitado para estructurar el desarrollo e integrar las ideas. La responsabilidad no debería solo ser trasladada a las autoridades ambientales de la cuenca.
- En cuanto a la participación se ve limitada ya que personas naturales no pueden ser miembros del consejo, pero pueden participar enviando recomendaciones y observaciones por medio de un representante. Esta metodología limita mucho las oportunidades de informar los intereses reales de la comunidad que habita la cuenca.
- No existe un procedimiento para el acceso a la información, por tanto, es importante fortalecer y crear canales de comunicación efectivos donde se informe de manera clara, concisa y oportuna para todos los actores de la cuenca.
- Las disposiciones legales que existe frente a la conformación e integración de miembros limitan actores como movimientos estudiantiles y grupos ambientalistas que realizan actividades importantes en el sector y podían apoyo en la estructura de estos espacios (Velez Echeverria, Castro Buitrago, & Madrigal Perez, 2019).

En Colombia la gobernanza está sujeta a lineamiento, por lo tanto, para que se fortalezca y desarrolle progresivamente es necesario promover y dar participación a los actores tradicionales y comunitarios, para concientizar de la importancia de sus actuaciones y participación en torno a sus deberes, pero al mismo tiempo con la exigencia de sus derechos.

La Política SINAP 2020-2030 es una herramienta para fortalecer a los actores y organizaciones locales a dirigir las distintas iniciativas de conservación para proteger corredores biológicos estratégicos que garanticen servicios ecosistémicos indispensables como el alimento y el agua. En Orinoquia, se exponen foros estratégicos de planificación, seguimiento y monitoreo en conjunto entre el Ministerio, el IDEAM, la corporación autónoma Corporinoquia y los institutos de investigación para atender la falta de conocimiento y fortaleza en la gobernanza, uso y gestión del agua (MADS, 2021).

Evaluando el tema de gobernanza frente al proyecto Flood MAR podemos indicar que en cuanto a la normatividad en Colombia no existe lineamientos ni leyes para el proceso de recarga gestionada de acuíferos, ya que al momento el Ministerio se encuentra revisando la factibilidad de proyectos para concertar con las Corporaciones Autónomas Regionales y proponer una normatividad al respecto. Al día hoy tenemos el Programa Nacional de Aguas Subterráneas (PNASUB), que forma un instrumento de articulación interinstitucional para apoyar las estrategias a nivel nacional y regional garantizando una adecuada evaluación y gestión del agua subterránea.

Las problemáticas en esta región generan la necesidad de una pronta estrategia para la gestión de recurso hídrico, los actores principales de la cuenca como sectores agrícolas, productivos, industriales y habitantes siempre han estado a la espera de planes y estrategias para una solución integral. A manera general se podría decir que la voluntad de la mayoría de los sectores estaría dispuesta pero el estado tendría que fortalecer las bases de la gobernanza del agua desde un marco propuesto legal considerando el derecho humano desde una perspectiva amplia y diversa (Rogers & W Hall, 2003).

6.3.2 Financiación e incentivos

Los proyectos como Flood MAR en Colombia, considerados a gran escala pueden generar costos elevados dados que se requiere presupuesto para personal con experiencia necesaria en modelos y programas, generar información base de análisis para su factibilidad y además de costos en la infraestructura que se requeriría para la distribución de agua a lugares óptimos para la infiltración y sin dejar a un lado los incentivos para los propietarios por ocupación de

las tierras de cultivo. Frente a esta situación es importante buscar fuentes de cooperación multilaterales que puedan financiar proyectos de gran envergadura.

MADS en coordinación con la Agencia presidencial para la cooperación internacional han desarrollado proyectos de fortalecimiento institucional, protección de ecosistemas y de biodiversidad, proyectos para adaptación al cambio climático, manejo y restauración de cuenca, planes de desarrollo territorial y muchos más que han sido clave en la sostenibilidad ambiental. Las fuentes que apoyan programas de gestión integral sostenible, conservación ambiental, gestión de riegos, cambio climático más importantes con las que Colombia podría contar son: El Banco Interamericano de Desarrollo BID, Comisión Europea CE: La Organización de Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO, The Global Environment Facility GEF, Organización de Estados Americanos OEA, WWF Fondo Mundial para el Medio Ambiente, La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura UNESCO (MADS, 2021).

En Colombia existe una dinámica similar en cuanto al programa de compensación, en algunas comunidades ofrecen Pagos por Servicios Ambientales PSA y protección de acuíferos a los agricultores y propietarios que gestionen sus tierras de manera sostenible. El programa PSA piloto se catalogó como instrumento efectivo para la recuperación de ecosistemas donde se benefician todas las partes.

6.3.3 Fuente de agua:

Considerando los excesos de agua en la cuenca llanos, debido a las altas precipitaciones en el primer semestre del año podríamos evaluar el volumen de agua disponible para utilizarlo en proyectos como Flood MAR. Las fuentes de información disponibles para datos hidrológicos y calidad del agua son: IDEAM, Autoridades ambientales y el Instituto Colombiano de Desarrollo Rural INCODER.

La información más relevante y actualizada para este análisis se encuentra en el informe ENA 2018 y registros de estaciones meteorológicas, hidrológicas e hidrometeorológicas en la página del IDEAM, al realizar la consulta a agosto de 2021 de la cuenca llanos encontramos 338 estaciones como se evidencia en la Figura 8, de las cuales 202 están activas, 4 en mantenimiento y 132 suspendidas.

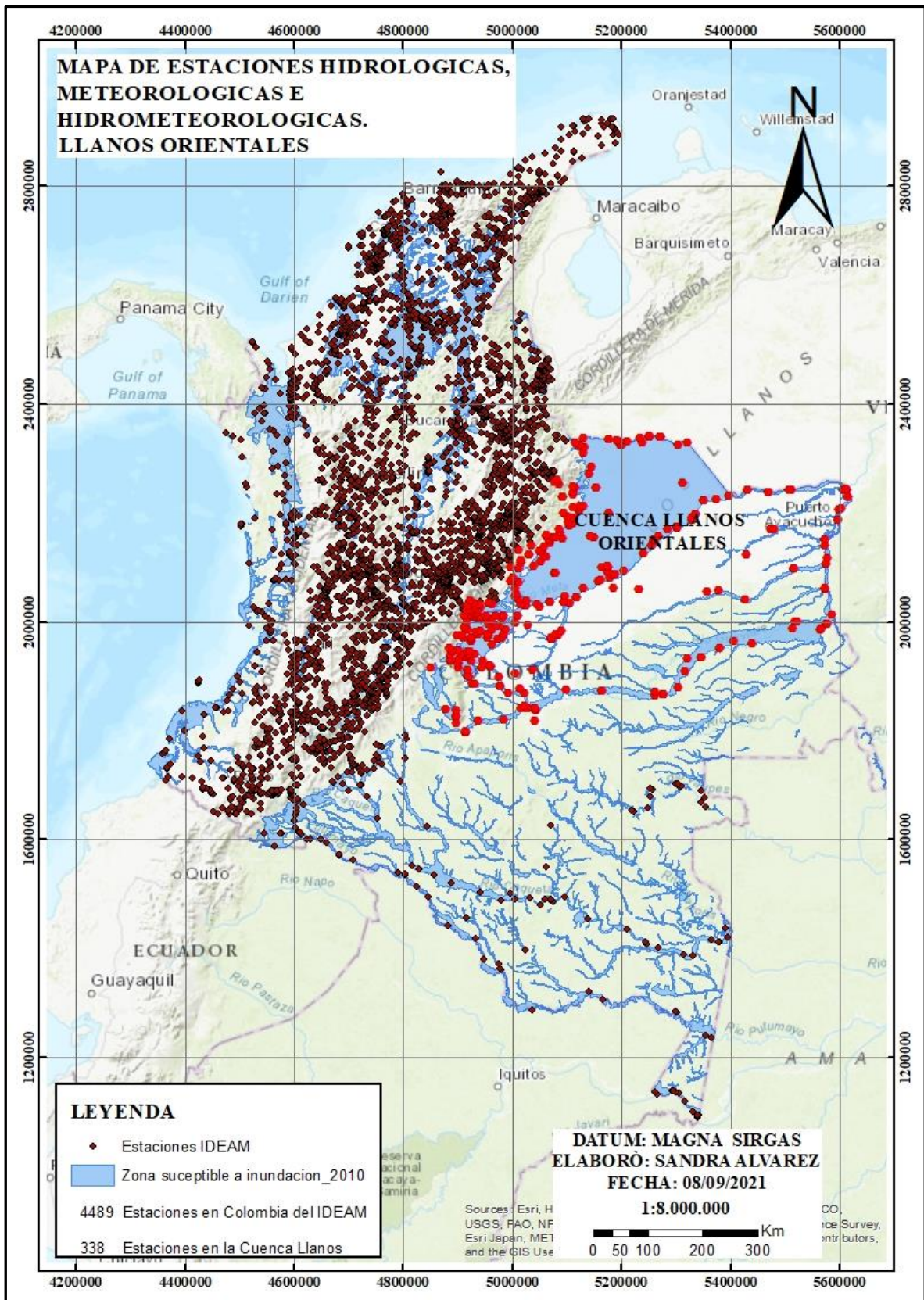


Figura 8. Estaciones hidrológicas, hidrometeorológicas y meteorológicas en Colombia (color café) y para la Cuenca Llanos (color rojo) (A partir de SINA, 2021).

En la figura se evidencia la insuficiente cobertura de estaciones para el área, con mayor incidencia en datos de medición de temperatura y caudales. Al realizar la selección de datos y control de calidad para su uso, la información se reduciría conduciendo a un análisis poco confiable y seguro, la carencia de la información es evidente e incide mucho en variables como la precipitación que requiere de una gran cantidad de estaciones para un mejor acercamiento a la realidad. No obstante, este análisis se puede apoyar en información de modelos de precipitaciones obtenidos por satélites Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations (CHIRPS).

De acuerdo con la información la temporada de altas precipitaciones se produce desde el mes de abril hasta noviembre, pero se debe determinar el tiempo en que se puede disponer del excedente, es decir el flujo que supere las demandas y el flujo base. Además, también es importante realizar análisis con datos de temperatura para proyectar posibles impactos del cambio climático, para lo que podemos utilizar un producto global de ERA 5.

6.3.4 Transporte:

Las condiciones de conflicto armado que vivió esta región generó un estancamiento en la evolución de la producción frente al ejercicio agrícola, y hoy en día aún no se cuenta con la infraestructura suficiente para almacenar agua y transportarla a campos de cultivos. No existen represas ni embalses en esta zona de Colombia. La falta de infraestructura productiva al campo puede generar aumentos significativos en los costos para la implementación de Flood MAR en esta cuenca (CSIRO, 2020).

6.3.5 Idoneidad del emplazamiento:

Identificar un lugar potencial para recarga requiere de información de tipo secundaria en su parte inicial, los datos disponibles estarán en institutos de investigación a nivel nacional, regional, universidades, SGC, IGAC, CORPOICA, Corporinoquia, INVEMAR. Según IDEAM, hoy en día para la cuenca de Orinoquia tiene información de Yopal-Tauramena SAP 3.2; Villavicencio -Granada-Puerto López SAP 3.1, la explotación de aguas subterráneas se extrae de los niveles de Guayabo superior y aguas de producción para campos petroleros de la Formación Carbonera y Mirador.

Para consulta de información oficial se cuenta con el Estudio Nacional del Agua 2018, que se actualiza cada 4 años, este informe brinda conocimiento sobre el estado de aguas subterráneas y superficiales en cuanto a su dinámica, interacción en el medio natural

y a manera particular en zonas hidrográficas. Además, se presentan las proyecciones de uso hasta 2030 a diferentes escenarios (IDEAM, 2018).

Los avances realizados para el año 2018 según el Estudio Nacional del Agua, se evidencian en la formulación del Mapa Nacional de zonas potenciales de recarga MZPR y la actualización de información de 9 sistemas de acuíferos, dentro de ellos SAP 3.2 Yopal–Tauramena (IDEAM, 2018). EL mapa nacional de MZPR, está a escala 1:1.000.000 y se fundamentó en factores como la geología, la pendiente, los suelos y la cobertura vegetal, para la región de los llanos nos indica un potencial de recarga de bajo a medio como se puede apreciar en la Figura 9.

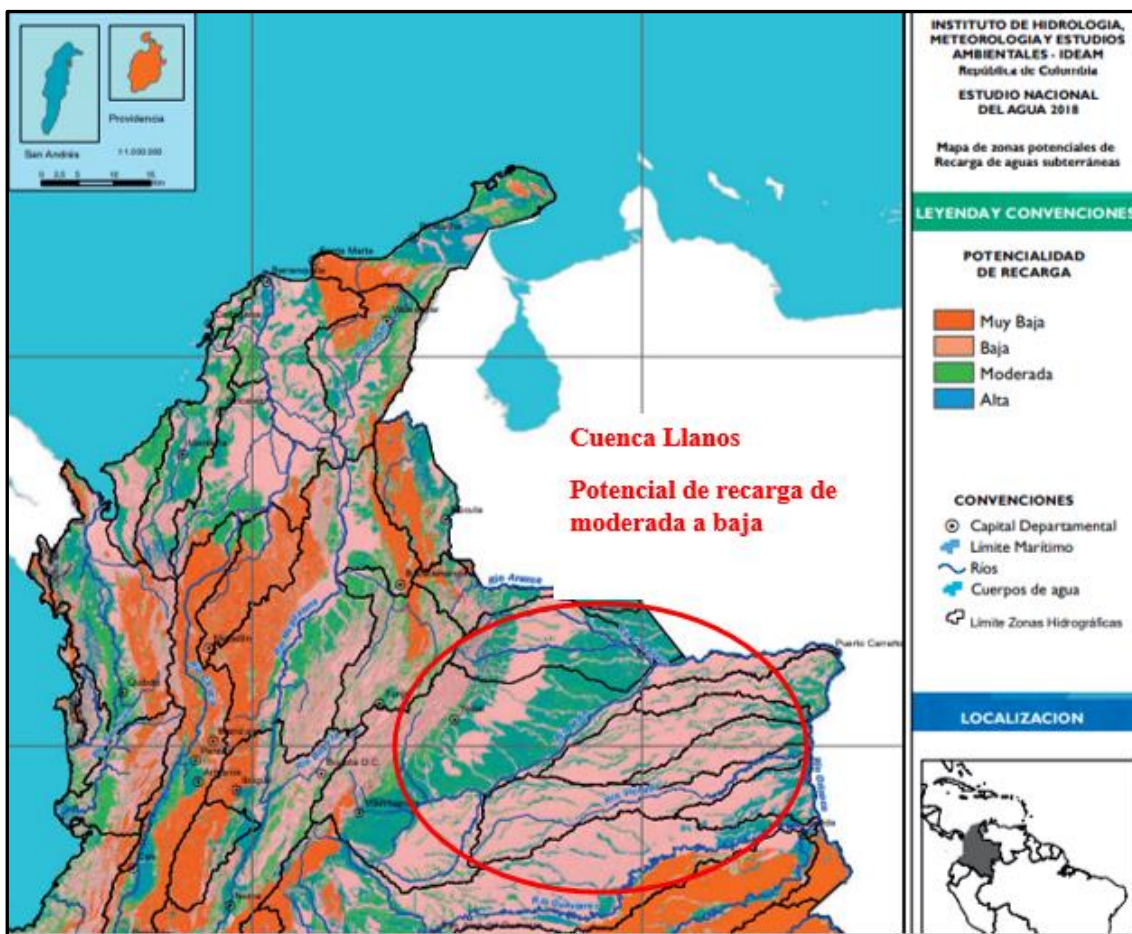


Figura 9. Mapa de Zonas Potenciales de Recarga de Aguas Subterráneas para Colombia MZPRAS (Mofificado de IDEAM, 2018).

6.3.6 Métodos de Recarga:

La primera consideración técnica para la selección del método posible de recarga es el tipo de acuífero, sin dejar a un lado los factores como condiciones hidrogeológicas locales, el área de terreno disponible para la recarga y la calidad del agua, pero están otras variables de impacto como la consideración del costo (CSIRO Chile, 2018).

Basados en datos del IDEAM 2013, y referenciados con los sistemas de acuíferos de la cuenca llanos se identifican acuíferos libres a semiconfinados, con características litológicas detríticas constituidos por sedimentos de Paleógeno - Neógeno y depósitos recientes que tienen conexión hidráulica con los ríos principales en algunos puntos. Para la región de la Orinoquia según la categorización de acuíferos libres a semiconfinados es posible aplicar métodos de distribución, también es favorable por las grandes superficies de tierras disponible para la recarga, la topografía plana y el nivel freático. Este método requiere una preparación mínima para la recarga, lo que hace que su costo sea bajo comparado con otros métodos, las tasas de infiltración más altas están en áreas con cobertura vegetal nativa.

Es importante evaluar otras fuentes de aguas para los tiempos en que no se tenga disponibilidad de las aguas de inundación, ya que el caudal estacional contiene grandes cargas de sólidos en suspensión produciendo obstrucción. También es importante considerar los fertilizantes y abonos que se utilizan para cultivos de arroz, cereales, plantaciones de palmas y cultivos de secanos para evaluar la calidad del agua a recargar. El monitoreo básico y el seguimiento en variables como velocidad y volumen de infiltración es muy importante para tomar decisiones operativas.

6.3.7 Uso de las aguas subterráneas:

De acuerdo con la información registrada en ENA 2018, la mayor demanda y uso es para el sector agrícola, basados en que las proyecciones la región Orinoquia propone a futuro ser una despensa nacional de alimentos. Evaluando la probable implementación de recarga de acuíferos gestionada, esta agua se destinaria al sector agricultura y para ecosistemas naturales.

6.3.8 Análisis y Viabilidad (Proyecto Piloto)

Evaluando la posible implementación de Flood MAR en la Cuenca llanos, no queda duda de que este plan sería una buena opción a la solución de las problemáticas que se han venido presentando años atrás y que empeoran a futuro. Sin embargo, hay muchas consideraciones por atender y evaluar de manera específica:

- La gobernanza del agua es un ítem muy importante para la implementación, pero que aún en Colombia no está fortalecido para un proyecto de tan grande magnitud, además aún no está estipulado decretos o normas que propongan un lineamiento seguro para la implementación de la recarga de acuíferos gestionada.

- La infraestructura en el área es una limitación, ya que esto elevaría los costos de implementación para el transporte del agua al sitio de recarga.
- El financiamiento es un tema muy sensible ya que requiere que muchos actores estén direccionados hacia un mismo objetivo, desde el estado, entidades, sectores económicos hasta los propietarios de predios. Hoy en día la venta del proyecto sería difícil debido a la poca experiencia que se tiene en el tema y la inseguridad que esto representa.
- Respecto a las evaluaciones para la idoneidad del acuífero y la fuente de agua las limitaciones que se presenta son la falta de información requerida como base para la caracterización de estos factores, esto consideraría un aumento en los costos para la adquisición de información básica y personal capacitado que se requiere para el manejo de modelos.

6.4 CONSIDERACION DE LOS MODELOS PARA EL PROCESO DE INTEGRACION.

A partir de la búsqueda de información respecto a los programas utilizados para la integración del modelo podemos concluir que 8 de los programas requeridos para el análisis (Ver anexo 1) tiene licencia libre y solo GRAT exige algún tipo de compensación por su uso, sin embargo, este no podría ser de alto costo ya que sus creadores conforman una sociedad sin ánimo de lucro.

El conjunto de herramientas propuestas para el proyecto genera una base sólida de información técnica que ayudan a la toma de decisiones para la gestión integral mediante la comprensión en la interacción de aguas subterráneas y superficiales (DWR, 2018; USGS, 2021).

7. CONCLUSIONES

- El proyecto de recarga de acuíferos gestionado Flood MAR, es una solución integral, multipropósito, ecológico y con sentido preventivo que proporcionaría grandes ventajas a las regiones que sufren de disponibilidad del recurso en el país, sin embargo, para su desarrollo se reconocen 2 limitaciones frente a los factores de implementación, la gobernanza y coordinación que se encuentra en proceso de construcción y el transporte por la falta de desarrollo de infraestructura.
- Considerando que los llanos orientales son categorizados por su gran biodiversidad, alta importancia hidrológica y que en los últimos años se han visualizado como una región potencial para el crecimiento económico mediante la agricultura industrial, la cual sería dependiente exclusivamente de la seguridad hídrica, Flood MAR se considera una opción estratégica e integral que el estado debería considerar dentro de los planes de desarrollo territorial.
- El tema de la gobernanza del agua en Colombia es condicionado a normativas y su máxima expresión se representa por los consejos de cuenca, lo que nos indica un gran desafío para conocer y aplicar de fondo este concepto, el cual busca el mínimo protagonismo de la autoridad, dando paso a la participación de otros actores del agua que intervienen para establecer las políticas en conjunto.
- La implementación de Flood MAR a gran escala como en la macrocuenca de los Llanos Orientales, requiere de información consolidada, experiencia en el análisis y desarrollo, profesionales capacitados en los programas requeridos e integración y participación de todos los sectores implicados. Con estas consideraciones es preciso indicar que Colombia tiene grandes retos para implementar un proyecto de esta magnitud, sin embargo, es preciso considerar la evaluación de proyectos locales que pueden proporcionar información y experiencia para asegurar el éxito a gran escala y formular lineamientos del proceso de recarga a nivel nacional.
- Las pocas experiencias piloto que se han desarrollado en Colombia de recarga de acuíferos han mostrado un panorama favorable a las soluciones de las problemáticas planteadas, estos resultados aportan conocimientos que promueven la investigación de esta técnica generando seguridad para continuar en la búsqueda soluciones que mitiguen el cambio climático y los eventos locales que condicionan el recurso hídrico.

- Una de las grandes dificultades en Colombia para avanzar en el desarrollo del conocimiento es la falta de recursos para generar nuevos datos y la inadecuada gestión, manejo y accesibilidad de la información existente. En la cuenca llanos es evidente la carencia de estaciones hidrológicas, hidrometeorológicas y meteorológicas para generar información lo que sería un inconveniente para la implementación de Flood MAR, puesto que el conocimiento es la base fundamental para crear escenarios robustos y confiables con los cuales se toman decisiones más acertadas en la gestión de los recursos hídricos.
- Los fenómenos de sequía locales o producto de efectos del cambio climático en la región Oriental conllevan a que los recursos superficiales escaseen y se genere dependencia de aguas subterráneas, pero para su aprovechamiento de manera sostenible y gestionada es indispensable un conocimiento suficiente basado en datos confiables del recurso.
- El nivel conocimiento de las aguas subterráneas en Colombia es mínima, por lo que el estado debe gestionar recursos que permitan adquirir conocimiento con solidas investigaciones, ya que es fundamental este soporte para la adecuada gestión y administración con la finalidad de asegurar el beneficio de este líquido vital no solo para un futuro inmediato si no para próximas generaciones.
- Las acciones y actividades que en superficie pueden causar impactos en las aguas subterráneas, no son evidentes de manera inmediata y solo cuando el impacto se refleja en los escases del recurso, efectos adversos por contaminación en la salud humana o en los ecosistemas es cuando nos damos cuenta de lo importante e indispensable de la gestión y administración integral del recurso para prevenir conflictos a largo plazo.
- A falta de información generada específica del área se utiliza información secundaria como productos globales que pueden ser una herramienta favorable para considerar a manera general las condiciones del sitio. Es importante explorar programas y herramientas de acceso libre y gratuitas, como los utilizados en Flood MAR, que ayudan a la construcción de diferentes escenarios más realistas, con el objetivo de obtener un resultado integral del análisis de cada uno de los componentes.

- Hasta hace muy poco tiempo Colombia reconoce el agua como un elemento indispensable para el desarrollo y crecimiento sostenible del país e inicia en una búsqueda de planes estratégicos para formular una gestión integral del recurso hídrico, pero para el cumplimiento de este objetivo es indispensable priorizar la asignación de recursos humanos, financieros y fortalecer la gobernanza del agua.
- Con las experiencias adquiridas de recarga en Colombia se llega a la conclusión que la solución para una seguridad hídrica es un planteamiento integral compuesto de un conjunto de estrategias, planes que permitan la recuperación, conocimiento para la administración y concientización de usuarios para un uso racional y adecuado de los recursos hídricos.
- En Colombia es indispensable la renovación y construcción de normativas, política de uso para aprovechar y administrar al máximo los recursos disponibles que tenemos en el momento, para ello es indispensable la caracterización de la cuenca y su interacción de aguas subterráneas y superficiales, para proponer estrategias de protección y sostenibilidad.
- Para la cuenca del Orinoco su primer objetivo según los talleres diagnósticos del plan hídrico nacional se basa en una estrategia estructurada para fortalecer el ámbito social, donde todos los usuarios del agua en la cuenca tengan conocimiento suficiente, participen, propongan y se busque un beneficio en común para promuevan una planificación sostenible de los recursos hídricos.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Alexander Von Humboldt. (2011). Biodiversidad de la Cuenca del Orinoco. Bogota.
- Alexander Von Humboldt. (2013). Plan Estrategico de la Macrocuena del Rio Orinoco Fase I y II. Bogota.
- California Department of Water Resources. (2018). Water.ca.gov. Obtenido de <https://water.ca.gov/programs/all-programs/flood-mar>.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical. (2011). Ciencia, Tecnologia e Innovacion - El Futuro de la Region de la Orinoquia. Obtenido de <https://ciat.cgiar.org/>
- COMANA 2018. (2018). La recarga gestionada de los acuíferos como una técnica polivalente y efectiva de adaptación al cambio climático. Obtenido de <http://www.conama10.conama.org/>
- CORPORINOQUIA. (2016). Cartilla Yo Cambio por Cambio Climático. Obtenido de <https://www.corporinoquia.gov.co/>
- CSIRO. (2020). Marco Operativo para Proyectos de Recarga Artificial de Acuíferos. Obtenido de CSIRO Chile: <https://research.csiro.au/>
- CSIRO Chile. (2018). Guía metodológica: Marco Operativo para Proyectos de Recarga Artificial de Acuíferos. Chile.
- Daus, A. (2019). Almacenamiento y Recuperación de Acuíferos: Mejoramiento en la seguridad de Abastecimiento del Agua en el Caribe. BID.
- DEMEAU. (2014). Caracterización de Sitios Europeos de Recarga de Acuíferos Gestionados (MAR). Obtenido de <https://inowas.com/mar-methods/recharge-dams/>
- Dillon, P. J. (2005). Future Management of Aquifer Recharge. Hydrogeology Journal.
- DWR. (2018). Flood-Managed Aquifer Recharge (Flood-MAR). Obtenido de <https://water.ca.gov/programs/all-programs/flood-mar>.
- DWR. (2018). White Paper Flood MAR. California.
- Ecointeligencia. (2016). Cambio Climático ¿un problema igual para todos? Obtenido de <https://www.ecointeligencia.com/>
- Federación Nacional de Arroceros. (2011). Dinámica del Sector Arroceros de los Llanos Orientales de Colombia. Bogota.
- Global Water Security & Sanitation Partnership. (Septiembre de 2020). Colombia Un Cambio de Rumbo Seguridad Hídrica para la Recuperación y Crecimiento Sostenible.
- Gomez Niño, H. I. (2020). Análisis de Niveles Piezométricos y Patrones de Captación de

- Agua Subterráneo en el Acuífero de Yopal. Boletín de Geología 42(2), 15.
- Grupo Tragsa. (2019). Innovación en la Planificación y Gestión del Agua. El Grupo Tragsa y la Recarga Gestionada de Acuíferos. Obtenido de <https://dinamar.tragsa.es/>
- IDEAM. (1998). El medio ambiente en Colombia. Bogotá D.C.
- IDEAM. (2010). Estudios Nacional del Agua. Bogotá D.C.
- IDEAM. (2013). Aguas Subterráneas en Colombia: Una visión General. Bogotá D. C.
- IDEAM. (2014). Modelo Hidrogeológicos Conceptuales. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrogeologica>
- IDEAM. (2015). Principios Básicos para el Conocimiento y Monitoreo de las Aguas Subterráneas. Bogotá D.C.
- IDEAM. (2018). Estudio Nacional del Agua . Bogotá D.C.
- IDEAM. (2019). Estudio Nacional del Agua 2018. Bogotá.
- IGME. (s.f.). Hidrogeología del Campo de Níjar y Acuíferos. Obtenido de <http://aguas.igme.es/>: <http://aguas.igme.es/igme/publica/>
- IGRAG. (2016). Managed Aquifer Recharge. Obtenido de MAR booklet 2016 Web: <https://www.unigrac.org/>
- INGEOMINAS. (1987). Pruebas de bombeo de los pozos WS1, WSW2, WSW3 y WSW4 de Caño Limón-Arauca. Bogotá.
- ISMAR 10. (2019). MAR para Solucionar la Crisis Mundial del Agua. Obtenido de <https://www.ismar10.net/>
- MADS. (2014). Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos.
- MADS. (2017). La Orinoquia ya cuenta con un Plan Regional Integral de Cambio Climático. Obtenido de <https://www.nature.org/>
- MADS. (2021). Gestión Integral del Recurso Hídrico. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2020). SINAP 2020 - 2030. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/sinap/>
- Murillo Díaz, J. (2000). Recarga artificial de acuíferos. Síntesis Metodológica.
- Naciones Unidas Colombia. (2019). Más Recursos Para La Conservación y Producción Sostenible en la Orinoquia con el Apoyo del Banco Mundial. Obtenido de <https://nacionesunidas.org.co/noticias/>
- National Water Quality Management Strategy. (2019). Australian Guidelines for Water Recycling Managed Aquifer Recharge.

- Navarro Mercado , J. (2020). Monitoreo de las Obras Piloto de Recarga Artificial en el Acuífero Morroa en el Departamento de Sucre. Medellín.
- Perez Lizarazo, C. (2002). Experimento de Recarga Artificial de Acuíferos Cuaternarios de la Sabana de Bogotá. Bogotá.
- Rogers , P., & W Hall, A. (2003). Effective Water Governance. Obtenido de Global Water Partnership: <https://www.gwp.org/>
- Sarmiento, L. F. (2011). Llanos Basins Vol. 9 . Medellín.
- The Nature Conservancy. (2020). SIMA 2.0: un sistema para apoyar la planeación integral de los ríos de Colombia. Obtenido de <https://www.nature.org/>
- The Nature Conservancy. (2021). Un Pacto por el Desarrollo Sostenible de la Orinoquia Colombiana y sus Llanos Orientales.
- UMAN Instituto de Ingeniería. (2017). Recarga Artificial del Acuífero del Valle de México. México.
- UNESCO-PHI. (2005). Estrategias para la Gestión de Recarga de Acuíferos GRA en zonas semiáridas.
- Universidad de Antioquia. (2019). Curso de Recarga artificial de acuíferos: un aporte para la sostenibilidad del agua subterránea en Colombia. Obtenido de <https://portal.udea.edu.co/>
- USGS. (2021). Software Water. Obtenido de www.usgs.gov.
- Vargas Martínez, N. O. (2005). Zonas Hidrogeológicas Homogéneas de Colombia. Bogotá.
- Velez Echeverria, J., Castro Buitrago, E., & Madrigal Perez, M. (2019). Gobernanza del Agua y Consejos de Cuenca. Bogotá.

9. ANEXOS

ANEXO 1. Descripción General de los Modelos para el Proceso de integración Flood- MAR (DWR, 2018; USGS, 2021).

DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS PARA EL PROCESO DE INTEGRACIÓN DE FLOOD MAR					
Modelo	Nombre	Licencia	Autor	Objetivo	Características
Sac – SMA (Watershed runoff model)	Modelo de escorrentía de cuencas	Libre	Laboratorio de Investigación Hidrológica, Servicio Meteorológico Nacional (NWS), Administración Atmosférica Oceánica Nacional (NOAA)	El modelo utiliza variables de precipitación y temperatura, junto con parámetros sobre los estados de humedad del suelo y la permeabilidad relativa de la cuenca para estimar la cantidad de agua que ingresa, se almacena y sale de la cuenca.	El SAC-SMA básico requiere solo una entrada (precipitación); Tiene componente para modelar los impactos del suelo congelado en la simulación de escorrentía que requiere solo una entrada (temperatura).
Cal lite (System model)	Modelo de evaluación de la gestión del agua del Valle Central	licencia GNU General Public License.	Departamento de Recursos Hídricos del Estado de California (DWR) Y Oficina de Recuperación de la Región del Pacífico Medio de los Estados Unidos (USBR).	Simula la hidrología del Valle Central, las operaciones del reservorio, las decisiones de asignación de entrega, la salinidad del delta y los índices de flujo del ecosistema y el hábitat durante un período de planificación de 82 años.	Cal Lite está diseñado para su uso en una variedad de procesos de partes interesadas para una mejor comprensión de las operaciones del sistema de agua y posibles cambios de gestión futuros.
IDC (Root Zone Model)	Calculadora de demanda del modelo de flujo de agua integrado	licencia GNU General Public License	Departamento de Recursos Hídricos de California (DWR)	Calcular las demandas de agua urbana y agrícola en una cuenca fluvial.	La demanda de agua para la agricultura se calcula en función de los datos climáticos, los tipos de cultivos, las superficies cultivadas, las propiedades del suelo y los métodos de riego.
Res - Sim (Reservoir Model)	Programa de simulación del sistema de reservorios	Publico	Desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU	El software simula operaciones de embalses para la gestión de inundaciones, aumento de caudal bajo y suministro de agua para estudios de planificación, investigaciones detalladas del plan de regulación de embalses y apoyo a la toma de decisiones en tiempo real.	Modelar las operaciones del reservorio en uno o más reservorios para una variedad de objetivos operativos y limitaciones.

DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS PARA EL PROCESO DE INTEGRACIÓN DE FLOOD MAR

Modelo	Nombre	Licencia	Autor	Objetivo	Características
HEC-RAS (Streamflow Models)	Modelización Hidráulica	Publico	Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU.	Permite simular flujos en cauces naturales o canales artificiales para determinar el nivel del agua, incluso incluir en el modelo la existencia de obras hidráulicas como puentes, conducciones, presas, etc., por lo que su objetivo principal es realizar estudios de inundabilidad y determinar las zonas inundables.	Es el más utilizado para modelamiento en zona de inundación, se realizan cálculos de flujo constante unidimensionales, cálculos de flujo inestable unidimensionales y bidimensionales, cálculos de transporte de sedimentos / lecho móvil y modelado de temperatura / calidad del agua.
HEC - FIA (Flood Risk Models)	Modelo de Impacto de Inundaciones	Publico	Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU. Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC)	Evalúa las consecuencias de los eventos definidos por la salida del modelo hidráulico, como datos cuadrículados (por ejemplo, cuadrículas de profundidad y tiempo de llegada) o hidrogramas de etapa del sistema de almacenamiento de datos de HEC (HEC-DSS)	Las consecuencias que calcula HEC-FIA incluyen pérdidas económicas (pérdidas de estructuras y su contenido), pérdidas agrícolas y pérdida de vida esperada de estos eventos hidráulicos.
GRAT (Recharge Optimizacion)	Herramienta de evaluación de la recarga de agua subterránea	Privado (Entidad sin ánimo de lucro)	Desarrollada por Conservación Sostenible DWR	Ofrece a los proveedores de agua para la agricultura y las agencias de sostenibilidad de las aguas subterráneas (GSA) conocimientos esenciales para maximizar las oportunidades de recarga de las aguas subterráneas.	La aplicación basada en la nube de GRAT integra la ciencia hidrológica, agronómica y geológica con los mejores datos disponibles de fuentes locales, estatales y federales para crear una clasificación indexada de sitios de recarga adecuados.
FM2SIM (Ground Water Model)	Modelo de simulación de agua subterránea-superficial.	Libre	Sustainable Conservation y Earth Genome	Analiza efectos al cambio climático, interacción arroyo/acuífero y el destino del agua recargada, incluyendo extracciones y como fluye el sistema local, este modelo ayuda a comprender la interacción. FM2Sim, ha sido desarrollado para este estudio a partir del C2VSim-FG y complementado con datos locales.	Simula el flujo de aguas subterráneas, así como las interacciones entre las aguas superficiales y subterráneas y la reposición del acuífero. FM2Sim cuantificará los beneficios de los niveles múltiples de MAR, desde Nivel 1 hasta Nivel 3.
HEC-HMS (Watershed Runoff Model)	Sistema de modelado hidrológico	Publico	Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU	Simular los procesos hidrológicos completos de los sistemas de cuencas hidrográficas dendríticas, incluye infiltración de eventos, hidrogramas unitarios y enrutamiento hidrológico.	HEC-HMS también incluye los procedimientos necesarios para la simulación continua, incluida la evapotranspiración, el deshielo y la contabilidad de la humedad del suelo.
Licencia GNU General Public License: Significa que se puede copiar, distribuir y modificar libremente, pero no puede restringir la capacidad de otros para copiarlo, distribuirlo y modificarlo.					