

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Evaluación de los cambios de uso y cobertura de tierra alrededor del trasvase
Chongón-El Azúcar (Ecuador)

Proyecto de Titulación

Previo la obtención del Título de:

Magíster en Ciencias de la Tierra

Presentado por:

Jorge Javid Martínez Angulo

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

Dedico este proyecto, en primer lugar, a Dios;
a mis padres, Jorge Martínez y Vivien
Angulo, por su amor y apoyo incondicional; y
a mis mentores y maestros, por su guía y
enseñanza.

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a Dios por brindarme fortaleza y sabiduría en cada etapa de este camino. Expreso mi más sincero agradecimiento a mis padres, Jorge Martínez y Vivien Angulo, por su amor incondicional, apoyo constante y confianza en mí. A mi tutor, Dr. Andrés Velástegui, por su guía, paciencia y valiosas enseñanzas. Finalmente, agradezco a los profesores que contribuyeron de manera significativa a mi formación académica y profesional.

Declaración Expresa

Yo Jorge Jabid Martínez Angulo acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 16 de septiembre del 2025.

Ing. Jorge Jabid Martínez Angulo

Evaluadores

PhD. María Fernanda Calderón Vega

Evaluador

PhD. Andrés Danilo Velástegui Montoya

Tutor de proyecto

Resumen

Esta tesis examina los impactos ambientales de los trasvases intercuenca (TI) y el rol de la teledetección, articulando un marco global de evidencia con un estudio de caso en bosque seco tropical (BST) de Ecuador. Se plantea como hipótesis que la disponibilidad artificial de agua reconfigura el paisaje, intensificando presiones sobre bosques y la calidad del agua. Se integró un análisis bibliométrico (Scopus y Web of Science, 1971-2024) junto con una revisión sistemática. Posteriormente, se evaluaron cambios de uso y cobertura asociados al sistema Chongón-El Azúcar (2019-2025): se generaron mosaicos con imágenes Sentinel-2 SR en Google Earth Engine (GEE), se calcularon índices espectrales (NDVI, SAVI, MNDWI, NDCI, NDBI) y se entrenó un modelo Random Forest (RF). Los resultados evidenciaron crecimiento y evolución de publicaciones desde temas netamente técnicos hasta la consideración de impactos ambientales integrales y herramientas como teledetección, índices espectrales y machine learning. El caso de estudio reveló una pérdida neta de 1,223.77 ha de BST, con focos próximos al canal Chongón-Sube y Baja y al embalse El Azúcar, transición de agua clara a turbia y señales de eutrofización asociadas a actividades agropecuarias. Se concluye que los TI intensifican presiones antrópicas y que la teledetección habilita monitoreo anual útil para la gestión adaptativa alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 6, 11 y 15.

Palabras Clave: trasvase intercuenca (TI); teledetección; random forest (RF); uso y cobertura de suelo (UCS); bosque seco tropical (BST).

Abstract

This thesis examines the environmental impacts of inter-basin water transfers (IBWTs) and the role of remote sensing, articulating a global evidence framework together with a case study in Ecuador's tropical dry forest (TDF). The hypothesis is that the artificial availability of water reconfigures the landscape, intensifying pressures on forests and on water quality. A bibliometric analysis (Scopus and Web of Science, 1971-2024) was integrated with a systematic review. Subsequently, land-use/land-cover (LULC) changes associated with the Chongón-El Azúcar system (2019-2025) were evaluated: mosaics from Sentinel-2 SR images were generated in Google Earth Engine, spectral indices (NDVI, SAVI, MNDWI, NDCI, NDBI) were computed, and a Random Forest model was trained. The results evidenced the growth and evolution of publications from purely technical topics toward the consideration of comprehensive impacts and tools such as remote sensing, spectral indices, and machine learning. The case study revealed a net loss of 1,223.77 ha of TDF, with hotspots near the Chongón-Sube y Baja canal and the El Azúcar reservoir, a transition from clear to turbid water, and signs of eutrophication associated with agricultural activities. It is concluded that IBWTs intensify anthropogenic pressures and that remote sensing enables annual monitoring useful for adaptive management aligned with Sustainable Development Goals (SDGs) 6, 11, and 15.

Keywords: Interbasin water transfer (IBWT); remote sensing (RS); Random Forest (RF); Land Use and Land Cover (LULC); tropical dry forest (TDF).

Índice general

Resumen	I
<i>Abstract</i>	II
Índice general	III
Abreviaturas	VI
Simbología	VIII
Índice de tablas	IX
Capítulo 1	1
1. Introducción	2
1.1 Contexto y problemática	2
1.2 Justificación	2
1.3 Marco conceptual	3
1.4 Objetivos	3
1.4.1 <i>Objetivo general</i>	3
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i>	4
1.5 Preguntas de investigación	5
1.6 Metodología general	6
1.7 Estructura de la tesis	7
Capítulo 2	8
2. Teledetección y trasvases de agua entre cuencas: análisis bibliométrico y revisión sistemática de sus impactos ambientales	9
2.1 Introducción	12
2.2 Materiales y Métodos	17
2.2.1 <i>Materiales</i>	17
2.2.2 <i>Métodos</i>	18
2.3 Resultados	21

2.3.1 Evolución de la producción científica	21
2.3.2 Colaboración entre países	24
2.3.3 Co-ocurrencia de palabras clave	26
2.3.4 Temas de tendencia	27
2.3.5 Revisión sistemática: teledetección en evaluación de impactos	29
2.4 Discusión	30
2.4.1 Principales hallazgos y literatura reciente	30
2.4.2 Implicaciones ambientales	31
2.4.3 Contribuciones de la teledetección	32
2.4.4 Perspectivas socioeconómicas y de gobernanza	33
2.4.5 Métodos avanzados de evaluación y modelado	34
2.4 Conclusiones	36
2.5 Referencias	38
Capítulo 3	61
3. Evaluación multitemporal de los cambios en la cobertura terrestre asociados a trasvases en bosque seco: Caso de estudio del sistema Chongón–El Azúcar (Ecuador)	
62	
3.1 Introducción	64
3.2 Área de estudio	67
3.3 Materiales y Métodos	70
3.3.1 Fase I: Preprocesamiento	71
3.3.2 Fase II: Procesamiento de imágenes	73
3.3.3 Fase III: Posprocesamiento y análisis	77
3.4 Resultados y discusión	78
3.5 Conclusiones y Recomendaciones	84
3.6 Referencias	86
Capítulo 4	102

4.	Consideraciones finales	103
	Referencias	106

Abreviaturas

AdI	Área de interés
BST	Bosque Seco Tropical
DEM	Modelo de Elevación Digital
DTM	Modelo Digital del Terreno
EPA	Empresa Pública del Agua
GAD	Gobierno Autónomo Descentralizado
GEE	Google Earth Engine
GIS	Geographic Information System
IBT	Inter-basin Transfer
IBWT	Inter-basin Water Transfer
INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
MAATE	Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica
MAG	Ministerio de Agricultura y Ganadería
MSI	Instrumento Multiespectral
NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio
NDBI	Índice de Diferencia Normalizada Edificada (Normalized Difference Built-up Index)
NDCI	Índice de Diferencia Normalizada de Clorofila (Normalized Difference Chlorophyll Index)
NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index)
NDWI	Índice de Agua de Diferencia Normalizada (Normalized Difference Water Index)
NIR	Infrarrojo cercano (Near Infrared)

OA	Exactitud global (Overall Accuracy)
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
PA	Exactitud del productor (Producer's Accuracy)
PHASE	Proyecto Hidráulico de Santa Elena
PRISMA	Elementos de Reporte Preferidos para Revisiones Sistemáticas y Metaanálisis (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)
RF	Random Forest
SAVI	Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (Soil Adjusted Vegetation Index)
SIG	Sistema de Información Geográfica
SNWDP	Proyecto de Transferencia de Agua Sur-Norte (South-to-North Water Diversion Project)
SR	Reflectancia de la superficie (Surface Reflectance)
SWAT	Herramienta de Evaluación de Suelos y Aguas (Soil and Water Assessment Tool)
SWIR	Infrarrojo de onda corta (Short-Wave Infrared)
TI	Trasvase Intercuenca
UA	Precisión del usuario (User's Accuracy)
UCS	Uso y Cobertura del Suelo
VANT	Vehículo Aéreo No Tripulado
WoS	Web of Science
WV	Vapor de agua (Water Vapor)

Simbología

Ha	Hectárea
km	Kilómetro
κ	Coeficiente kappa
m	Metro
m ²	Metro cuadrado
mm	Milímetro
N	Nitrógeno
nm	Nanómetro
P	Fósforo
%	Porcentaje
°C	Grado Celsius
×	Signo de multiplicación

Índice de figuras

Figura 2.1	19
Figura 2.2	21
Figura 2.3	22
Figura 2.4	25
Figura 2.5	27
Figura 2.6	28
Figura 3.1	69
Figura 3.2	71
Figura 3.3	79
Figura 3.4	80

Índice de tablas

Tabla 1.1	6
Tabla 2.1	25
Tabla 3.1	72
Tabla 3.2	72
Tabla 3.3	74
Tabla 3.4	74
Tabla 3.5	75
Tabla 3.6	80

Capítulo 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto y problemática

La demanda mundial de agua dulce crece en torno al 1 % anual impulsada por la expansión agrícola, la urbanización y los cambios en los patrones de consumo (Naciones Unidas, 2024). Al mismo tiempo, casi la mitad de la población enfrenta escasez severa de agua al menos durante parte del año (Naciones Unidas, 2024). Para atenuar este déficit, muchos países recurren a trasvases intercuenca (TI, por sus siglas en inglés Inter-Basin Water Transfers, IBWT), infraestructuras que desvían grandes volúmenes de agua desde cuencas donantes hacia regiones deficitarias (Sun et al., 2021). Aunque los TI aportan beneficios socioeconómicos (riego, control de inundaciones, generación hidroeléctrica), la evidencia científica muestra impactos colaterales como deforestación inducida, fragmentación de hábitats, alteraciones del régimen hidrológico, eutrofización y proliferación de especies invasoras (Gallardo & Aldridge, 2018).

En el Ecuador, el bosque seco tropical, ecosistema ya altamente vulnerable, es atravesado por el sistema de trasvase Chongón-El Azúcar. La nueva disponibilidad de agua ha estimulado actividades agropecuarias y urbanas, acelerando la pérdida y fragmentación de la cubierta forestal (Rivas et al., 2024).

1.2 Justificación

Esta investigación responde a dos brechas complementarias. A escala global, la literatura sobre trasvases intercuenca (TI) crece de forma exponencial, pero escasean las síntesis que integren enfoques bibliométricos y de revisión sistemática para identificar tendencias, vacíos temáticos y oportunidades de monitoreo ambiental mediante teledetección (Zhang et al., 2015; Zhuang, 2016; Yan et al., 2023). A escala local, en el Neotrópico, y particularmente en Ecuador, existen pocos estudios multitemporales que cuantifiquen con rigor los cambios de uso y cobertura del suelo (UCS) derivados de la implementación de trasvases en áreas de bosque seco

tropical, utilizando imágenes satelitales de alta resolución espacial y temporal (Liu et al., 2021; Rivas et al., 2020; Shi et al., 2020; S. Wang et al., 2024).

1.3 Marco conceptual

El marco conceptual articula: (i) los TI como intervenciones hidro-territoriales que redistribuyen caudales y reconfiguran presiones antrópicas sobre los sistemas socioecológicos; (ii) el bosque seco tropical (BST) como ecosistema sensible a cambios hidrológicos y de uso del suelo; (iii) la dinámica UCS (conversión forestal, intensificación agropecuaria, expansión urbana) como respuesta observable a nuevas disponibilidades de agua; y (iv) la teledetección como plataforma para caracterizar estados de referencia y detectar cambios en vegetación y superficies hídricas. Operativamente, se adopta un enfoque de monitoreo multitemporal con sensores ópticos (Sentinel-2), índices espectrales (NDVI, SAVI, MNDWI, NDCI, NDBI) y clasificación supervisada Random Forest (RF), complementado con matrices de transición y cartografía de ganancia/pérdida para inferir procesos de fragmentación y degradación. Este marco se alinea con la evaluación de impactos y la gestión adaptativa orientada a los ODS (6, 11 y 15).

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar los impactos ambientales de los trasvases intercuenca desde la perspectiva global y local, empleando análisis bibliométrico, revisión sistemática y teledetección multitemporal, con énfasis en el sistema Chongón-El Azúcar (Ecuador) para la identificación de tendencias, brechas y estrategias de monitoreo que promuevan la gestión sostenible de los recursos hídricos, apoyen la protección de los ecosistemas terrestres y permitan identificar las actividades antropogénicas asociadas a la nueva disponibilidad de agua

1.4.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar la evolución, las redes de colaboración y las tendencias temáticas de la investigación sobre trasvases intercuenca (TI) e impactos ambientales (1971-2024), mediante análisis bibliométrico (VOSviewer + Bibliometrix), para el establecimiento de una línea base global que guíe futuros estudios.
2. Identificar las contribuciones de la teledetección en el monitoreo de impactos ambientales asociados a trasvases intercuenca (TI), mediante una revisión sistemática cuyo proceso de búsqueda y selección se reporta con la guía PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), para la compilación de información base que guíe nuevas investigaciones.
3. Cuantificar los cambios de uso y cobertura de la tierra (2019-2025) en un buffer de 7 km alrededor del sistema de trasvase Chongón-El Azúcar, mediante el uso de imágenes Sentinel-2, índices espectrales (NDVI, SAVI, MNDWI, NDCI, NDBI) y clasificación Random Forest, para el análisis del impacto espacial de la nueva disponibilidad hídrica sobre el bosque seco.
4. Analizar las transiciones entre bosque seco tropical y otras clases de cobertura de suelo asociadas a la disponibilidad hídrica, mediante una matriz de transición, mapa comparativo y mapa de cambios, para la comprensión de la degradación del ecosistema y orientar acciones de conservación.
5. Integrar los hallazgos globales (bibliometría + revisión) y locales (sistema de trasvase Chongón-El Azúcar) mediante síntesis comparativa y análisis crítico, para la formulación de recomendaciones de monitoreo ambiental y gobernanza del agua.

1.5 Preguntas de investigación

Pregunta general:

¿Cómo y en qué magnitud los trasvases intercuenca reconfiguran el uso y cobertura del suelo y la calidad ecológica a escala global y, específicamente, en Chongón-El Azúcar, y qué estrategias de monitoreo y gobernanza mitigan sus impactos?

Preguntas específicas:

¿Cómo ha evolucionado la producción científica sobre los impactos ambientales asociados a trasvases intercuenca (TI) y cuáles son sus principales focos temáticos y geográficos?

¿Qué papel desempeña la teledetección en la evaluación de impactos de trasvases intercuenca (TI), con qué desempeño y limitaciones?

¿Cuál es el cambio neto y el patrón espacial de uso y cobertura (2019–2025) detectado con Sentinel-2, índices espectrales y Random Forest en el buffer de 7 km, y cómo se relaciona con la proximidad a la infraestructura hídrica?

¿Cuáles son las transiciones dominantes del bosque seco hacia otras coberturas asociadas a la nueva disponibilidad hídrica y qué implican para la fragmentación y degradación del ecosistema?

¿Qué prácticas de gobernanza del agua se desprenden de la comparación global-local para implementar un monitoreo operativo de TI en bosques secos?

El proyecto abarcó la integración de dos artículos complementarios: un panorama global sobre TI mediante análisis bibliométrico y revisión sistemática, y un estudio de caso local en BST para cuantificar cambios de UCS asociados a una obra de trasvase. Su propósito fue

caracterizar tendencias científicas y evidenciar, con observación de la Tierra, los principales cambios ambientales vinculados a TI, bajo la premisa de que estas infraestructuras reconfiguran presiones antrópicas detectables espacial y temporalmente.

1.6 Metodología general

La tesis adopta un diseño mixto (cuantitativo-cualitativo) articulado en dos ejes o artículos como se presenta en la **Tabla 1.1**:

Tabla 1.1

Datos, metodología principal y productos de ambos artículos

Eje	Periodo de estudio	Datos	Métodos principales	Producto
Global “Teledetección y trasvases de agua entre cuencas: análisis bibliométrico y revisión sistemática de sus impactos ambientales”	1971-2024	Registros Scopus & WoS	Bibliometría (VOSviewer, Bibliometrix) Revisión sistemática PRISMA	Mapa de colaboración Clusters de palabras clave Síntesis de estudios Teledetección
Local “Evaluación multitemporal de los cambios en la cobertura terrestre asociados a trasvases en bosque seco: Caso de estudio del sistema Chongón–El Azúcar (Ecuador)”	2019 vs 2025	Imágenes de Sentinel-2 MSI de los satélites 2A y 2B, correspondientes al nivel 2A (Reflectancia de superficie atmosféricamente corregida y ortorectificada)	Pre-procesado GEE, índices NDVI, SAVI, MNDWI, NDCI, NDBI Random Forest Matriz de confusión	Mapa de transición Mapa de ganancia y pérdida de BST Matriz de transición

1.7 Estructura de la tesis

Para lograr el objetivo propuesto, este trabajo se divide en capítulos presentados en forma de artículos, los cuales se desarrollaron en las diferentes etapas de la investigación, el capítulo 1 consta de una introducción, en la que se presenta el trabajo, aborda las preguntas de investigación, así como los datos utilizados y las metodologías empleadas para lograr los objetivos propuestos.

El capítulo 2 presenta: “Teledetección y trasvases de agua entre cuencas: análisis bibliométrico y revisión sistemática de sus impactos ambientales”. El capítulo 3 presenta: “Evaluación multitemporal de los cambios en la cobertura terrestre asociados a trasvases en bosque seco: Caso de estudio del sistema Chongón–El Azúcar (Ecuador)”. El capítulo 4 presenta consideraciones finales.

Capítulo 2

2. TELEDETECCIÓN Y TRASVASES DE AGUA ENTRE CUENCAS: ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO Y REVISIÓN SISTEMÁTICA DE SUS IMPACTOS AMBIENTALES

Resumen

A medida que crece la demanda mundial de agua dulce, principalmente en los países en desarrollo que necesitan riego agrícola, y la escasez de agua se vuelve significativa, gobiernos y organizaciones están construyendo más proyectos de trasvases intercuenca (TI, por sus siglas en inglés *Inter-Basin Water Transfers, IBWT*). Sin embargo, estos proyectos a gran escala plantean desafíos ecológicos y sociales que deben comprenderse y gestionarse cuidadosamente. Este estudio combina un análisis bibliométrico y una revisión sistemática de la literatura para examinar cómo los investigadores discuten los principales impactos ambientales de TI y aplican técnicas de teledetección en su monitoreo. Basado en Scopus y Web of Science (WoS), el análisis bibliométrico revela un aumento exponencial en las publicaciones entre 1971 y 2024, principalmente notable desde el año 2000, con China y Estados Unidos como centros de colaboración internacional. Tres grupos temáticos dominan la coocurrencia de palabras clave en el análisis bibliométrico sobre TI e impactos ambientales: (1) operación de embalses y generación hidroeléctrica, (2) biodiversidad y cambio climático, y (3) calidad del agua y teledetección, cuya relación se profundiza en la revisión sistemática. El análisis de tendencias muestra la persistencia de conceptos clásicos y la aparición de enfoques emergentes como la evaluación de riesgos y la compensación ecológica. La revisión sistemática muestra que, de los 12 estudios examinados, nueve se realizaron en China, uno en África, uno en Turquía y uno en Irán. Este hecho no implica directamente que otros países que utilizan obras hidráulicas no utilicen la teledetección para evaluar el impacto ambiental asociado. Estos 12 estudios consideran la teledetección una herramienta clave para caracterizar el estado inicial del medio ambiente o ecosistema y detectar variaciones en la cobertura vegetal, la calidad del agua y la

recarga de acuíferos relacionadas con las transferencias de agua. Sin embargo, persisten lagunas, como la falta de datos multitemporales a largo plazo, la consideración insuficiente de la biodiversidad faunística y la integración limitada de las dimensiones sociales y climáticas.

En cuanto a los impactos, la literatura corrobora alteraciones indirectas de los ecosistemas, como la deforestación, la fragmentación y la contaminación difusa resultantes de actividades antropogénicas motivadas por la nueva disponibilidad de agua, generalmente a ambos lados del cauce intercuenca. No obstante, estos proyectos pueden beneficiar a las partes interesadas mediante la adopción de planes de mitigación sólidos y participativos. Los resultados destacan la necesidad de realizar estudios exhaustivos antes, durante y después de la construcción de TI para la sostenibilidad hídrica y el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 6, 11. 15. En este contexto, la teledetección se consolida como una herramienta esencial para la toma de decisiones informada y la gestión adaptativa de obras hídricas significativas en escenarios de cambio climático. Además, se carece de estudios de caso publicados en otros países que puedan enriquecer el contenido de futuras revisiones sistemáticas.

Palabras clave: Trasvase intercuenca, desvío de agua, impacto ecológico, impacto en el ecosistema, Cobertura terrestre, uso y cobertura de suelo (UCS), Calidad del agua, Gestión sostenible

Abstract

As global demand for freshwater grows, mainly in developing countries needing agricultural irrigation, and water scarcity becomes significant, governments and organizations are constructing more inter-basin water transfer (IBWT) projects. However, these large-scale projects bring ecological and social challenges that must be carefully understood and managed. This study combines a bibliometric analysis and a systematic literature review to examine how

researchers discuss the main environmental impacts of IBWT and apply remote sensing techniques in their monitoring. Based on Scopus and Web of Science (WoS), the bibliometric analysis reveals an exponential increase in publications from 1971 to 2024, primarily noticeable since 2000, with China and the United States as hubs of international collaboration. Three thematic clusters dominate the co-occurrence of keywords in the bibliometric analysis concerning IBWT and environmental impacts: (1) reservoir operation and hydropower generation, (2) biodiversity and climate change, and (3) water quality and remote sensing, whose relationship is deepened in the systematic review. The trend analysis shows the persistence of classical concepts and the advent of emerging approaches such as risk assessment and ecological compensation. The systematic review shows that of the 12 studies screened, nine were conducted in China, one in Africa, one in Turkey and one in Iran. This fact does not directly imply that other countries that use hydraulic works do not use remote sensing to assess the associated environmental impact. These 12 studies consider remote sensing a key tool to characterise the initial state of the environment or ecosystem and detect variations in vegetation cover, water quality, and aquifer recharge related to water transfers. However, gaps remain, such as the lack of long-term multi-temporal data, insufficient consideration of faunal biodiversity and limited integration of social and climatic dimensions.

Regarding impacts, the literature corroborates indirect ecosystem alterations, such as deforestation, fragmentation and diffuse pollution resulting from anthropogenic activities motivated by new water availability, generally on both sides of the inter-basin channel. However, these projects can benefit stakeholders by adopting robust and participatory mitigation plans. The results highlight the need for extensive studies before, during and after IBWT construction for water sustainability and meeting global goals (SDG 6, SDG 15). In this context, remote sensing is consolidated as an essential tool for informed decision-making and adaptive

management of significant water works under climate change scenarios. In addition, there is a lack of published case studies from other countries that could enrich the content of future systematic reviews.

Keywords: IBWT, Water Diversion, ecological impact, ecosystem impact, Land cover, LULC, Water quality, Sustainable management

2.1 Introducción

El uso mundial de agua dulce aumenta de forma constante en torno a un 1 % anual, impulsado principalmente por la expansión agrícola y el crecimiento poblacional (Naciones Unidas, 2024). Este incremento se relaciona estrechamente con el desarrollo industrial, la expansión urbana y los cambios en los estilos de vida, como el aumento del consumo de carne, productos lácteos y ropa, que intensifican la demanda de recursos hídricos (Loaiciga & Doh, 2024; Sahu & Debsarma, 2023). Actualmente, la agricultura utiliza casi el 70 % de las extracciones de agua dulce a nivel mundial, mientras que la industria consume alrededor del 20 % y los hogares el 10 % restante (Gorjian et al., 2022; Naciones Unidas, 2024). Al mismo tiempo, la mitad de la población mundial enfrenta una grave escasez de agua durante al menos una parte del año (Aimar, 2017; Naciones Unidas, 2024). Los ingenieros y especialistas en políticas públicas han implementado múltiples infraestructuras para abordar la escasez de agua, incluidas plantas de desalinización (Prathapaneni & Detroja, 2020), sistemas de riego eficientes (Hussain et al., 2024), plantas de tratamiento de aguas residuales (Arias et al., 2020), embalses y presas (Lima et al., 2023; Wu et al., 2023), así como trasvases intercuenca (TI, por sus siglas en inglés *Inter-Basin Water Transfers, IBWT*) (Eslamian & Parvizi, 2023; Yan et al., 2023). Los TI permiten transportar agua de una cuenca hidrográfica a otra para satisfacer la demanda en regiones con déficit hídrico (Shumilova et al., 2018; Yan et al., 2023) y ofrecen beneficios como el control de inundaciones, la diversificación del hábitat y la reducción de la subsidencia del

suelo causada por la sobreexplotación de acuíferos (Su et al., 2022; Wang et al., 2024). Sin embargo, estos megaproyectos generan impactos negativos indirectos: por ejemplo, un aumento repentino de la disponibilidad de agua incentiva las actividades productivas y recreativas de origen antrópico (Dhadse & Kardbhajne, 2024; Velastegui-Montoya et al., 2020; Zhuang, 2016), lo que deriva en cambios de uso del suelo y presiones ecológicas, como la expansión de la frontera agrícola y la deforestación en áreas adyacentes al trasvase; la erosión y la fragmentación del ecosistema; la contaminación por fertilizantes; alteraciones de los regímenes naturales de flujo; cambios en la recarga de aguas subterráneas; variaciones en la calidad del agua; y disminución de la biodiversidad (Caschetto et al., 2014; Dhadse & Kardbhajne, 2024; Döll et al., 2009; Guo et al., 2020b; Qiao et al., 2020). Dichas consecuencias pueden socavar el progreso hacia los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente el ODS 15 (Naciones Unidas, 2023). Los TI, en particular, presentan desafíos ecosistémicos y sociales a largo plazo (Yan et al., 2023; Zhuang, 2016). Dado que estos impactos pueden ser significativos, deben monitorearse regularmente para evitar mayores daños y favorecer la gestión responsable de los recursos (Su et al., 2022). Sin embargo, rastrear lo que sucede en lugares remotos o de difícil acceso puede ser complejo y, a menudo, muy costoso (Awty-Carroll et al., 2019). En este contexto, la teledetección constituye una herramienta esencial para establecer la línea base histórica (preintervención) y las tendencias temporales de los impactos asociados a megaestructuras hidráulicas, respaldar la toma de decisiones sobre su construcción y examinar los cambios en el uso y la cobertura del suelo (UCS) (Garrido-Rubio et al., 2019; Hattaraki et al., 2020; Maiolo et al., 2019). Su capacidad multiescalar y continuidad temporal permiten obtener datos históricos y actuales sobre la salud ecosistémica y la calidad del agua (Nasiri et al., 2023). Además, la integración de imágenes satelitales con modelos hidrológicos y ecológicos posibilita evaluaciones de largo plazo que fortalecen la eficacia de las estrategias de mitigación (Mermoz

et al., 2024; Pasetto et al., 2018). Las imágenes de teledetección también son herramientas de comunicación visual, de lectura intuitiva, y pueden fomentar la participación ciudadana (Bossler et al., 2010; Eilola et al., 2021). Comprender las implicaciones ambientales de la construcción de TI y cómo la teledetección capta los cambios es esencial para planificar proyectos hídricos con criterios de sostenibilidad (Dong et al., 2016).

La literatura coincide en la necesidad de enfoques integrales que consideren los aspectos ambientales, socioeconómicos y tecnológicos de las TI (Liu et al., 2023; Pérez-Sánchez et al., 2017; Zhuang, 2016). En este sentido, la teledetección ofrece diversas soluciones que ayudan a los investigadores a monitorear y gestionar los impactos de forma más eficiente. Diversos estudios muestran que las técnicas de teledetección, complementadas con modelos hidrológicos como la Soil and Water Assessment Tool (SWAT; en español, Herramienta de Evaluación de Suelos y Aguas) (Li et al., 2004; Silva et al., 2024), facilitan la evaluación de los cambios en UCS, la calidad del agua y la dinámica de los ecosistemas (Fazelpoor et al., 2022; S. Yang et al., 2018a; Y.-C. Zhang et al., 2011; Y. Zhang et al., 2019). En particular, la detección de cambios en la cobertura terrestre y la evolución geomorfológica se ha aplicado en la cuenca de Zayandeh-Rud para identificar la transformación del cauce activo y la cobertura terrestre, lo que pone de relieve la necesidad de una planificación integrada para mitigar la degradación ambiental (Fazelpoor et al., 2022). Asimismo, en casos como el South-to-North Water Diversion Project (SNWDP; en español, Proyecto de Desvío de Agua Sur-Norte), la combinación de datos de teledetección con el modelo ecológico Riparian Model (RIPAM; en español, Modelo ribereño) permitió evaluar la calidad del agua y las funciones ambientales, mostrando el efecto de los altos niveles de agua en el crecimiento de la vegetación y la absorción de nutrientes (S. Yang et al., 2018a, 2018b). La vegetación es un componente clave para evaluar la eficacia de las transferencias de agua, y estudios en las cuencas de los ríos Heihe y Shiyang (Huang et al., 2020;

Qiao et al., 2020; Y.-C. Zhang et al., 2011) muestran que el aporte de agua puede promover la recuperación ecológica, siempre que las autoridades o partes responsables interesadas gestionen adecuadamente el recurso hídrico. El mapeo mediante teledetección de macrófitos acuáticos en el lago Taihu ha permitido caracterizar dinámicas no lineales y respuestas de la vegetación acuática asociadas a TI y controles hidrológicos (Y. Zhang et al., 2019). A nivel transfronterizo, los datos satelitales facilitan la gestión compartida de recursos y la validación de compromisos entre jurisdicciones (Yalew et al., 2023), ampliando las posibilidades de cooperación internacional. Asimismo, la integración de la teledetección con modelos de dinámica de sistemas (Gohari et al., 2013; Madani et al., 2013) y enfoques como el teleacoplamiento y el marco DPSIR (por sus siglas en inglés, Drivers-Pressures-State-Impact-Response; en español, Fuerzas motrices-Presiones-Estado-Impactos-Respuestas) (Quan et al., 2016) permite comprender las interacciones a escala regional y global mediante la correlación de variables hidrológicas con factores socioeconómicos y políticos. Estudios de caso como el del río Colorado muestran el potencial de la teledetección para captar la respuesta de la vegetación a los flujos ecológicos transfronterizos (Nagler et al., 2018), mientras que, en la llanura del norte de China, investigadores han comprobado la eficacia de los TI para restaurar el almacenamiento hídrico total mediante la combinación de datos satelitales e *in situ* (Dong et al., 2023).

Sin embargo, aún existen diferencias relacionadas con la disponibilidad de datos de alta resolución espacial y temporal, la adaptación de los modelos a diferentes contextos ambientales y la necesidad de coordinación interinstitucional para aplicar estas tecnologías de manera efectiva (Wan et al., 2018; W. Wang et al., 2022). Varios autores señalan que, si bien la teledetección proporciona una visión amplia y frecuentemente actualizada, esta debe complementarse con información de campo e indicadores sociales y económicos (Yalew et al., 2023; Zhuang, 2016). La creciente incorporación de la teledetección en la gestión de los TI

muestra un camino prometedor para abordar las brechas de información y promover la gestión sostenible del agua, siempre que los marcos de gobernanza adecuados y un enfoque ecosistémico integral complementen las soluciones tecnológicas (Liu et al., 2023; Quan et al., 2016; Y.-C. Zhang et al., 2011). En este contexto, surgen las siguientes preguntas de investigación: (1) ¿Cuáles son las principales implicaciones ambientales de la construcción y operación de trasvases de agua intercuenca? (2) ¿Cómo contribuye la teledetección a (a) identificar los cambios en la cobertura terrestre y (b) monitorear los efectos ambientales de los trasvases de agua intercuenca?

Si bien algunas revisiones informan sobre los impactos ecológicos de los TI que se han analizado en diversos grados (L. Zhang et al., 2015; Zhuang, 2016), pocas han examinado sistemáticamente cómo la teledetección contribuye a la evaluación de estos impactos. Por ejemplo, Zhuang (2016) recopila casos emblemáticos de diferentes países y aborda los impactos positivos y negativos, las medidas de mitigación y analiza las escalas local y regional, pero no detalla una metodología específica para la búsqueda y selección de la literatura. Yan et al. (2023) ofrecen una visión integral y organizada de los principales impactos en las cuencas donantes y receptoras, así como en la ruta de transferencia del SNWDP, pero no describen un protocolo formal o metodología de búsqueda como se hace en este trabajo. A diferencia de las dos revisiones mencionadas L. Zhang et al. (2015) explican claramente cómo se obtuvieron los datos y los métodos utilizados para analizar la literatura sobre TI. Sin embargo, se limitaron a la base de datos Web of Science (WoS) y no profundizaron en el papel de la teledetección, aunque lograron identificarlo como tema clave. El presente trabajo complementa investigaciones previas al combinar literatura de las bases de datos Scopus y Web of Science, para luego profundizar en la conexión con teledetección, integrando un análisis bibliométrico (1971-2024) con una revisión sistemática de la aplicación de la teledetección para evaluar los impactos ambientales de los

trasvases intercuenca. De esta manera, se identifican tendencias, brechas y estrategias de monitoreo que promuevan la gestión sostenible de los recursos hídricos y apoyen la protección de los ecosistemas terrestres en consonancia con los ODS 6, 11 y 15 (Naciones Unidas, 2023).

2.2 Materiales y Métodos

2.2.1 Materiales

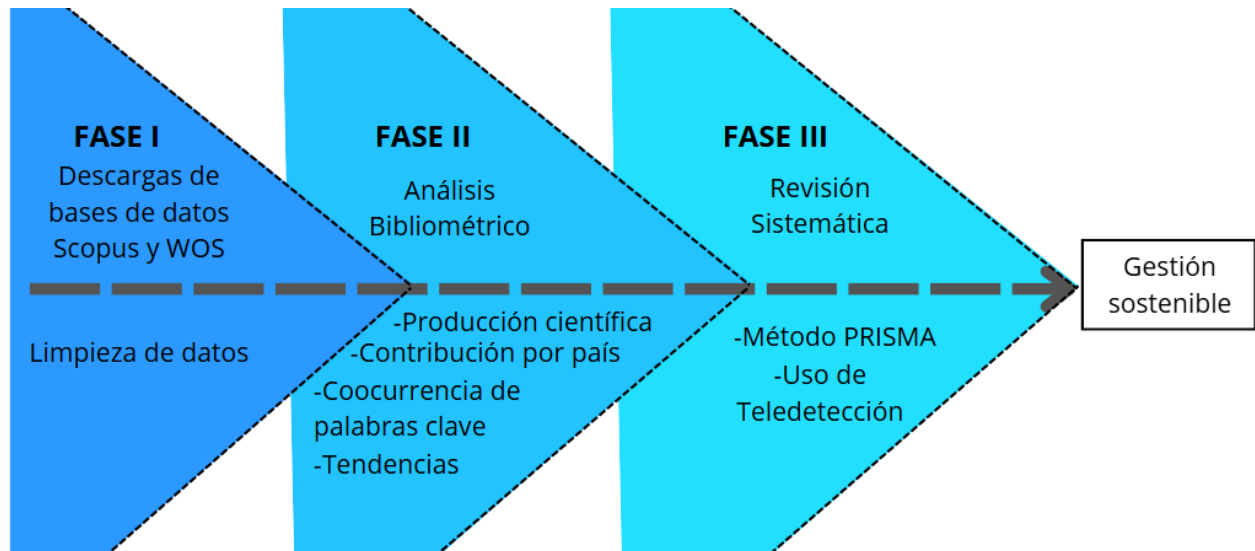
2.2.1.1. Fuentes de datos. Se utilizaron las bases de datos Scopus y WoS por su amplia cobertura multidisciplinaria y su uso extendido en la indexación de literatura científica (Pradhan & Zala, 2021; Singh et al., 2021). Scopus provee indicadores y registros bibliográficos empleados en rankings universitarios internacionales como QS World University Rankings (Dobos & Sasvári, 2024), mientras que WoS, con una trayectoria consolidada, destaca por sus criterios rigurosos para incluir únicamente revistas científicas de alto impacto, priorizando calidad y relevancia de su contenido (Zhu & Liu, 2020). Ambas plataformas son de uso estándar en análisis bibliométricos y revisiones sistemáticas (Pradhan & Zala, 2021).

2.2.1.2. Herramientas de software. Python y Excel son herramientas utilizadas en estudios bibliométricos y revisiones sistemáticas para el procesamiento y posprocesamiento de los registros, respectivamente (Toaza & Esztergár-Kiss, 2024). Python (v3.9.19), con las bibliotecas pandas, NumPy, Matplotlib y seaborn, facilita el procesamiento, ya que acelera el análisis de grandes volúmenes de datos y reduce la probabilidad de error. Resulta útil para la unificación de registros de múltiples bases de datos, limpiar duplicados e inconsistencias y visualizar tendencias según el número de publicaciones y citas (Toaza & Esztergár-Kiss, 2024). El posprocesamiento manual en Excel permite la depuración final y la verificación de coherencia, como detección de inconsistencias residuales generadas durante los pasos automáticos (Hallinger & Kovačević, 2023; Vignau et al., 2024). VOSviewer (v1.6.19) se utiliza en estudios bibliométricos y revisiones sistemáticas para construir y visualizar mapas de redes

basados en datos bibliográficos (van Eck & Waltman, 2010; Wicaksono, 2023). En estudios bibliométricos, permite el análisis de coautoría, cocitación y coocurrencia de términos, lo que facilita la comprensión de dinámicas colaborativas, las principales corrientes de pensamiento y las tendencias emergentes en investigación (van Eck & Waltman, 2010; Velastegui-Montoya et al., 2023; Wicaksono, 2023). En revisiones sistemáticas, VOSviewer facilita la visualización de la estructura de la literatura, la identificación de temas y subtemas relevantes y el análisis de la evolución temporal de los enfoques de investigación, contribuyendo así a una revisión más informada y estructurada (Herrera-Franco et al., 2024; van Eck & Waltman, 2010). Bibliometrix es un paquete de R para estudios bibliométricos y revisiones sistemáticas que permite analizar y visualizar datos bibliográficos (Aria & Cuccurullo, 2017). Los estudios bibliométricos permiten evaluar la producción científica, analizar redes de colaboración y relaciones de cocitación, y mapear la evolución de temas y tendencias de investigación (Aria & Cuccurullo, 2017; Morante-Carballo et al., 2023). Las revisiones sistemáticas facilitan la identificación de temas principales, el análisis temporal de la literatura y la síntesis de grandes volúmenes de información, lo que proporciona una base sólida para estructurar y comprender el estado del conocimiento en un área específica (Aria & Cuccurullo, 2017; Carrión-Mero et al., 2024).

2.2.2 Métodos

El proceso metodológico (**Figura 2.1**) se desarrolló en tres fases: (I) selección y procesamiento de la información bibliográfica, (II) análisis bibliométrico y (III) revisión sistemática.

Figura 2.1*Marco metodológico del estudio*

2.2.2.1. Fase I: Selección y procesamiento de la información base. La búsqueda se diseñó para Scopus y WoS, combinando términos asociados con TI y con expresiones ecológicas o ambientales en inglés. El estudio aplicó estas ecuaciones a títulos, resúmenes y palabras clave para maximizar la recuperación de documentos relevantes en todos los idiomas. La búsqueda se realizó el 31 de enero de 2025, abarcando documentos publicados entre 1971 y 2024. La combinación inicial de Scopus (442) y WoS (273) arrojó 715 resultados. Este enfoque eliminó 256 duplicados y 9 registros etiquetados como retractados, erratas y editoriales, lo que dejó un total de 450 documentos a analizar. (Véase el Apéndice A para las ecuaciones de búsqueda). Se planteó inicialmente el uso de los términos "transferencia de agua", "water transfer" o "desviación de agua", "water diversion" para representar los TI en la ecuación de búsqueda, pero se evitaron al generar una enorme cantidad de resultados no relacionados con el propósito de este trabajo.

2.2.2.2. Fase II: Análisis bibliométrico. El análisis bibliométrico incluyó la evolución de la producción científica. Python (v3.9.19), con sus bibliotecas Matplotlib y seaborn, permitió

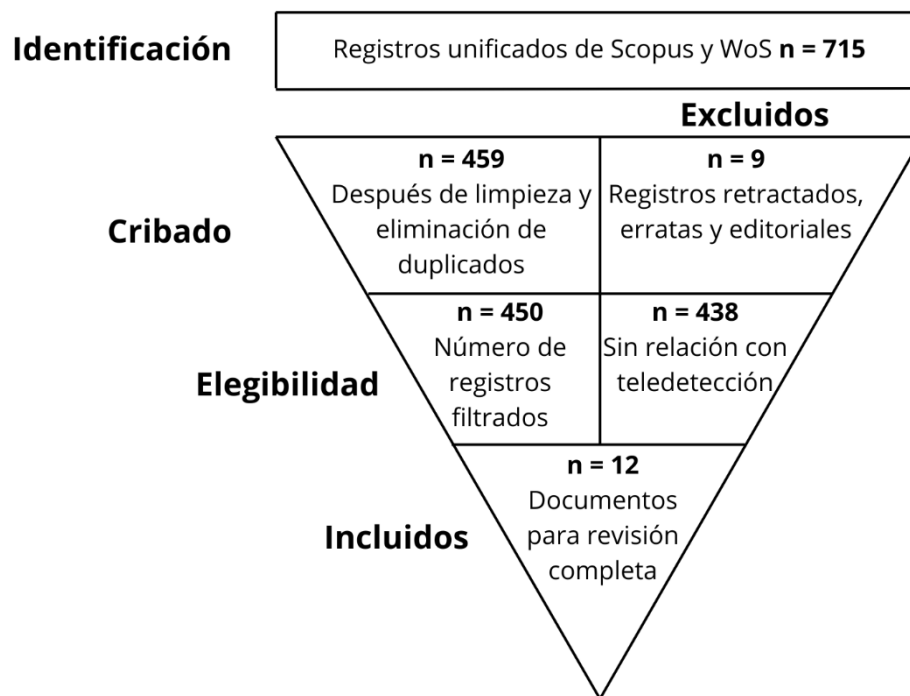
representar gráficamente el número de publicaciones y citas anuales, a fin de caracterizar la dinámica del crecimiento de la investigación sobre TI y sus impactos. VOSviewer generó un mapa de coautoría para identificar redes de colaboración internacional, estableciendo un umbral mínimo de 3 artículos por país. Asimismo, se ejecutó un análisis de coocurrencia de palabras clave de autor, con un umbral mínimo de 5 apariciones, utilizando un tesaurus para unificar sinónimos y eliminar palabras vacías, lo que permitió examinar las áreas temáticas más relevantes. Bibliometrix (Aria & Cuccurullo, 2017) se utilizó para detectar temas de tendencia (trend topics) y su evolución temporal, basándose en la frecuencia y la distribución de las palabras clave de autor empleadas en publicaciones científicas. La persistencia de palabras clave específicas a lo largo del tiempo reflejan la evolución de los temas de investigación, lo que permitió detectar tendencias científicas de forma objetiva y sistemática. El estudio estableció un mínimo de 7 apariciones para las palabras clave del autor, con un máximo de 4 términos mostrados por año. Se utilizó un tesaurus para unificar términos equivalentes y sinónimos.

2.2.2.3. Fase III: Revisión sistemática. La revisión sistemática se centró en el uso de la teledetección para evaluar impactos ambientales de los TI. Incluyó documentos que aplicaron técnicas de teledetección y abordaron variables ecológicas como UCS y la calidad del agua en contextos de TI. El procedimiento se guió por PRISMA (por sus siglas en inglés Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses; Page et al., 2021), empezando con la identificación de registros en Scopus y WoS; el cribado o limpieza (eliminación de duplicados y retractados); y la elegibilidad basada en relación con la teledetección identificada en títulos, resúmenes o palabras clave. Finalmente, se filtraron 12 documentos para revisión completa como se observa en la **Figura 2.2**. Estos 12 documentos equivalen al 2,67 % de la base depurada de 450 registros, lo que no implica directamente que la teledetección esté ausente en el 97,33 % de

los proyectos de TI. La tabla del Apéndice B resume las metodologías de teledetección, los indicadores ambientales y los principales hallazgos de estos 12 trabajos.

Figura 2.2

Diagrama de flujo PRISMA (2020) del proceso de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión



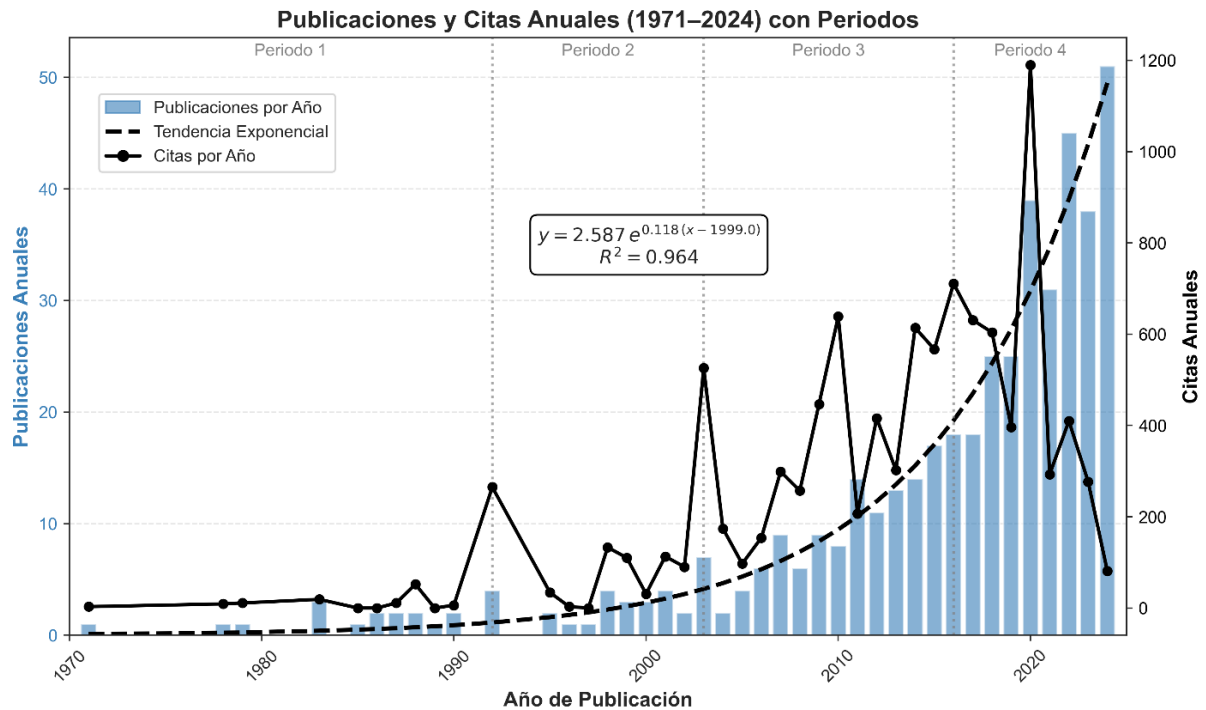
2.3 Resultados

2.3.1 Evolución de la producción científica

Entre 1971 y 2024, la investigación sobre TI ha tenido un crecimiento exponencial, siendo especialmente notable a partir del año 2000, como se muestra en la **Figura 2.3**. Se registraron picos notables de citas en 1992, 2003, 2010, 2016 y 2020. Después del año 2000, cobró impulso el interés por la sostenibilidad y las perspectivas multidisciplinarias (Nkomo & van der Zaag, 2004; Tortajada & Castelán, 2003).

Figura 2.3

Evolución del número de publicaciones y citas anuales (1971-2024)



Nota. Barras: publicaciones; línea continua: citas; línea discontinua: tendencia exponencial. Elaboración propia.

Periodo 1 (1971-1992)

La producción anual osciló entre 1 y 2 documentos. La investigación se enfocó principalmente en la eficiencia de la ingeniería (Carlin, 1971). Sin embargo, a finales de la década de 1980, la atención comenzó a centrarse en las evaluaciones ambientales en regiones como la cuenca del Volga (Avakyan et al., 1986). Esta transformación se debió en parte a la creciente conciencia pública que exigía una mayor responsabilidad ambiental, lo que llevó a los investigadores a destacar la necesidad de conciliar el crecimiento económico con las consideraciones ecológicas (Chen, 1992; Z. Zhang et al., 1992).

Periodo 2 (1993-2003):

Surgió un enfoque interdisciplinario que integraba las dimensiones sociales, económicas y políticas (Horta, 1995). Proyectos de gran repercusión, como el Proyecto Hídrico de las Tierras Altas de Lesoto, pusieron de manifiesto los conflictos socioeconómicos (Gibbins & Heslop, 1998). Los expertos ya no consideraban la escasez de agua como un problema que la infraestructura pudiera resolver por sí sola; en cambio, estrategias como la gestión de la demanda y la conservación del agua se convirtieron en una tendencia general (Tortajada & Castelán, 2003).

Periodo 3 (2004-2016):

A medida que la población se preocupaba más por la equidad y la protección del medio ambiente, investigadores y legisladores desarrollaron nuevas maneras de ayudar a las comunidades a tomar mejores decisiones (Labadie et al., 2007; Matete y Hassan, 2005). Con la expansión de la agricultura, el crecimiento de las ciudades y la urgencia del cambio climático se hizo evidente la importancia de involucrar a la población local y monitorear regularmente la situación sobre el terreno (Mokorosi & van der Zaag, 2007). Las perspectivas complejas que incorporaban resiliencia ecológica, gobernanza participativa y adaptación climática se hicieron comunes (Hong et al., 2016; Islar & Boda, 2014). Múltiples estudios examinaron los impactos de las TI en las comunidades biológicas, la calidad del agua y la recarga de acuíferos (Fornarelli & Antenucci, 2011). La producción anual alcanzó entre 14 y 18 artículos, con entre 600-700 citas.

Periodo 4 (2017-2024):

La sostenibilidad se generalizó, pero se empezó a cuestionar la viabilidad de las transferencias de agua a gran escala (Wilson et al., 2017). La atención se centró en el nexo agua-energía-alimentos (Nasiri-Gheidari et al., 2018), y aumentó la preocupación por la propagación de especies invasoras a nuevas zonas (Gallardo & Aldridge, 2018). Para 2020, el interés alcanzó

su punto máximo, con 39 nuevos estudios y más de 1.000 citas que destacaron la creciente concienciación sobre el impacto de TI en las comunidades locales y el medio ambiente. Entre 2021 y 2024 se registró un promedio anual de 30–50 publicaciones. Ganaron protagonismo big data (macrodatos), el machine learning (aprendizaje automático) y los análisis hidroeconómicos avanzados (Nong et al., 2024). Investigadores y responsables de políticas enfatizaron índices de sostenibilidad que integran calidad del agua, servicios ecosistémicos y resiliencia (M. Yang et al., 2024; Zhou et al., 2023). La justicia hídrica, la participación social y la compensación ecológica se consolidaron como pilares en la planificación de los recursos hídricos (Bhattarai et al., 2023).

2.3.2 Colaboración entre países

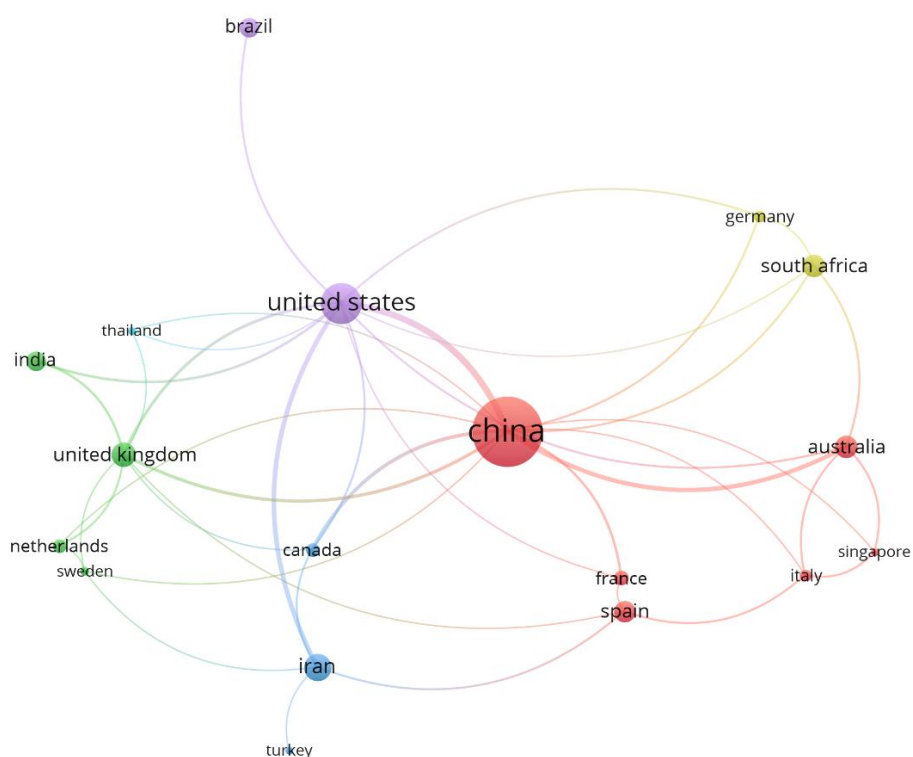
VOSviewer identificó 18 países con al menos 3 publicaciones y vínculos de coautoría. Entre los cinco países con mayor número de colaboración, China registró 210 vínculos (fuerza total de enlace), seguida de Estados Unidos con 74, Irán con 35, el Reino Unido con 28 y Australia con 23. El mapa de coautoría generado con VOSviewer (**Figura 2.4**) sitúa a China y Estados Unidos en el centro de las redes de colaboración, con alta fuerza total de enlace (vínculos totales), lo que indica mayor intensidad de colaboración internacional (**Tabla 2.1**).

De 19 publicaciones con coautoría entre Estados Unidos y China, 13 abordaron proyectos ubicados en China, 2 en Estados Unidos y 4 no especificaron la ubicación. L. Zhang et al. (2015) identificaron que la proporción de publicaciones estadounidenses sobre trasvases intercuenca (TI) realizadas en colaboración internacional fue mayor que la de aquellas sin colaboración. Un ejemplo representativo de esta coautoría chino-estadounidense es Qu et al. (2020), quienes analizaron la calidad del agua en lagos represados a lo largo de la ruta oriental del SNWDP.

Tabla 2.1*Clasificación de países por colaboración internacional (coautoría)*

Rank	País	Documentos	Citaciones	Fuerza total del enlace
1	China	210	4.372	51
2	Estados Unidos	74	2.304	47
3	Irán	35	779	16
4	Reino Unido	28	629	18
5	Australia	23	1.182	17

Nota. La fuerza total del enlace de VOSviewer representa la suma de las intensidades de coautoría de un país con los demás.

Figura 2.4*Mapa de coautoría entre países (VOSviewer)*

Nota. El tamaño del nodo refleja el número de documentos (peso); el color indica el clúster de coautoría; las líneas representan vínculos de colaboración y su grosor la fuerza del enlace. La fuerza total del enlace es la suma de las fuerzas de enlace de cada país con los demás.

2.3.3 Co-ocurrencia de palabras clave

Del total de palabras clave de autor, en VOSviewer se consideraron aquellas con al menos 5 apariciones, generando 41 términos distribuidos en 6 clústeres (**Figura 2.5**). Tres clústeres destacan por su frecuencia y por la fuerza del enlace entre términos:

Clúster amarillo (operación de embalses, optimización, energía hidroeléctrica, asignación de agua). Reúne estudios que aplican optimización multiobjetivo para conciliar metas energéticas, socioeconómicas y ecológicas (Jia et al., 2024; Yin et al., 2022).

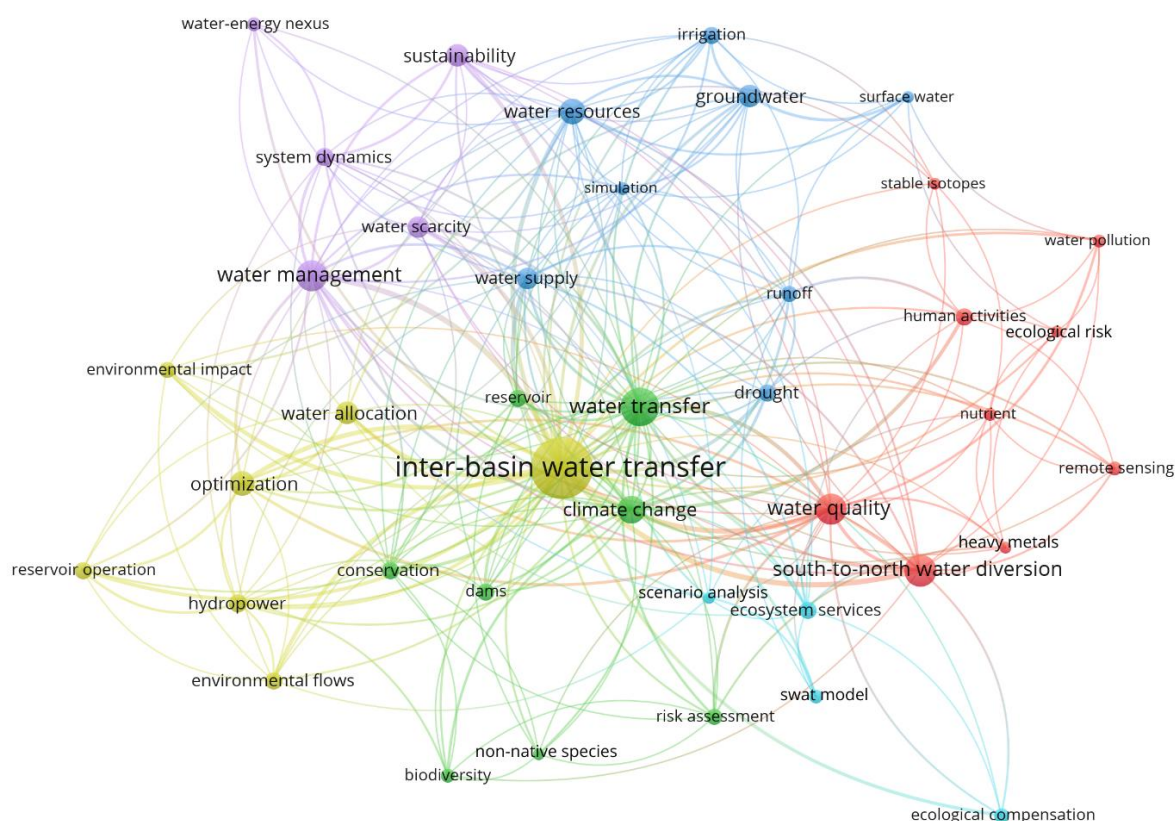
Clúster verde (cambio climático, biodiversidad, especies no nativas). Examina cómo los trasvases interactúan con la variabilidad climática, la pérdida de biodiversidad y la introducción de especies invasoras. L. Wu et al. (2020) demostraron que más del 60 % de la reducción del caudal se atribuye a actividades humanas, incluidas las transferencias y se señala la proliferación de especies exóticas asociada a nuevas conexiones hídricas.

Clúster rojo (SNWDP, calidad del agua, actividades humanas, teledetección). Se subraya la importancia de métodos estadísticos avanzados como el análisis de varianza, el análisis de componentes principales, el índice de calidad del agua y el uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT) para detectar eutrofización o contaminación (Guo et al., 2020a; Qu et al., 2020). En este grupo, se identificó el tema teledetección usado para la revisión sistemática. En la **Figura 2.5** se puede observar qué términos tienen conexión con teledetección: actividades humanas, nutrientes, SNWDP y el cambio climático del clúster verde; esto nos ofrece una visión general de las asociaciones temáticas en el campo de estudio.

En conjunto, estos clústeres ilustran la naturaleza multidimensional de los TI, desde la perspectiva operativa y de ingeniería hasta las consideraciones ecológicas y tecnológicas.

Figura 2.5

Mapa de coocurrencia de palabras clave (VOSviewer)



Nota. Tamaño del nodo: frecuencia; color: clúster; grosor del enlace: fuerza del enlace.

2.3.4 Temas de tendencia

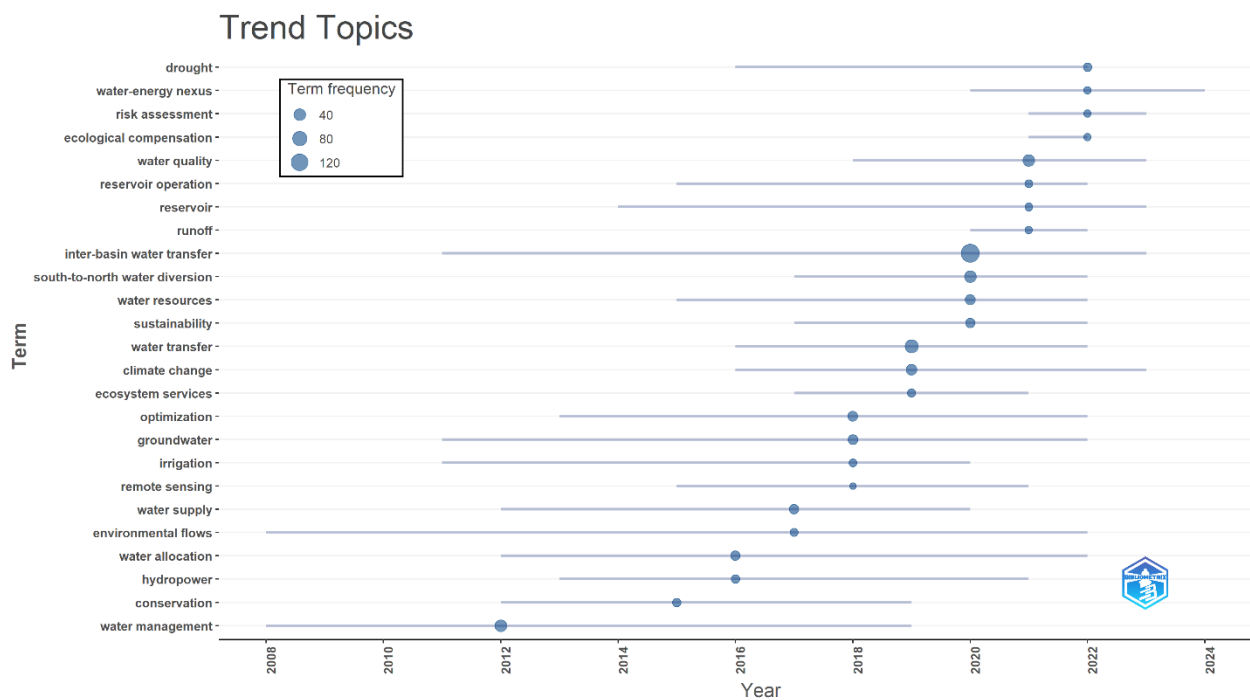
Un análisis bibliométrico de palabras clave de autor con al menos 7 apariciones identificó términos de alta frecuencia, entre ellos “transferencia de agua” (58), “Desvío de Agua Sur–Norte (SNWDP)” (40) y “calidad del agua” (38). En cambio, “gestión del agua” (38) mostró un repunte marcado durante la década de 2010 (Q1 = 2008; mediana = 2012; Q3 = 2019, donde Q1 y Q3 representan el primer y el tercer cuartil, respectivamente). En el extremo opuesto, términos como “nexo agua–energía” y “evaluación de riesgos” aparecen como enfoques emergentes, con primeras apariciones alrededor de 2020-2021.

La **Figura 2.6** muestra temas que se inician temprano y permanecen vigentes, por ejemplo, “gestión del agua”, y otros con ventanas de aparición más concentradas, como “compensación ecológica” (Q1 = 2021; Q3 = 2022), lo que indica líneas de investigación recientes. Asimismo, el auge de “cambio climático” y “Desvío de Agua Sur-Norte” en torno a 2019-2020 se alinea con la intensificación de los estudios sobre gestión del agua bajo incertidumbre climática.

El análisis confirma la tendencia hacia una mayor consideración de los impactos integrales, los costos ecológicos y las herramientas tecnológicas de monitoreo, como la teledetección, para la planificación y operación de proyectos de TI.

Figura 2.6

Mapa bibliométrico de temas de tendencia



Nota. Período de aparición de cada término (barra horizontal) y frecuencia (tamaño de la burbuja).

2.3.5 Revisión sistemática: teledetección en evaluación de impactos

Panorama de los 12 estudios elegibles

La revisión de la literatura muestra que la teledetección es esencial para identificar y cuantificar los impactos ambientales de los grandes TI, así como para apoyar la planificación, los estudios de factibilidad y la toma de decisiones. Varios trabajos emplean imágenes satelitales (Landsat, Sentinel) y análisis de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para caracterizar el estado de la cobertura de la vegetación antes, durante y después de las obras. Se propusieron índices de fragilidad ecológica que combinan el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y datos climáticos para identificar áreas vulnerables a la alteración del flujo en la meseta de Qinghai-Tíbet (S.-T. Yang et al., 2002). En la ruta media del SNWDP, el análisis multitemporal de NDVI evidenció un descenso marcado de la vegetación en la franja de construcción, seguido de una recuperación parcial al finalizar las obras (Dong et al., 2016). En la cuenca del Zayandeh-Rud (Irán), la comparación de fotografías aéreas históricas con Landsat mostró una creciente artificialización de la llanura de inundación y un estrechamiento significativo del cauce asociado tanto a la sobreexplotación como al TI (Fazelpoor et al., 2022).

Varios artículos también se enfocan en la calidad del agua y la dinámica de nutrientes en cuencas o embalses terminales. En el río Melen (Turquía), la clasificación del uso del suelo con Landsat permitió estimar las cargas difusas de nitrógeno (N) y fósforo (P) e identificar subcuencas agrícolas con picos estacionales de contaminación (Gurel et al., 2011). Por otro lado, en el embalse de Miyun (China), la integración de Landsat con el modelo ribereño (RIPAM, por sus siglas en inglés Riparian Model) mostró que el ascenso del nivel del agua reduce la absorción de N y P por la vegetación, aumentando el riesgo de eutrofización (S. Yang, et al., 2018a). Otro estudio combinó NDVI, el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) y VANT para estimar la biomasa en la franja ribereña del embalse, concluyendo que el aumento del nivel del

agua inunda parte de la vegetación y limita su función de filtro ecológico (S. Yang, et al., 2018b). El modelado hidrogeológico 3D acoplado con teledetección resulta esencial en regiones áridas o kársticas. En la cuenca del lago Sujan (China), la combinación de Landsat, el Satélite de Elevación de Hielo, Nubes y Tierra (ICESat) y FEFLOW (Finite-Element subsurface FLOW) simuló descensos del nivel freático de hasta 68 m y deterioro de humedales bajo distintos escenarios de trasvase (Z. Yang et al., 2021). De igual manera, en la zona de recarga de Jinan (China), la combinación de perforaciones, métodos geofísicos y uso del suelo derivado por teledetección permitió evaluar cómo la urbanización y las estrategias de derivación controlada pueden afectar la recarga de aguas subterráneas que alimenta manantiales importantes (Ma et al., 2018). En la cuenca del Haihe, el uso de VANT, series Landsat y estaciones hidrológicas de teledetección (RSHS, Remote Sensing Hydrological Stations) mostró un rezago de 3-11 años en la recuperación de los caudales superficiales tras la implementación de desvíos y el aumento de la precipitación, atribuido principalmente a la sobreexplotación del acuífero (Lou et al., 2023).

2.4 Discusión

2.4.1 Principales hallazgos y literatura reciente

Los resultados bibliométricos evidencian un crecimiento exponencial de la producción sobre TI, impulsado por el auge de grandes proyectos hídricos en países como China y Estados Unidos (**Figuras 2.3 y 2.4**). En la última década, esta expansión se ha consolidado con enfoques multidisciplinarios que combinan ingeniería, ecología, modelado hidrológico y análisis socioeconómicos (Nong et al., 2024; Yan et al., 2023). Esta tendencia refleja la necesidad de examinar los impactos ambientales y sociales de infraestructuras cada vez más complejas y de buscar soluciones que equilibren el suministro de agua y la sostenibilidad de los ecosistemas (Shumilova et al., 2018).

La revisión sistemática confirma que la teledetección es esencial para caracterizar cambios en la cobertura de la vegetación, la calidad del agua y la dinámica de recarga de acuíferos (Lou et al., 2023; Z. Yang et al., 2021). En conjunto, los estudios muestran que la combinación de datos satelitales (Landsat, Sentinel) con VANT, la modelación hidrológica como FEFLOW y RSHS proporciona una visión integral de los procesos ambientales, abarcando tanto grandes escalas espaciales como análisis detallados en áreas específicas (Lou et al., 2023; S. Yang et al., 2018b; Z. Yang et al., 2021). Sin embargo, persisten vacíos metodológicos y de cobertura temporal, pues muchos estudios carecen de series temporales suficientemente largas para comprender los efectos de largo plazo de la construcción y operación de TI (Annys, 2021).

2.4.2 Implicaciones ambientales

La expansión agrícola e industrial a lo largo de canales y embalses, impulsada por la mayor disponibilidad de agua superficial (Dhadse & Kardbhajne, 2024), altera los regímenes de flujo en ríos y lagos receptores y conduce a fragmentación de hábitats, deforestación y degradación de la calidad del agua (Caschetto et al., 2014; Zhuang, 2016). En la cuenca del Zayandeh-Rud (Irán), por ejemplo, la combinación de fotografías aéreas históricas con imágenes Landsat evidenció una rápida artificialización de las zonas ribereñas, con una reducción significativa del cauce activo (Fazelpoor et al., 2022). Un patrón similar se ha documentado en el trasvase Tajo-Segura en España (Morote et al., 2020), lo que sugiere que el desarrollo agrícola e inmobiliario alrededor de los TI puede rebasar la capacidad de autorregulación de los ecosistemas. Por otro lado, algunos estudios señalan que los TI pueden aportar beneficios ecológicos concretos, como la recuperación de acuíferos sobreexplotados o la disminución de la subsidencia del terreno (Su et al., 2022; Z. Wang et al., 2024). Una gestión adecuada de los volúmenes transferidos en regiones áridas y semiáridas podría reducir la presión sobre manantiales y humedales críticos (Ma et al., 2018). Sin embargo, la evidencia también muestra

que estos efectos positivos dependen de planes de gestión adaptativa, medidas de compensación ecológica y monitoreo continuo que permitan anticipar y mitigar las alteraciones a largo plazo.

2.4.3 Contribuciones de la teledetección

La aplicación de técnicas de teledetección ha evolucionado desde la detección de cambios en vegetación y superficies de agua mediante índices como NDVI y NDWI, hasta su integración con modelos de flujo subterráneo 3D FEFLOW y herramientas de evaluación de calidad del agua como RIPAM juntamente con RSHS. Estos enfoques permiten:

- Monitorear perturbaciones a distintas escalas. La amplia cobertura y la frecuencia de revisita de los satélites facilitan detectar tendencias espaciales y temporales (p. ej., deforestación a lo largo de un canal) y relacionarlas con eventos climáticos o variaciones estacionales (Gurel et al., 2011; Nasiri et al., 2023).

- Evaluar la respuesta de los ecosistemas al cambio climático. La imagerie multitemporal permite analizar cómo los ecosistemas se adaptan a la variabilidad de la precipitación y al aumento de la severidad de las sequías; además de medir resiliencia, revela interacciones positivas y negativas entre los cambios climáticos y la dinámica ecosistémica (L. Wu et al., 2020).

- Caracterizar procesos subterráneos. La recarga de acuíferos y la extensión de zonas de subsidencia pueden estimarse combinando datos de teledetección con redes de pozos de monitoreo y modelación hidrológica (Lou et al., 2023; Z. Yang et al., 2021).

A pesar de estos avances, persisten vacíos críticos. La mayoría de los estudios se centra en vegetación y calidad de aguas superficiales, y son comparativamente pocos los que abordan fauna acuática y biodiversidad como seguimiento de especies nativas o detección de invasoras (Gallardo & Aldridge, 2018). También hay escasez de metodologías que integren de forma robusta la dimensión social con la teledetección, como combinar indicadores socioeconómicos

con series satelitales, lo que limita la comprensión de interacciones complejas entre cambios ambientales y actividades humanas. Además, la asignación de agua entre cuencas se complica al considerar la hidrología de largo plazo (Emanuel et al., 2015). La teledetección permite mapear usos del suelo y zonas potenciales de recarga, y cuantificar deforestación, erosión y sedimentación de cauces de forma sincrónica y repetible (Mashala et al., 2023; Pulido-Velazquez et al., 2015). Sin embargo, no mide directamente los flujos subterráneos ni calcula la recarga efectiva, ni sustituye a los sensores in situ que registran continuamente caudal y calidad del agua; para garantizar la fiabilidad de las estimaciones satelitales, es necesario calibrar y validar con mediciones de campo (Beselly et al., 2021).

Paralelamente, es posible detectar la variabilidad de los volúmenes transferidos asociada a la precipitación mediante productos derivados de sensores ópticos y de radar, insumos clave para formular modelos hidrológicos/matemáticos calibrados y validados con datos de estaciones de aforo (Müller et al., 2021; Pereira-Cardenal et al., 2011). La integración de mediciones in situ y teledetección constituye el enfoque más robusto para evaluar los efectos de mediano y largo plazo de los TI y para fortalecer la gestión y la gobernanza de los recursos hídricos (Kaplan et al., 2024; Srivastava et al., 2024).

2.4.4 Perspectivas socioeconómicas y de gobernanza

La construcción y puesta en marcha de trasvases intercuenca TI suele generar tensiones entre regiones donantes y receptoras, porque la distribución de beneficios y cargas tiende a ser asimétrica (Morote et al., 2020). Este fenómeno se ha documentado en proyectos como el Lesotho Highlands Water Project en África, donde la redistribución del agua desencadenó conflictos territoriales y afectaciones a comunidades locales (Gibbins & Heslop, 1998). De forma similar, a lo largo de la ruta central del SNWDP de China se han reportado desplazamientos de pobladores y pérdida de tierras agrícolas (Caschetto et al., 2014; Yan et al.,

2023). Estos casos refuerzan que los TI no son solo un asunto de disponibilidad hídrica, sino también un desafío de gobernanza que involucra marcos legales, participación ciudadana e instituciones robustas.

En este marco, la teledetección puede complementar las herramientas de decisión al aportar información espacialmente explícita sobre el estado de los recursos naturales y los usos del suelo (Song et al., 2020). Sin embargo, abordar los conflictos sociales exige además análisis cualitativos, mecanismos de compensación ambiental y participación activa de las comunidades afectadas (Daga et al., 2020). La información satelital más detallada no transformará la política hídrica sin estrategias de gobernanza adecuadas.

La asignación de agua entre cuencas requiere acciones de gobernanza porque implica un proceso sensible: reducir la disponibilidad en una región para satisfacer la demanda en otra (Liu et al., 2023). Las políticas públicas de las unidades administrativas y territoriales involucradas deben acordar medidas para conservar áreas de recarga y controlar la deforestación; de lo contrario, esas áreas se vuelven más vulnerables (Ahmad et al., 2022). Los productos de teledetección ayudan a los gobiernos a establecer rutinas de monitoreo que respalden medidas de planificación de corto, mediano y largo plazo, con el fin de reducir conflictos y asegurar la disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas (Ogashawara et al., 2017). En un contexto de mayor variabilidad climática, atender las disputas por el uso del agua es esencial para mantener la seguridad hídrica, especialmente durante las sequías, que ponen a prueba la resiliencia de los acuerdos de asignación (Islam & Mostafa, 2024).

2.4.5 Métodos avanzados de evaluación y modelado

La adopción de enfoques integrados, como el modelado hidroeconómico y los sistemas de apoyo a la decisión (DSS, por sus siglas en inglés), permite cuantificar tanto el valor ecológico de los caudales transferidos como los costos y beneficios socioeconómicos de mediano

y largo plazo (Souza da Silva & Alcoforado de Moraes, 2021). Al combinarse con teledetección, modelado hidrológico y técnicas de análisis participativo, resulta más factible identificar escenarios óptimos que equilibren los requerimientos de suministro con la protección de los ecosistemas (Matete & Hassan, 2005; S. Yang et al., 2018a).

Con base en ello, la investigación futura podría centrarse en:

- Monitoreo multitemporal de largo plazo: generar conjuntos de datos satelitales y de campo que abarquen todas las fases del trasvase (preconstrucción, construcción y operación).
- Dimensión biológica más amplia: integrar la distribución y dinámica de especies nativas e invasoras mediante muestreos in situ, algoritmos de teledetección y modelado de hábitat.
- Perspectiva socioeconómica detallada: vincular bases de uso del suelo, tenencia de la tierra, demografía y percepciones locales con indicadores satelitales de cambio ambiental.
- Efectos del cambio climático: simular escenarios de sequías extremas y lluvias intensas para pronosticar la confiabilidad del trasvase y los riesgos de degradación ecológica.

La teledetección provee observaciones periódicas en series temporales para monitorear los efectos de los procesos hidrológicos en cuencas con transferencias de agua, y desempeña un papel fundamental en el análisis prospectivo del impacto estacional de la variabilidad hídrica y sus consecuencias. Es imprescindible desarrollar políticas públicas que aseguren una gobernanza eficaz y adaptativa durante las crisis hídricas, a fin de salvaguardar la sostenibilidad de los TI y el acceso equitativo al agua.

2.4 Conclusiones

La producción científica sobre trasvases intercuenca (TI) ha crecido exponencialmente, impulsada por la necesidad de responder a la escasez hídrica y por la construcción de grandes infraestructuras en distintas regiones. China y Estados Unidos destacan por volumen de publicaciones y colaboración internacional. Esta revisión muestra que, si bien los TI pueden ser esenciales para garantizar el abastecimiento de agua y, en ciertos contextos, energía, también pueden generar impactos ambientales significativos si no se planifican y gestionan con rigor.

En términos ambientales, los TI pueden alterar regímenes de flujo, fragmentar hábitats, favorecer la expansión de especies invasoras y degradar la calidad del agua, además de modificar la recarga de acuíferos. En contraparte, en contextos específicos contribuyen a aliviar la sobreexplotación de acuíferos, reducir la subsidencia y mejorar el abastecimiento en zonas deficitarias, apoyando metas de los ODS 6 y 15.

Con base en un procedimiento inspirado en PRISMA, la revisión sistemática identificó 12 estudios que reconocen a la teledetección como herramienta clave para evaluar y monitorear los impactos asociados a los TI. La teledetección permite analizar la evolución de la cobertura vegetal, los cambios en aguas superficiales y la dinámica de recarga. No obstante, persisten vacíos: muchas investigaciones carecen de series temporales extensas y no integran suficientemente variables socioeconómicas ni biodiversidad faunística. Para una comprensión holística, los datos satelitales deben integrarse con mediciones in situ y modelado avanzado

Líneas de investigación futura. Se requiere consolidar un monitoreo multitemporal de largo plazo mediante series satelitales y de campo que cubran preconstrucción, construcción y operación, a fin de estimar con precisión la magnitud y la duración de los impactos, así como detectar umbrales, rezagos y efectos acumulativos. En paralelo, es necesario ampliar la integración socio-biológica, incorporando indicadores de fauna (nativa e invasora), encuestas

socioculturales y análisis de gobernanza, y vinculando estos insumos con indicadores satelitales de cambio ambiental para comprender mejor las interacciones eco-sociales.

Asimismo, debe profundizarse en la adaptación al cambio climático, incorporando escenarios de sequías extremas y lluvias intensas en los modelos predictivos, dada la incertidumbre que introducen en el balance hídrico y la gestión de grandes infraestructuras. Finalmente, conviene desarrollar herramientas de apoyo a la decisión que combinen teledetección, modelado hidroeconómico y criterios socioambientales, con el fin de planificar los TI de manera integrada y sostenible.

2.5 Referencias

- Ahmad, A., Ahmad, S., Nabi, G., Liu, Q.-J., Islam, N., & Luan, X. (2022). Trends in deforestation as a response to management regimes and policy intervention in the Hindu Kush Himalaya of Pakistan. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 810806. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.810806>
- Aimar, A. (2017). Managing water crisis in the North African region: With particular reference to Jijel region. In *Environmental change and human security in Africa and the Middle East* (pp. 219–237). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45648-5_12
- Anny, S. (2021). The impact of river regulation on downstream socio-hydrologic systems in Ethiopia. *Afrika Focus*, 34(2), 360–378. <https://doi.org/10.1163/2031356X-34020010>
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Arias, A., Feijoo, G., & Moreira, M. T. (2020). Technoeconomic analysis, life cycle assessment and economic analysis of wastewater and sludge treatment systems. In *Wastewater treatment residues as resources for biorefinery products and biofuels* (pp. 85–114). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816204-0.00005-9>
- Avakyan, A. B., Kornilov, B. A., Litvinov, A. S., & Yakovlev, V. N. (1986). Prediction of the ecological conditions in the Volga Basin in connection with interbasin water transfer. *Water Resources*, 13(5), 512–516.

- Awty-Carroll, K., Bunting, P., Hardy, A., & Bell, G. (2019). An evaluation and comparison of four dense time series change detection methods using simulated data. *Remote Sensing*, 11(23), 2779. <https://doi.org/10.3390/rs11232779>
- Beselly, S. M., Lufira, R. D., & Andawayanti, U. (2021). Seasonal spatio-temporal land cover dynamics in the Upper Brantas Watershed. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 930(1), 012021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/930/1/012021>
- Bhattarai, K. K., FitzGibbon, J., & Pant, L. P. (2023). Rethinking collaborative governance: Contested legitimacy of the Melamchi inter-basin water transfer for municipal use in Nepal. *Regional Environmental Change*, 23(4), 161. <https://doi.org/10.1007/s10113-023-02157-5>
- Bossler, J. D., Campbell, J. B., McMaster, R. B., & Rizos, C. (2010). Information extraction from remotely sensed data. In *Manual of geospatial science and technology* (pp. 364–389). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420087345-27>
- Carlin, A. (1971). Water resources development in an environmentally conscious era. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 7(2), 221–227. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1971.tb05903.x>
- Carrión-Mero, P., Malavé-Hernández, J., Solórzano, J., Martínez-Angulo, J., & Morante-Carballo, F. (2024). A systematic review of groundwater management applied to rural development. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 19(9), 3377–3391. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.190909>

- Caschetto, M., Barbieri, M., Galassi, D. M. P., Mastroiello, L., Rusi, S., Stoch, F., Di Cioccio, A., & Petitta, M. (2014). Human alteration of groundwater–surface water interactions (Sagittario River, Central Italy): Implication for flow regime, contaminant fate and invertebrate response. *Environmental Earth Sciences*, 71(4), 1791–1807.
<https://doi.org/10.1007/s12665-013-2584-8>
- Chen, Z. (1992). Water resources development in China. In G. Le Moigne, S. Barghouti, G. Feder, L. Garbus, & M. Xie (Eds.), *Country experiences with water resources management: Economic, institutional, technological and environmental issues* (World Bank Technical Paper No. 175, pp. 175–181). The World Bank.
- Daga, V. S., Azevedo-Santos, V. M., Pelicice, F. M., Fearnside, P. M., Perbiche-Neves, G., Paschoal, L. R. P., Cavallari, D. C., Erickson, J., Ruocco, A. M. C., Oliveira, I., Padial, A. A., & Vitule, J. R. S. (2020). Water diversion in Brazil threatens biodiversity. *Ambio*, 49(1), 165–172. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01189-8>
- Dhadse, S., & Kardbhajne, A. (2024). Biodiversity loss due to construction of dams and hydropower projects and its impact on aquatic ecosystems. In A. K. Rathoure (Ed.), *Impact of societal development and infrastructure on biodiversity decline* (pp. 98–116). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-6950-0.ch008>
- Dobos, I., & Sasvári, P. (2024). Statistical analysis of QS World University Rankings 2021 university rankings using Scopus/SciVal databases. *Regional Statistics*, 14(4), 768–792.
<https://doi.org/10.15196/RS140407>

- Döll, P., Fiedler, K., & Zhang, J. (2009). Global-scale analysis of river flow alterations due to water withdrawals and reservoirs. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(12), 2413–2432. <https://doi.org/10.5194/hess-13-2413-2009>
- Dong, J., Chen, X., Li, Y., Gao, M., Wei, L., Tangdamrongsu, N., & Crow, W. T. (2023). Inter-basin water transfer effectively compensates for regional unsustainable water use. *Water Resources Research*, 59(12), e2023WR035129. <https://doi.org/10.1029/2023WR035129>
- Dong, M., Tang, M., Li, S., Cao, H., Deng, H., & Wu, G. (2016). Effects of water transfer project construction on vegetation patterns. *Acta Ecologica Sinica*, 36(20), 6656–6663. <https://doi.org/10.5846/stxb201504080718>
- Eilola, S., Käyhkö, N., & Fagerholm, N. (2021). Lessons learned from participatory land use planning with high-resolution remote sensing images in Tanzania: Practitioners’ and participants’ perspectives. *Land Use Policy*, 109, 105649. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105649>
- Emanuel, R. E., Buckley, J. J., Caldwell, P. V., McNulty, S. G., & Sun, G. (2015). Influence of basin characteristics on the effectiveness and downstream reach of interbasin water transfers: Displacing a problem. *Environmental Research Letters*, 10(12), 124005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124005>
- Eslamian, S., & Parvizi, S. (2023). Water transfer. In *Integrated drought management* (Vol. 2, pp. 531–546). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003276548-29>
- Fazelpoor, K., Martínez-Fernández, V., Yousefi, S., & García de Jalón, D. (2022). Increased artificiality trend driven by an inter-basin water transfer on the Zayandeh-Rud River

floodplain in Iran. *Geocarto International*, 37(26), 13369–13390.

<https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2076926>

Fornarelli, R., & Antenucci, J. P. (2011). The impact of transfers on water quality and the disturbance regime in a reservoir. *Water Research*, 45(18), 5873–5885.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.08.048>

Gallardo, B., & Aldridge, D. C. (2018). Inter-basin water transfers and the expansion of aquatic invasive species. *Water Research*, 143, 282–291.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.06.056>

Garrido-Rubio, J., Sanz, D., González-Piqueras, J., & Calera, A. (2019). Application of a remote sensing-based soil water balance for the accounting of groundwater abstractions in large irrigation areas. *Irrigation Science*, 37(6), 709–724. [https://doi.org/10.1007/s00271-019-](https://doi.org/10.1007/s00271-019-00629-3)

[00629-3](https://doi.org/10.1007/s00271-019-00629-3)

Gibbins, C. N., & Heslop, J. (1998). An evaluation of inter-basin water transfers as a mechanism for augmenting salmonid and grayling habitat in the River Wear, North-East England. *Regulated Rivers: Research & Management*, 14(4), 357–382.

[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1646\(199807/08\)14:4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1646(199807/08)14:4)

Gohari, A., Eslamian, S., Mirchi, A., Abedi-Koupaei, J., Massah Bavani, A., & Madani, K.

(2013). Water transfer as a solution to water shortage: A fix that can backfire. *Journal of Hydrology*, 491, 23–39. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.021>

Gorjian, S., Ahmed, M., Fakhraci, O., Eterafi, S., & Jathar, L. D. (2022). Solar desalination technology to supply water for agricultural applications. In *Solar energy advancements in*

agriculture and food production systems (pp. 271–311). Elsevier.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89866-9.00002-X>

Guo, B.-B., Cui, Y.-X., Fang, Y.-L., & Zhang, Y. (2022). Spatio-temporal differentiation of ecological environment quality in the Yangtze-to-Huaihe River water diversion project area: A case study of the Lujiang section. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 31(9), 2000–2010. <https://doi.org/10.11870/cjlyzyyhj202209012>

Guo, C., Chen, Y., Gozlan, R. E., Liu, H., Lu, Y., Qu, X., Xia, W., Xiong, F., Xie, S., & Wang, L. (2020b). Patterns of fish communities and water quality in impounded lakes of China's south-to-north water diversion project. *Science of the Total Environment*, 713, 136515. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136515>

Guo, C., Chen, Y., Xia, W., Qu, X., Yuan, H., Xie, S., & Lin, L.-S. (2020a). Eutrophication and heavy metal pollution patterns in the water supplying lakes of China's south-to-north water diversion project. *Science of the Total Environment*, 711, 134543. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134543>

Gurel, M., Erturk, A., Seker, D. Z., Tanik, A., Ekdal, A., Avsar, C., & Ozturk, I. (2011). Estimation of monthly diffuse nutrient loads for a watershed in Turkey. *Water and Environment Journal*, 25(2), 219–229. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2009.00214.x>

Hallinger, P., & Kovačević, J. (2023). Applying bibliometric review methods in education: Rationale, definitions, analytical techniques, and illustrations. In *International encyclopedia of education* (4th ed., pp. 546–556). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818630-5.05070-3>

- Hattaraki, S., Patil, A., & Kulkarni, S. (2020). Integrated water monitoring and control system (IWMCS). In 2020 IEEE Bangalore Humanitarian Technology Conference (B-HTC) (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1109/B-HTC50970.2020.9297890>
- Herrera-Franco, G., Merchán-Sanmartín, B., Caicedo-Potosí, J., Bitar, J. B., Berrezueta, E., & Carrión-Mero, P. (2024). A systematic review of coastal zone integrated waste management for sustainability strategies. *Environmental Research*, 245, 117968. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117968>
- Hong, X., Guo, S., Wang, L., Yang, G., Liu, D., Guo, H., & Wang, J. (2016). Evaluating water supply risk in the middle and lower reaches of Hanjiang River Basin based on an integrated optimal water resources allocation model. *Water*, 8(9), 364. <https://doi.org/10.3390/w8090364>
- Horta, K. (1995). The mountain kingdom's white oil: The Lesotho Highlands Water Project. *Ecologist*, 25(6), 227–231.
- Huang, F., Chunyu, X., Zhang, D., Chen, X., & Ochoa, C. G. (2020). A framework to assess the impact of ecological water conveyance on groundwater-dependent terrestrial ecosystems in arid inland river basins. *Science of the Total Environment*, 709, 136155. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136155>
- Hussain, M., N., K., Maurya, I., & Sinha, S. (2024). AI-optimized irrigation for sustainable agriculture. In 2024 International Conference on Advances in Data Engineering and Intelligent Computing Systems (ADICS) (pp. 1–9). <https://doi.org/10.1109/ADICS58448.2024.10533562>

- Islam, M. S., & Mostafa, M. G. (2024). Impacts of climate change on global freshwater quality and availability: A comprehensive review. *Journal of Water and Environment Technology*, 22(1), 23–36. <https://doi.org/10.2965/jwet.23-036>
- Islar, M., & Boda, C. (2014). Political ecology of inter-basin water transfers in Turkish water governance. *Ecology and Society*, 19(4), Article 15. <https://doi.org/10.5751/ES-06885-190415>
- Jia, D., Zhang, T., Wu, L., Su, X., Bai, T., & Huang, Q. (2024). Multi-objective cooperative optimization of reservoir scheduling and water resources allocation for inter-basin water transfer project based on multi-stage coupling model. *Journal of Hydrology*, 630, 130673. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130673>
- Kaplan, G., Yalcinkaya, F., Altıok, E., Pietrelli, A., Nastro, R. A., Lovecchio, N., Ieropoulos, I. A., & Tsipa, A. (2024). The role of remote sensing in the evolution of water pollution detection and monitoring: A comprehensive review. *Physics and Chemistry of the Earth*, 136, 103712. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103712>
- Labadie, J. W., Fontane, D. G., Lee, J.-H., & Ko, I. H. (2007). Decision support system for adaptive river basin management: Application to the Geum River Basin, Korea. *Water International*, 32(3), 397–415. <https://doi.org/10.1080/02508060708692220>
- Li, S., Sun, B., Zeng, Z., & Zhao, Q. (2004). Distributed modeling of nutrient transport in basin with support of remote sensing and geography information system. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 15(2), 278–282.

- Lima, T. B. R., Medeiros, P. H. A., Mamede, G. L., & de Araújo, J. C. (2023). Impact of intensive water use from farm dams on the storage dynamics in strategic reservoirs. *Hydrological Sciences Journal*, 68(16), 2422–2434.
<https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2272669>
- Liu, Y., Xin, Z., Sun, S., Zhang, C., & Fu, G. (2023). Assessing environmental, economic, and social impacts of inter-basin water transfer in China. *Journal of Hydrology*, 625, 130008.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130008>
- Loaiciga, H. A., & Doh, R. (2024). Groundwater for people and the environment: A globally threatened resource. *Groundwater*, 62(3), 332–340. <https://doi.org/10.1111/gwat.13376>
- Lou, H., Li, H., Yang, S., Wang, X., Pan, Z., Zhang, Y., Zhou, B., & Zhang, J. (2023). River discharge recovery lag in small and medium-sized rivers in response to climate change and human activities. *Journal of Hydrology*, 620, 129453.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129453>
- Ma, L., Wang, X., Wu, E., Xing, J., & Jiang, G. (2018). Protective exploitation and evaluation of a typical strong seepage zone in Jinan, the city of springs. *Science of Soil and Water Conservation*, 16(3), 103–111. <https://doi.org/10.16843/j.sswc.2018.03.013>
- Madani, K., Gohari, A., & Mirchi, A. (2013). Water transfer: A fix that may fail. In *World Environmental and Water Resources Congress 2013* (pp. 1317–1324).
<https://doi.org/10.1061/9780784412947.129>
- Maiolo, M., Carini, M., Capano, G., Pantusa, D., & Iusi, M. (2019). Trends in metering potable water. *Water Practice and Technology*, 14(1), 1–9. <https://doi.org/10.2166/wpt.2018.120>

- Mashala, M. J., Dube, T., Mudereri, B. T., Ayisi, K. K., & Ramudzuli, M. R. (2023). A systematic review on advancements in remote sensing for assessing and monitoring land use and land cover changes impacts on surface water resources in semi-arid tropical environments. *Remote Sensing*, 15(16), 3926. <https://doi.org/10.3390/rs15163926>
- Matete, M., & Hassan, R. (2005). An ecological economics framework for assessing environmental flows: The case of inter-basin water transfers in Lesotho. *Global and Planetary Change*, 47(2–4), 193–200. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.10.012>
- Mermoz, S., Prieto, J. D., Planells, M., Morin, D., Koleček, T., Mouret, F., Bouvet, A., Le Toan, T., Sheeren, D., Hamrouni, Y., Bélouard, T., Paillassa, É., Carme, M., Chartier, M., Martel, S., & Féret, J.-B. (2024). Submonthly assessment of temperate forest clear-cuts in mainland France. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17, 13743–13764. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3429012>
- Mokorosi, P. S., & van der Zaag, P. (2007). Can local people also gain from benefit sharing in water resources development? Experiences from dam development in the Orange-Senqu River Basin. *Physics and Chemistry of the Earth*, 32(15–18), 1322–1329. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2007.07.028>
- Morante-Carballo, F., Bravo-Montero, L., Montalván-Burbano, N., & Carrión-Mero, P. (2023). Bibliometric analysis of earthquake research in America: A comparative study using Web of Science and Scopus databases. *International Journal of Safety and Security Engineering*, 13(5), 965–973. <https://doi.org/10.18280/ijssse.130520>
- Morote, A. F., Hernández, M., Rico, A. M., & Eslamian, S. (2020). Interbasin water transfer conflicts: The case of the Tagus-Segura Aqueduct (Spain). *International Journal of*

Hydrology Science and Technology, 10(4), 364.

<https://doi.org/10.1504/IJHST.2020.108267>

Müller, M. F., Roche, K. R., & Dralle, D. N. (2021). Catchment processes can amplify the effect of increasing rainfall variability. *Environmental Research Letters*, 16(8), 084032.

<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac153e>

Nagler, P. L., Jarchow, C. J., & Glenn, E. P. (2018). Remote sensing vegetation index methods to evaluate changes in greenness and evapotranspiration in riparian vegetation in response to the Minute 319 environmental pulse flow to Mexico. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 380, 45–54.

<https://doi.org/10.5194/piahs-380-45-2018>

Nasiri-Gheidari, O., Marofi, S., & Adabi, F. (2018). A robust multi-objective bargaining methodology for inter-basin water resource allocation: A case study. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(3), 2726–2737. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0527-8>

Nasiri, V., Sarli, R., & Afshari, S. (2023). A review of monitoring ecohydrological events using remote sensing. In C. Maftei, R. Muntean, & A. Vaseashta (Eds.), *Modeling and monitoring extreme hydrometeorological events* (pp. 22–41). IGI Global.

<https://doi.org/10.4018/978-1-6684-8771-6.ch002>

Nkomo, S., & van der Zaag, P. (2004). Equitable water allocation in a heavily committed international catchment area: The case of the Komati Catchment. *Physics and Chemistry of the Earth*, 29(15–18), 1309–1317. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2004.09.022>

- Nong, X., Lai, C., Chen, L., & Wei, J. (2024). A novel coupling interpretable machine learning framework for water quality prediction and environmental effect understanding in different flow discharge regulations of hydro-projects. *Science of the Total Environment*, 950, 175281. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175281>
- Ogashawara, I., Curtarelli, M. P., Stech, J. L., & Tundisi, J. G. (2017). The use of remote sensing as a tool for water governance: A case study of an algal bloom at Lobo-Broa Reservoir, Itirapina, Brazil. In J. A. Daniels (Ed.), *Advances in environmental research* (Vol. 61, pp. 131–160). Nova Science Publishers.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *International Journal of Surgery*, 88, 105906. <https://doi.org/10.1016/j.ijsu.2021.105906>
- Pasetto, D., Arenas-Castro, S., Bustamante, J., Casagrandi, R., Chrysoulakis, N., Cord, A. F., Dittrich, A., Domingo-Marimon, C., El Serafy, G., Karnieli, A., Kordelas, G. A., Manakos, I., Mari, L., Monteiro, A., Palazzi, E., Poursanidis, D., Rinaldo, A., Terzago, S., Ziemba, A., & Ziv, G. (2018). Integration of satellite remote sensing data in ecosystem modelling at local scales: Practices and trends. *Methods in Ecology and Evolution*, 9(8), 1810–1821. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13018>
- Pereira-Cardenal, S. J., Riegels, N. D., Berry, P. A. M., Smith, R. G., Yakovlev, A., Siegfried, T. U., & Bauer-Gottwein, P. (2011). Real-time remote sensing driven river basin modeling

using radar altimetry. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(1), 241–254.

<https://doi.org/10.5194/hess-15-241-2011>

Pérez-Sánchez, M., Sánchez-Romero, F. J., & López-Jiménez, P. A. (2017). Nexos agua-energía: optimización energética en sistemas de distribución. Aplicación “Postravase Júcar-Vinalopó” (España). *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(4), 19–36.

<https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-04-02>

Pradhan, P., & Zala, L. N. (2021). Bibliometric analysis and comparison of global research literature on research data management extracted from Scopus and Web of Science during 2000–2019. *Library Philosophy and Practice*.

Prathapaneni, D. R., & Detroja, K. (2020). Optimal design of energy sources and reverse osmosis desalination plant with demand side management for cost-effective freshwater production. *Desalination*, 496, 114741. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114741>

Pulido-Velazquez, M., Peña-Haro, S., García-Prats, A., Mocholí-Almudever, A. F., Henríquez-Dole, L., Macián-Sorribes, H., & López-Nicolás, A. (2015). Integrated assessment of the impact of climate and land use changes on groundwater quantity and quality in the Mancha Oriental system (Spain). *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(4), 1677–1693. <https://doi.org/10.5194/hess-19-1677-2015>

Qiao, S., Ma, R., Sun, Z., Ge, M., Bu, J., Wang, J., Wang, Z., & Nie, H. (2020). The effect of water transfer during the non-growing season on the wetland ecosystem via surface and groundwater interactions in arid northwestern China. *Remote Sensing*, 12(16), 2516.

<https://doi.org/10.3390/rs12162516>

- Qu, X., Chen, Y., Liu, H., Xia, W., Lu, Y., Gang, D.-D., & Lin, L.-S. (2020). A holistic assessment of water quality condition and spatiotemporal patterns in impounded lakes along the eastern route of China's South-to-North water diversion project. *Water Research*, 185, 116275. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116275>
- Quan, Y., Wang, C., Yan, Y., Wu, G., & Zhang, H. (2016). Impact of inter-basin water transfer projects on regional ecological security from a telecoupling perspective. *Sustainability*, 8(2), 162. <https://doi.org/10.3390/su8020162>
- Sahu, P., & Debsarma, C. (2023). Urban water scarcity: A global challenge and impending solutions. In *Impacts of urbanization on hydrological systems in India* (pp. 129–142). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21618-3_7
- Shumilova, O., Tockner, K., Thieme, M., Koska, A., & Zarfl, C. (2018). Global water transfer megaprojects: A potential solution for the water–food–energy nexus? *Frontiers in Environmental Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00150>
- Silva, T. J. R., dos Santos, L. L., de Aragão, R., de Almeida Carreiro, D., de Paiva, W., da Costa Medeiros, P., & Ramos Luiz, M. (2024). Transposição de água entre bacias: Contribuições e aplicação do modelo SWAT. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 17(4), 2630–2652. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.4.p2630-2652>
- Singh, V. K., Singh, P., Karmakar, M., Leta, J., & Mayr, P. (2021). The journal coverage of Web of Science, Scopus and Dimensions: A comparative analysis. *Scientometrics*, 126(6), 5113–5142. <https://doi.org/10.1007/s11192-021-03948-5>

- Song, X., Liao, J., Xue, X., & Ran, Y. (2020). Multi-sensor evaluating effects of an ecological water diversion project on land degradation in the Heihe River Basin, China. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 152. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00152>
- Souza da Silva, G. N., & Alcoforado de Moraes, M. M. G. (2021). Decision support for the (inter-)basin management of water resources using integrated hydro-economic modeling. *Hydrology*, 8(1), 42. <https://doi.org/10.3390/hydrology8010042>
- Srivastava, M. K., Gaur, S., Ohri, A., Srivastava, P. K., & Singh, N. (2024). Applications of remote sensing in water quality assessment. In *Remote sensing in precision agriculture* (pp. 217–236). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91068-2.00019-9>
- Su, Q., Chang, H.-S., Chen, X., & Xiao, J. (2022). Metacoupling of water transfer: The interaction of ecological environment in the middle route of China's South-North Project. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(17), 10555. <https://doi.org/10.3390/ijerph191710555>
- Toaza, B., & Esztergár-Kiss, D. (2024). Automated bibliometric data generation in Python from a bibliographic database. *Software Impacts*, 19, 100602. <https://doi.org/10.1016/j.simpa.2023.100602>
- Tortajada, C., & Castelán, E. (2003). Water management for a megacity: Mexico City Metropolitan Area. *Ambio*, 32(2), 124–129. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-32.2.124>
- United Nations. (2023). The Sustainable Development Goals Report 2023: Special edition. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023.pdf>

- United Nations. (2024). The United Nations World Water Development Report 2024: Water for prosperity and peace. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388948>
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Velastegui-Montoya, A., de Lima, A., & Adami, M. (2020). Multitemporal analysis of deforestation in response to the construction of the Tucuruí Dam. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(10), 583. <https://doi.org/10.3390/ijgi9100583>
- Velastegui-Montoya, A., Montalván-Burbano, N., Carrión-Mero, P., Rivera-Torres, H., Sadeck, L., & Adami, M. (2023). Google Earth Engine: A global analysis and future trends. *Remote Sensing*, 15(14), 3675. <https://doi.org/10.3390/rs15143675>
- Vignau, B., Clemente, P., & Berthomé, P. (2024). Systematic literature review: References extraction helper and automatic analysis. *Software Impacts*, 21, 100669. <https://doi.org/10.1016/j.simpa.2024.100669>
- Wan, H., Huang, H., Zeng, S., Yan, Y., Wu, Y., Liu, S., & Wei, K. (2018). Impact on operation of the Middle Route Project of South-to-North Water Diversion. *MATEC Web of Conferences*, 246, 01040. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824601040>
- Wang, W., Zhuo, L., Rulli, M. C., & Wu, P. (2022). Limited water scarcity mitigation by expanded interbasin physical and virtual water diversions with uneven economic value added in China. *Science of the Total Environment*, 847, 157625. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157625>

- Wang, Z., Fan, L., Su, J., & Wang, Z. (2024). Impact of ecological water transfer project on vegetation recovery in dried-up Kongque River, Northwest China. *Forests*, 15(3), 487. <https://doi.org/10.3390/f15030487>
- Wicaksono, A. (2023). Collaborative governance in forestry issues: A bibliometric analysis with VOSviewer software using Scopus database. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*, 6(4), 762–775. <https://doi.org/10.53894/ijirss.v6i4.1973>
- Wilson, M., Li, X.-Y., Ma, Y.-J., Smith, A., & Wu, J. (2017). A review of the economic, social, and environmental impacts of China's South–North Water Transfer Project: A sustainability perspective. *Sustainability*, 9(8), 1489. <https://doi.org/10.3390/su9081489>
- Wu, L., Zhang, X., Hao, F., Wu, Y., Li, C., & Xu, Y. (2020). Evaluating the contributions of climate change and human activities to runoff in typical semi-arid area, China. *Journal of Hydrology*, 590, 125555. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125555>
- Wu, W., Eamen, L., Dandy, G., Razavi, S., Kuczera, G., & Maier, H. R. (2023). Beyond engineering: A review of reservoir management through the lens of wickedness, competing objectives and uncertainty. *Environmental Modelling & Software*, 167, 105777. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105777>
- Yalew, S. G., van der Zaag, P., Tran, B. N., Michailovsky, C. I. B., Salvatore, E., Borgomeo, E., Karimi, P., Pareeth, S., Seyoum, S. D., & Mul, M. L. (2023). Open-access remote sensing data for cooperation in transboundary water management. *Water International*, 48(8), 955–974. <https://doi.org/10.1080/02508060.2023.2263226>

- Yan, H., Lin, Y., Chen, Q., Zhang, J., He, S., Feng, T., Wang, Z., Chen, C., & Ding, J. (2023). A review of the eco-environmental impacts of the South-to-North Water Diversion: Implications for interbasin water transfers. *Engineering*, 30, 161–169. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.05.012>
- Yang, M., Qin, C., Zhu, Y., Zhao, Y., He, G., & Wang, L. (2024). Assessment of multi-regional comprehensive benefits of the South-to-North Water Diversion Project in China. *Water*, 16(3), 473. <https://doi.org/10.3390/w16030473>
- Yang, S.-T., Liu, C.-M., Yang, Z.-F., Sun, R., & Zhou, X.-D. (2002). Natural eco-environmental evaluation of west route area of interbasin water transfer project. *Dili Xuebao/Acta Geographica Sinica*, 57(1), 11–18.
- Yang, S., Bai, J., Zhao, C., Lou, H., Wang, Z., Guan, Y., Zhang, Y., Zhang, C., & Yu, X. (2018a). Decline of N and P uptake in the inner protection zone of a terminal reservoir during inter-basin water transfers. *Water*, 10(2), 178. <https://doi.org/10.3390/w10020178>
- Yang, S., Bai, J., Zhao, C., Lou, H., Zhang, C., Guan, Y., Zhang, Y., Wang, Z., & Yu, X. (2018b). Assessment of the changes of biomass and riparian buffer width in the terminal reservoir under the impact of the South-to-North Water Diversion Project in China. *Ecological Indicators*, 85, 932–943. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.11.011>
- Yang, Z., Hu, L., & Sun, K. (2021). The potential impacts of a water transfer project on the groundwater system in the Sugan Lake Basin of China. *Hydrogeology Journal*, 29(4), 1485–1499. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02337-9>

- Yin, D., Li, X., Wang, F., Liu, Y., Croke, B. F. W., & Jakeman, A. J. (2022). Water–energy–ecosystem nexus modeling using multi-objective, non-linear programming in a regulated river: Exploring tradeoffs among environmental flows, cascaded small hydropower, and inter-basin water diversion projects. *Journal of Environmental Management*, 308, 114582. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114582>
- Yuzheng, B., Bin, X., & Fengju, Z. (2021). The changes of Lake Hongze and its driving forces over the past three hundred years. *Journal of Lake Sciences*, 33(6), 1844–1856. <https://doi.org/10.18307/2021.0618>
- Zhang, L., Li, S., Loáiciga, H. A., Zhuang, Y., & Du, Y. (2015). Opportunities and challenges of interbasin water transfers: A literature review with bibliometric analysis. *Scientometrics*, 105(1), 279–294. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1656-9>
- Zhang, Y.-C., Yu, J.-J., Qiao, M.-Y., & Yang, H.-W. (2011). Effects of eco-water transfer on changes of vegetation in the lower Heihe River basin. *Shuili Xuebao/Journal of Hydraulic Engineering*, 42(7), 757–765.
- Zhang, Y., Ma, R., Liang, Q., Guan, B., & Loiselle, S. (2019). Secondary impacts of eutrophication control activities in shallow lakes: Lessons from aquatic macrophyte dynamics in Lake Taihu from 2000 to 2015. *Freshwater Science*, 38(4), 802–817. <https://doi.org/10.1086/706197>
- Zhang, Z., Chen, B., Chen, Z., & Xu, X. (1992). Challenges to and opportunities for development of China's water resources in the 21st century. *Water International*, 17(1), 21–27. <https://doi.org/10.1080/02508069208686124>

- Zhou, Y., Lu, N., Hu, H., & Fu, B. (2023). Water resource security assessment and prediction in a changing natural and social environment: Case study of the Yanhe Watershed, China. *Ecological Indicators*, 154, 110594. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110594>
- Zhu, J., & Liu, W. (2020). A tale of two databases: The use of Web of Science and Scopus in academic papers. *Scientometrics*, 123(1), 321–335. <https://doi.org/10.1007/s11192-020-03387-8>
- Zhuang, W. (2016). Eco-environmental impact of inter-basin water transfer projects: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(13), 12867–12879. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6854-3>

Apéndice A

Ecuaciones de búsqueda

Scopus:

TITLE-ABS-KEY(("Interbasin Water Transfer*" OR "Inter-basin water transfer*" OR "Inter_basin water transfer*" OR "Inter basin Water Transfer*" OR "Interbasin Water diversion" OR "Inter-basin water diversion*" OR "Inter_basin water diversion*" OR "Inter basin Water diversion*") AND ("ecolog*" OR "environm*" OR "ecosystem*"))

Web of Science:

TS=(("Interbasin Water Transfer*" OR "Inter-basin water transfer*" OR "Inter_basin water transfer*" OR "Inter basin Water Transfer*" OR "Interbasin Water diversion*" OR "Inter-basin water diversion*" OR "Inter_basin water diversion*" OR "Inter basin Water diversion*")) AND TS=("ecolog*" OR "environm*" OR "ecosystem*")

Apéndice B

Tabla comparativa de estudios revisados

Citación	Objetivo	Métodos de teledetección	Hallazgos
(S.-T. Yang et al., 2002)	Evaluar la fragilidad ecológica (ruta occidental SNWT, Qinghai-Tibet, China) utilizando teledetección y SIG.	Landsat TM, NDVI, Productividad primaria neta, interpolación climática basada en SIG.	Zonas altas de alta vulnerabilidad.
(Gurel et al., 2011)	Cuantificar las cargas difusas de nutrientes en la cuenca del río Melen (Turquía) que alimenta a Estambul.	Landsat para el uso de la tierra, SIG y coeficientes de exportación N/P.	La agricultura y la ganadería producen cargas difusas importantes; los picos coinciden con las precipitaciones y la aplicación de fertilizantes.
(Dong et al., 2016)	Monitorear los cambios en la cobertura del suelo provocados por la construcción del SNWDP (Yixian, Hebei).	Landsat (3 fechas), NDVI, zonas de influencia de 100 a 3000 m	La cobertura vegetal disminuyó durante la construcción y se recuperó parcialmente después.
(S. Yang, et al., 2018a)	Evaluar el efecto del embalse Miyun (ruta media SNWDP, Beijing) en la eliminación de N/P.	Landsat, Modelo digital de elevación (DEM), radiómetro espacial avanzado de emisión y reflexión térmica (DEM global, ASTER-GDEM), modelo RIPAM, mediciones de biomasa in situ.	El aumento del nivel del agua reduce la vegetación y la capacidad de asimilación de nutrientes, lo que aumenta los riesgos de eutrofización.
(Ma et al., 2018)	Comparar escenarios de urbanización versus recarga de aguas subterráneas (Jinan Springs, China) con una transferencia artificial.	Teledetección + geofísica + modelo de infiltración, datos de pozo.	La expansión urbana sin control reduce la recarga en un 47% y los esfuerzos de transferencia y restauración superan la recarga base.
(S. Yang, et al., 2018b)	Seguimiento de los cambios en la vegetación y biomasa de la costa en el embalse de Miyun (Pekín) debido al aumento del nivel del agua.	Landsat (NDVI, NDWI), VANT, mediciones de campo.	La expansión del embalse redujo el ancho de la costa y la biomasa (-37 %), disminuyendo la función de filtrado.
(Z. Yang et al., 2021)	Modelar el impacto de la gran transferencia Harten-Dunhuang (China) sobre los acuíferos/humedales (lago Sugan).	Landsat, ICESat, FEFLOW 3D con 28 pozos.	Posibles descensos de las aguas subterráneas de 51 m a 68 m y pérdidas significativas en los humedales orientales.

(Annys, 2021)	Examinar los cambios sociohidrológicos de las presas y transferencias de Tana-Beles (noroeste de Etiopía).	Landsat + SIG + estudios de campo, análisis hidrogeomorfológico.	Alteraciones del caudal, erosión de las riberas, conflictos por reasentamiento y éxito en el riego espontáneo.
(Yuzheng et al., 2021)	Reconstruir 300 años de historia del lago Hongze (río Huai, China), afectado por el río Amarillo y obras hidráulicas.	Mapas históricos + Landsat (MNDWI) + datos climáticos históricos.	La superficie del lago se redujo de mas de 3,000 km ² entre los años 1708 y 2016 debido a desviaciones y recuperación agrícola.
(B.-B. Guo et al., 2022)	Evaluar la calidad ecológica con RSEI en el segmento Lujiang del Proyecto Yangtze-Huaihe (Anhui, China).	Landsat 8 (2013-2021), RSEI (NDVI, LST, NDBSI, WET).	Las zonas de construcción mostraron una caída del 38% en el índice ecológico, con una recuperación parcial al 85% después de su finalización.
(Fazelpoor et al., 2022)	Investigar las modificaciones artificiales y los cambios geomorfológicos en la llanura de Zayandeh-rud (Irán) debido a las transferencias.	Fotografías aéreas (1969) + Landsat (1984–2020), clasificación de máquinas de vectores de soporte/redes neuronales (SVM/NN), Índice de cambio de la red fluvial (RNCI).	El canal activo se contrajo un 49% en 50 años; las áreas agrícolas y urbanas se expandieron, con una ligera reversión después de 2009.
(Lou et al., 2023)	Analizar la recuperación retardada de la descarga de los ríos después de las lluvias/transferencias en la cuenca de Haihe (China) debido a la sobreexplotación de las aguas subterráneas.	Landsat, Sentinel-2, VANT (DEM), método RSHS, prueba Mann-Kendall.	Desfase de 3 a 9 años en las zonas montañosas y de 8 a 11 años en las llanuras respecto a la recuperación de caudales; los acuíferos necesitan recargarse antes de que los flujos superficiales se recuperen.

Capítulo 3

3. EVALUACIÓN MULTITEMPORAL DE LOS CAMBIOS EN LA COBERTURA TERRESTRE ASOCIADOS A TRASVASES EN BOSQUE SECO: CASO DE ESTUDIO DEL SISTEMA CHONGÓN–EL AZÚCAR (ECUADOR)

Resumen

Los bosques secos tropicales (BST) sostienen biodiversidad y servicios ecosistémicos, pero enfrentan presiones antrópicas y climáticas crecientes. Los trasvases intercuenas (TI) reconfiguran la hidrología y pueden impulsar cambios en el uso y cobertura del suelo (UCS). En el Neotrópico y particularmente en Ecuador, existe escasa evidencia cuantitativa sobre cómo proyectos TI afectan BST. Este estudio evalúa los cambios en UCS asociados al sistema de trasvase Chongón-El Azúcar (Ecuador) entre 2019 y 2025. La metodología comprendió 3 fases, para las dos primeras se utilizó Google Earth Engine (GEE) y para la tercera ArcGIS Pro. i) Preprocesamiento: Se generaron mosaicos Sentinel-2 (nivel 2A) libres de nubes; ii) Procesamiento de imágenes: se calcularon NDVI, SAVI, MNDWI, NDCI y NDBI y se añadieron a 7 bandas ópticas obteniendo 12 predictores. Se entrenó un clasificador Random Forest (RF) con proporción de muestras 70/30 para entrenamiento y validación, posteriormente se evaluó el clasificador RF con exactitud global (Overall Accuracy, OA), coeficiente kappa (kappa coefficient, κ), exactitud del productor (Producer's accuracy, PA) y precisión del usuario (User's Accuracy, UA); iii) Posprocesamiento y análisis: los cambios entre escenarios de 2019 y 2025 se identificaron con una matriz de transición. Como resultado se evidenció pérdida neta 1,223.77 ha de BST por intensificación agropecuaria. Los focos de cambio se concentraron cerca del canal Chongón Sube y Baja y embalse El Azúcar, sugiriendo la disponibilidad de agua como la causa principal. Las clases hídricas variaron significativamente de agua clara a agua turbia en el embalse EL Azúcar, consistente con mayor biomasa acuática y condiciones de eutrofización. Los resultados sugieren que la disponibilidad hídrica del trasvase intensifica presiones sobre el BST y modifica la dinámica de UCS. Se recomienda orientar la expansión agrícola hacia suelos

ya transformados, establecer corredores ribereños, fortalecer el manejo de biomasa vegetal acuática y el monitoreo de la calidad del agua, y adoptar un programa operativo de monitoreo satelital para guiar decisiones de ordenamiento y conservación.

Palabras clave: Trasvase intercuenca (TI); bosque seco tropical (BST); teledetección; Sentinel-2; Google Earth Engine (GEE); Random Forest (RF); Uso y cobertura de suelo (UCS); Planificación territorial.

Abstract

Tropical dry forests (TDFs) support biodiversity and ecosystem services, but face increasing anthropogenic and climatic pressures. Interbasin water transfers (IBWTs) reconfigure hydrology and can drive changes in land use/land cover. In the Neotropics, and particularly in Ecuador, there is little quantitative evidence on how IBWT projects affect TDFs. This study evaluates LULC changes associated with the Chongón-El Azúcar transfer system (Ecuador) between 2019 and 2025. The methodology comprised three phases, using Google Earth Engine for the first two and ArcGIS Pro for the third. i) Pre-processing: Cloud-free Sentinel-2 (level 2A) mosaics were generated; ii) Image processing: NDVI, SAVI, MNDWI, NDCI, and NDBI were calculated and added to seven optical bands, yielding 12 predictors. A Random Forest (RF) classifier was trained with a 70/30 sample ratio for training and validation, and the RF classifier was then evaluated with Overall Accuracy (OA), kappa coefficient (κ), Producer's Accuracy (PA), and User's Accuracy (UA); iii) The changes between the 2019 and 2025 scenarios were identified using a transition matrix. The results showed a net loss of 1,223.77 ha of TDF due to agricultural intensification. The areas of change were concentrated near the Chongón Sube y Baja canal and the El Azúcar reservoir, suggesting water availability as the leading cause. Water classes varied significantly from clear water to turbid water in the El Azúcar reservoir, consistent

with higher aquatic biomass and eutrophication conditions. The results suggest that water availability from the transfer intensifies pressures on the TDF and modifies LULC dynamics. It is recommended to direct agricultural expansion towards already transformed soils, establish riparian corridors, strengthen aquatic plant biomass management and water quality monitoring, and adopt an operational satellite monitoring program to guide land use and conservation decisions.

Keywords: inter-basin water transfer (IBWT); tropical dry forest (TDF); remote sensing (RS); Sentinel-2; Google Earth Engine (GEE); Random Forest (RF); Land use and land cover (LULC); Territorial planning.

3.1 Introducción

Los bosques secos tropicales (BST), brindan servicios ecosistémicos a escala global y local, contribuyen a la captura de carbono mitigando el cambio climático (Khosravi Mashizi & Sharafatmandrad, 2023), albergan una biodiversidad que sirve de hábitat a varias especies amenazadas (Hasnat, 2022), regulan la calidad del suelo y el ciclo hídrico al mejorar la infiltración y prevenir la erosión (Tabarelli et al., 2024). Adicionalmente, proveen bienes maderables y no maderables, forraje y combustible que sostienen las economías rurales, además de valores culturales y recreativos que fomentan el turismo y la identidad local (Mulungu, 2024; Ray & Mukherjee, 2023). Los BST se localizan principalmente en las franjas tropicales y subtropicales de América Latina, África y Asia (Ishida et al., 2023; Luebert, 2021; Mwaluseke et al., 2023), en regiones donde las lluvias se concentran en una breve estación húmeda y pueden ir seguidas de hasta ocho meses de sequía, con predominio de vegetación caducifolia y elevadas tasas de endemismo (Chaturvedi et al., 2021; Choksi et al., 2023; Tabarelli et al., 2024).

No obstante, los servicios y valores aportados por los BST se ven cada vez más amenazados por una combinación de presiones antrópicas y climáticas (Tabarelli et al., 2024).

Por un lado, la expansión urbana, la ganadería, la extracción selectiva de madera y la conversión agrícola fragmentan los bosques causando su degradación y deforestación (Cabral et al., 2024; Melo, 2018; Rivas & Navarro-Cerrillo, 2024). Así mismo la sequía prolongada asociada al calentamiento global incrementa la frecuencia de incendios forestales, afectando la flora y fauna, que eleva la mortalidad arbórea y altera la estructura del dosel (Andrews et al., 2020; Aragão et al., 2019; Ogaya et al., 2015). Como resultado, la pérdida de hábitat, la reducción de la conectividad biológica y la homogenización biótica disminuyen la biodiversidad y los servicios ecosistémicos (Chaturvedi et al., 2021; Moura, do Nascimento, et al., 2023; Moura, Oliveira, et al., 2023; Shahzad et al., 2024; Tabarelli et al., 2024). Varios ejemplos ilustran la magnitud del problema, en el caso de la Caatinga, un ecosistema seco brasileño casi la mitad del bioma original ha sido deforestado (dos Santos et al., 2019); cerca de 1.4 millones de hectáreas de bosque seco Chiquitano en Bolivia fue afectado por un mega incendio en 2019 (Fundación Amigos de la Naturaleza, 2019; Romero-Muñoz et al., 2019); y en los BST de Menabe-Antimena en Madagascar albergan especies amenazadas y en peligro de extinción, con una tasa de deforestación anual entre 0.67% y 2.55% (Zinner et al., 2014).

Los BSTs del Ecuador, se distribuyen a lo largo de la costa desde el sur de Esmeraldas hacia el Golfo de Guayaquil, con núcleos en Manabí, Santa Elena, Guayas, El Oro y Loja (MAATE, 2015; Schipper, 2020). Estos ecosistemas son altamente biodiversos, pero gravemente amenazados y albergan alrededor de 900 especies, de las cuales un 18% son endémicas (Escribano-Avila et al., 2017; Romero-Saritama, 2018), y solo el 13% de su superficie está bajo protección (Rivas et al., 2020). La deforestación y fragmentación entre 1990 y 2018 derivó en la pérdida de 27.04% de la cobertura original (Rivas et al., 2021, 2024). Por otro lado, en el Bosque Seco Interandino se registró una pérdida del 45% entre 1991 y 2017 por ocupación agrícola (Rodríguez-Echeverry, 2023). La fragmentación de estos ecosistemas ha generado parches

pequeños y aislados que aumentan efectos de borde, reducen de conectividad y flujo génico afectando la biodiversidad (Rivas et al., 2021; Rodríguez-Echeverry & Leiton, 2021). Se estima que 62 especies leñosas endémicas están amenazadas, y el 69% no se encuentran en áreas protegidas (Romero-Saritama, 2018), mientras que actividades humanas como el pastoreo y la tala selectiva afectan la estructura del bosque y su biodiversidad (Benítez et al., 2024; Cueva Ortiz et al., 2019). Además, la degradación de BSTs en Ecuador no solo compromete flora y fauna, sino que también deteriora la calidad del suelo dificultando la recuperación del ecosistema (de Sosa et al., 2024). Este impacto se suma al cambio climático, provocando la disminución del hábitat de varias especies arbóreas (Aguirre et al., 2017).

La presión antrópica sobre los bosques secos no proviene únicamente de la ocupación directa del suelo, las grandes infraestructuras hidráulicas, en particular los trasvases intercuenca (TI), alteran los regímenes de caudales y la conectividad ecológica en regiones áridas y semiáridas (Pittock et al., 2009; Yi & Kondolf, 2024). En la última década, la teledetección se ha convertido en la herramienta principal para evaluar tales impactos, ya que ofrece series temporales consistentes y cobertura sincrónica de extensas áreas remotas (Abbaszadeh Tehrani et al., 2022). Varios estudios globales que combinan imágenes obtenidas de Landsat, Sentinel-2 o Vehículos Aéreo No Tripulado (VANT) con índices espectrales como Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Enhanced Vegetation Index (EVI) o Remote Sensing Ecological Index (RSEI) cuantifican pérdida de vegetación, erosión y cambios en la calidad del agua vinculados a mega-trasvases como el South-to-North Water Diversion Project (SNWDP; en español, Proyecto de Desvío de Agua Sur-Norte) en China, el All-American Canal en EE. UU. o el TI São Francisco en Brasil (De C. Teixeira et al., 2013; Mattson et al., 2024; S. Wang et al., 2024). Aunque estos trabajos demuestran la capacidad de los sensores remotos para detectar deforestación ribereña, subsidencia de acuíferos y eutrofización post-trasvase, la mayoría de los

estudios publicados se concentran en Asia y Estados Unidos (X. Wang et al., 2025; Zhang et al., 2015), dejando grandes vacíos en los Neotrópicos incluido Ecuador donde los BST ya son altamente vulnerables (Liu et al., 2021; Rivas et al., 2020; Shi et al., 2020; S. Wang et al., 2024). Esta escasez de evidencia regional resalta la necesidad de estudios multitemporales que integren teledetección y análisis de cambio de uso del suelo para entender cómo proyectos de TI como Chongón–El Azúcar podrían amplificar las presiones descritas en los párrafos anteriores (Dong et al., 2016). Por lo tanto, es fundamental identificar ¿Qué cambios se han producido en la cobertura terrestre del bosque seco tropical asociados a la implementación de trasvases de agua en el sistema Chongón-El Azúcar (Ecuador)?

En este escenario, el estudio tuvo como objetivo evaluar el impacto en la cobertura de la tierra asociados a la implementación del trasvase de agua Chongón-El Azúcar, empleando series temporales Sentinel-2, análisis espacial y clasificación supervisada con el algoritmo Random Forest (RF), para la identificación de las actividades antropogénicas desarrolladas por la disponibilidad de agua. Este trabajo ofrece a los tomadores de decisión local una herramienta de monitoreo de conservación de los bosques secos tropicales y control de la expansión de las actividades industriales y económicas motivadas por la nueva disponibilidad de agua, permitiendo mejorar el ordenamiento territorial y criterios para la preservación de áreas de BST con presencia de especies endémicas y el aprovechamiento de su potencial ecoturístico.

3.2 Área de estudio

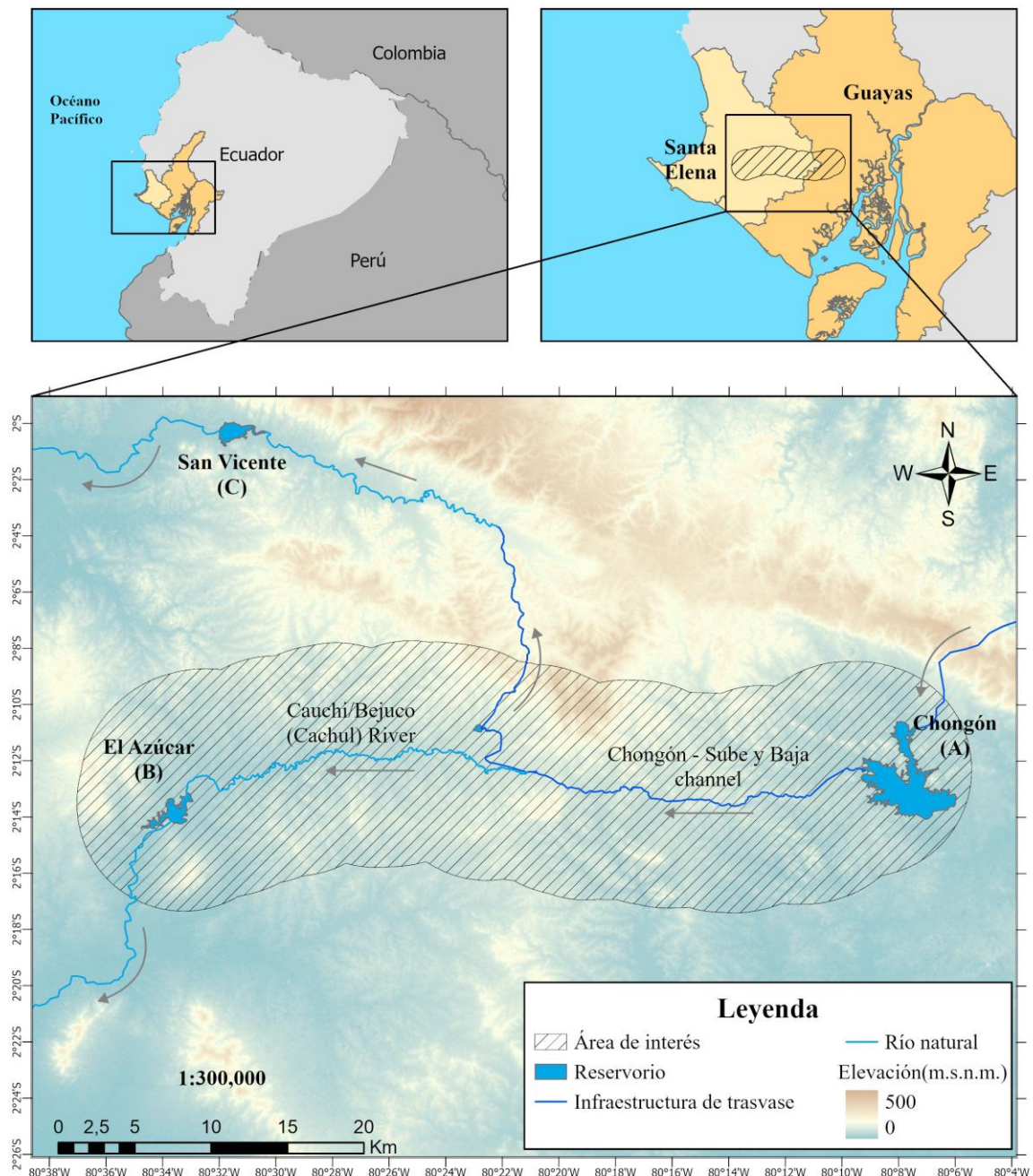
El área de interés (AdI) se observa en la **Figure 1** y corresponde a la zona de influencia del sistema de trasvase Chongón-El Azúcar, ubicado entre las provincias de Guayas y Santa Elena, formando parte del Proyecto Hidráulico de Santa Elena (PHASE), que inicio su construcción en 1978, con la finalidad de llevar agua del río Daule al Embalse Chongón y

distribuirla a Santa Elena (Empresa Pública del Agua [EPA-EP], 2015). Entre 1995 y 1997 se construyó el canal Chongón-Sube y Baja, de aproximadamente 20 kilómetros (km) para conectarse con el río Cauchí/Bejuco (Cachul) y distribuir el agua desde el embalse Chongón hacia el embalse El Azúcar (Troya, 2014). Posteriormente, para el año 2014 se abasteció de agua el embalse San Vicente mediante el canal Chongón Sube y Baja (EPA-EP, 2015).

Con la finalidad de conocer la incidencia del trasvase en las alteraciones dentro del TDF, se definió un buffer de 7 kilómetros alrededor del sistema de trasvase entre los embalses Chongón y El Azúcar (canal Chongón-Sube y Baja, y río Cauchí/Bejuco (Cachul)).

Figura 3.1

Área de estudio (buffer 7 km) y localización de los embalses Chongón (A), El Azúcar (B) y San Vicente (C)



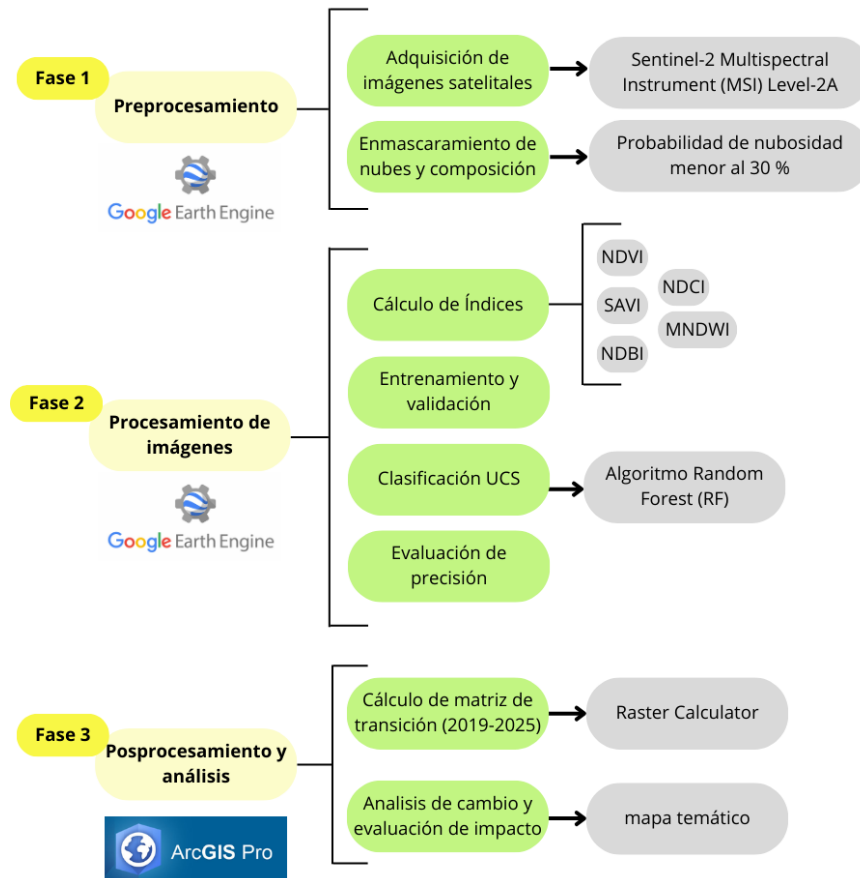
Nota. Sistema de coordenadas: WGS 84/UTM 17 Sur. Modelo de Elevación Digital (DEM) modificado de (Spacesystems & Team, 2019).

El sistema de trasvase atraviesa el ecosistema de bosque seco tropical asociado a la zona sureste de la cordillera Chongón Colonche y el bosque protector del mismo nombre, caracterizados por una estacionalidad climática pronunciada, con precipitaciones anuales inferiores a 800 mm, meses húmedos (enero-abril), y una marcada época seca (mayo-noviembre) (INAMHI, 2013; Jadán et al., 2022; NASA, 2025). La estación seca, y la poca variabilidad térmica (22.5°C-26.6°C), permiten clasificar el clima según Köppen como AW, clima tropical de sabana con invierno seco (Alvares et al., 2013; Jadán et al., 2022; NASA, 2025).

Esta zona ha experimentado un aumento en la disponibilidad de agua superficial, lo que ha motivado el desarrollo agropecuario y urbano en su entorno (Troya, 2014), sustituyendo vegetación nativa por monocultivos, reduciendo áreas de BST, hábitat de especies endémicas y diversidad vegetal (dos Reis-Silva et al., 2025; Kusuma et al., 2018; Zemp et al., 2019). En 2018 se reportaron 105 usuarios que se benefician del recurso hídrico en el sector, de los cuales solo uno cuenta con autorización por lo que las autoridades pidieron regularización, este hecho evidenció la captación ilegal (El Comercio, 2018).

3.3 Materiales y Métodos

La metodología se dividió en tres fases (Figure 2): i) Búsqueda y composición de mosaicos de imágenes Sentinel 2 Multispectral Instrument (MSI) sin cobertura de nubes; ii) Cálculo de índices espectrales y Clasificación de uso y cobertura de suelo (UCS) utilizando Random Forest (RF); iii) Identificación de cambios en UCS mediante cálculo de matriz de transición.

Figura 3.2*Marco metodológico del estudio*

3.3.1 Fase I: Preprocesamiento

3.3.1.1 Adquisición de imágenes satelitales. Se utilizaron imágenes Sentinel-2 MSI de los satélites 2A y 2B, correspondientes al nivel 2A (Reflectancia de superficie atmosféricamente corregida y ortorectificada), provenientes de la colección COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED disponibles en la plataforma GEE (Google Earth Engine, 2023). Esta colección incluye las bandas espectrales B1-B12 con una resolución entre 10 a 60 metros (m) dependiendo de la banda, se usan ampliamente para cálculo de índices espectrales, clasificación de cobertura terrestre y monitoreo de cambios ambientales (Google Earth Engine, 2023). El shapefile AdI se exportó al repositorio de GEE y se proyectó a la zona

17 Sur de la Escala Universal Transversal de Mercator (UTM), Sistema Geodésico Mundial (WGS) 84. Se realizó la búsqueda de imágenes en los intervalos de fechas señalados en la **Tabla 3.1**, correspondiente a la temporada húmeda, se seleccionó la temporada húmeda porque la vegetación del área al ser principalmente caducifolia pierde la mayoría de sus hojas en temporada seca lo que dificulta su identificación. Posteriormente, se aplicó un filtro por nubosidad a nivel de escena, reteniendo únicamente imágenes con probabilidad de nubes menor al 40 % ("CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE",40). Del total de bandas incluidas en cada imagen, solo se utilizaron siete que se detallan en la **Tabla 3.2**.

Tabla 3.1

Períodos de análisis

Periodo	Intervalo de fechas de búsqueda	Intervalo de fechas de imágenes encontradas	Número de imágenes obtenidas
2019	1 de enero – 17 de junio	2 de enero – 9 de junio	22
2025	1 de enero – 17 de junio	20 de enero – 16 de junio	23

Nota. Sentinel-2 toma imágenes de una misma zona cada 5 días, gracias a la combinación de sus dos satélites: Sentinel-2A y Sentinel-2B (Google Earth Engine, 2023).

Tabla 3.2

Bandas del sensor MSI de Sentinel-2 y longitudes de onda centrales (nm) para S2A y S2B

Nombre	Resolución espacial	Longitud de onda en (nm)	
		S2A	S2B
Blue (B)	10 m	496.6	492.1
Green (G)	10 m	560	559
Red (R)	10 m	664.5	665
RedEdge	20 m	703.9	703.8
Near Infrared (NIR)	10 m	835.1	833
Water Vapor (WV)	60 m	945	943.2
Short-Wave Infrared 1 (SWIR1)	20 m	1613.7	1610.4

Nota. Sentinel-2 comprende dos satélites diferentes: Sentinel-2A (S2A) y Sentinel-2B (S2B), aunque llevan el mismo tipo de sensor MSI, los filtros ópticos y la calibración no son 100 %

idénticos, por lo que presentan diferentes longitudes de onda en nanómetros (nm) (Google Earth Engine, 2023).

3.3.1.2 Enmascaramiento de nubes y composición. Para minimizar la interferencia de nubes en las imágenes a analizar, se implementaron las funciones de enmascaramiento y composición de mosaicos, `maskEdges` y `maskClouds`, respectivamente. El `maskEdges` fue aplicado inicialmente a las imágenes de la colección `COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED`, para la extracción de píxeles con cobertura de nube, detectados mediante las bandas `RedEdge 4` y `Water Vapor`, sensibles a la geometría y condiciones atmosféricas. Sobre esta colección, se aplicó la función `maskClouds`, que incorporó datos de la colección `S2_CLOUD_PROBABILITY` para reemplazar los píxeles con una probabilidad de nubosidad superior al 30%. Una vez aplicadas las funciones de enmascaramiento, se obtuvieron los mosaicos de 2019 y 2025, mediante la mediana estadística entre píxeles para el rango temporal definido. Por último, se realizó el corte de los mosaicos utilizando el `AdI` y se generó una imagen de composición RGB para cada año.

3.3.2 Fase II: Procesamiento de imágenes

3.3.2.1 Cálculo de índices espectrales. Mediante las composiciones RGB, se identificaron cinco clases dominantes en el `AdI`: BST, Agua clara, Agua turbia, Agricultura y Área construida, categorías que se detallan en la **Tabla 3.3**. Con la finalidad de mejorar la identificación de clases, se propuso el cálculo de índices espectrales.

Los índices espectrales son combinaciones matemáticas de valores de reflectancia en diferentes longitudes de onda, utilizados en teledetección para cuantificar características superficiales específicas (Gadea & Khan, 2023; Martinuzzi et al., 2024). Debido al tipo de UCS identificado en RGB se calcularon índices espectrales enfocados en vegetación, agua superficial y área de construcción, detallados en la Table 4, que posteriormente se añadieron como nuevas bandas en los mosaicos de 2019 y 2025 para mejorar la discriminación de clases y rendimiento

del modelo Random Forest (RF) (Ghezali & Boukhemacha, 2024; Pavani-Biju et al., 2025; Velastegui-Montoya et al., 2024; Zhao et al., 2024).

Tabla 3.3

Clases UCS que conforman el AdI junto a sus descripciones

Clases	Descripción
BST	Áreas con vegetación leñosa y matorrales densos o abiertos, dominadas por especies caducifolias.
Agua clara	Cuerpos de agua con baja o nula presencia de turbidez, sedimentos o biomasa vegetal acuática.
Agua turbia	Cuerpos de agua con alta presencia de turbidez, sedimentos o biomasa vegetal acuática.
Agricultura	Áreas de uso agrícola con abundante, poca o nula cobertura vegetal.
Área construida	Áreas con asentamientos humanos, construcciones, infraestructura y suelos descubiertos asociados.

Nota. BST: Bosque seco tropical

Tabla 3.4

Índices espectrales calculados en GEE y añadidos como bandas a las composiciones de los años 2019 y 2025

Tipo de UCS	Nombre del índice	Ecuación	Uso	Referencias
Vegetación	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$\frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	Biomasa y vigor de la vegetación	(Rouse et al., 1974), (Desai et al., 2024)
	Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)	$1.5 \times \frac{NIR - Red}{NIR + Red + 0.5}$	Vegetación en suelos descubiertos	(Huete, 1988), (Dadzie et al., 2025)
Agua superficial	Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)	$\frac{Green - SWIR1}{Green + SWIR1}$	Cuerpos de agua	(Xu, 2006), (Raj et al., 2023)
	Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI)	$\frac{RedEdge - Red}{RedEdge + Red}$	Clorofila en aguas turbias	(Mishra & Mishra, 2012), (Yilmaz et al., 2025)
Área de construcción	Normalized Difference Built-up Index (NDBI)	$\frac{SWIR1 - NIR}{SWIR1 + NIR}$	Superficies construidas	(Zha et al., 2003), (Santra et al., 2020)

3.3.2.2 Muestras de entrenamiento y validación. Para ambos años, se realizó el muestreo sobre cada composición multibanda integrada por las siete bandas originales (**Tabla 3.2**) y cinco índices espectrales (**Tabla 3.4**), esto se hizo mediante la digitalización manual de polígonos representativos en la escala 1:10,000, para cada clase de cobertura del suelo (**Table 3.3**), con el propósito de entrenar y evaluar el modelo RF en GEE (**Tabla 3.5**). El total de muestras por clase equivale a la suma de los píxeles de todos los polígonos que se dibujaron para cada clase (**Tabla 3.5**).

Tabla 3.5

Número de muestras (píxeles) utilizados para entrenamiento y validación de la clasificación por clase de UCS en 2019 y 2025

Clase	Número de muestras por año	
	2019	2025
BST	112.228	119.559
Agua clara	21.195	5.153
Agua turbia	835	3.097
Agricultura	25.382	21.485
Área construida	579	578
Total	160.219	149.872

Nota. BST: Bosque seco tropical.

Las muestras de cada año se dividieron aleatoriamente en una proporción 70/30 para el entrenamiento y validación del clasificador RF en GEE. El conjunto de entrenamiento alimentó `classifier.train()`, ajustando el modelo a los patrones espectrales asociados a cada clase. Una vez entrenado, el conjunto de validación se empleó para evaluar el desempeño del modelo, calculando matriz de confusión, exactitud global (Overall Accuracy, OA), coeficiente kappa (kappa coefficient, κ), exactitud del productor (Producer's accuracy, PA) y precisión del usuario (User's Accuracy, UA).

3.3.2.3 Clasificación UCS usando Random Forest. RF es un algoritmo de machine learning supervisado que se utiliza para clasificación, regresión y otras tareas predictivas. Se basa en la construcción de múltiples árboles de decisión y combina sus resultados para realizar predicciones más precisas (Breiman, 2001; El Attaoui et al., 2025). En ambos escenarios LULC se realizó un flujo similar de pasos con la composición multibanda correspondiente de cada año. En primer lugar, se creó un clasificador `ee.Classifier.smileRandomForest(100)`, definiendo un bosque de 100 árboles de decisión. A continuación, el método `train()` recibió las muestras de entrenamiento, la propiedad `UsoSuelo` como etiqueta de clase y la lista de los 12 predictores (7 bandas/5 índices) como variables de entrada, con lo cual el algoritmo aprendió los patrones espectrales asociados a cada categoría. Posteriormente los modelos entrenados se aplicaron sobre las composiciones multibanda de los escenarios con el método `classify()` de la clase `ee.Image`, generando dos ráster con códigos de clase de 1 a 5. Finalmente se aplicó un filtro espacial de mayoría que reclasifica los pequeños grupos de píxeles aislados según el valor predominante de su vecindario para reducir el ruido de salt & pepper (Fan et al., 2021; Maheshwari et al., 2024).

3.3.2.4 Evaluación de precisión de la clasificación de UCS. El desempeño del clasificador RF se evaluó para ambos escenarios de 2019 y 2025 con matrices de confusión calculadas sobre el conjunto de validación. Primero, el modelo entrenado se aplicó a las muestras de validación y luego se generó la matriz con `errorMatrix('LandUse','classification')` en GEE. A partir de ella se derivaron la OA (`accuracy()`), el κ (`kappa()`), PA (`producersAccuracy()`) y UA (`consumersAccuracy()`). De forma complementaria, se obtuvo la matriz sobre el conjunto de entrenamiento mediante `classifier.confusionMatrix()`, utilizada solo con fines diagnósticos, pero no para estimar el desempeño final.

3.3.3 Fase III: Posprocesamiento y análisis

3.3.3.1 Calculo de matriz de transición (2019-2025). Los ráster clasificados y filtrados correspondientes a 2019 y 2025 se exportaron a ArcGIS Pro, donde fueron reproyectados al sistema de coordenadas WGS 1984 UTM Zone 17 Sur con celda de 10 m. Al importar en ArcGIS Pro se identificó una nueva clase, correspondiente a píxeles fuera del área de estudio, esta clase fue excluida aplicando Set Null, y se utilizó la herramienta Tabulate Area de Spatial Analyst con ambos ráster. El campo Value de cada ráster sirvió para distinguir las categorías, y se fijó la celda de procesamiento en 10 m. La herramienta contó, para cada clase de 2019 (filas), el área que pasó a cada clase de 2025 (columnas). Debido a que el sistema estaba en metros, los resultados se obtuvieron m² y posteriormente se cambiaron a ha, la tabla se exportó a Excel y se generó la matriz transpuesta para mejorar la interpretación concordante a como se representa en la literatura (Velasgui-Montoya et al., 2024), donde cada fila corresponde a una clase de 2025 y cada columna corresponde a una clase de 2019.

3.3.2 Análisis de cambio y evaluación de impacto

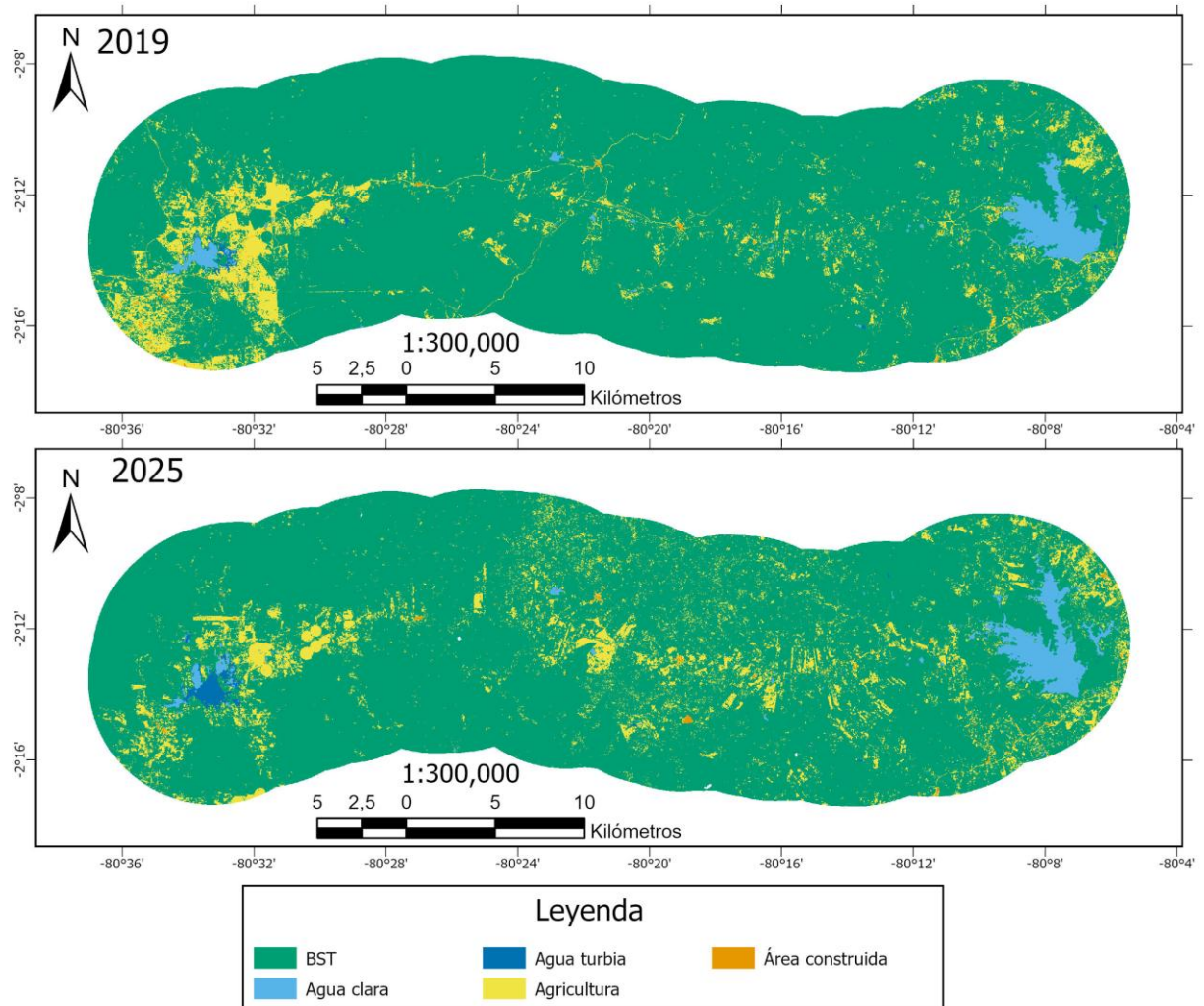
Una vez obtenida la matriz de transición, se usó para el análisis de cambio de cobertura. Con estos resultados, se evaluó la magnitud y la distribución espacial de los cambios de cobertura, identificando las clases con mayores ganancias o pérdidas, ofreciendo un índice sintético de la presión del trasvase sobre cada uso de suelo.

3.4 Resultados y discusión

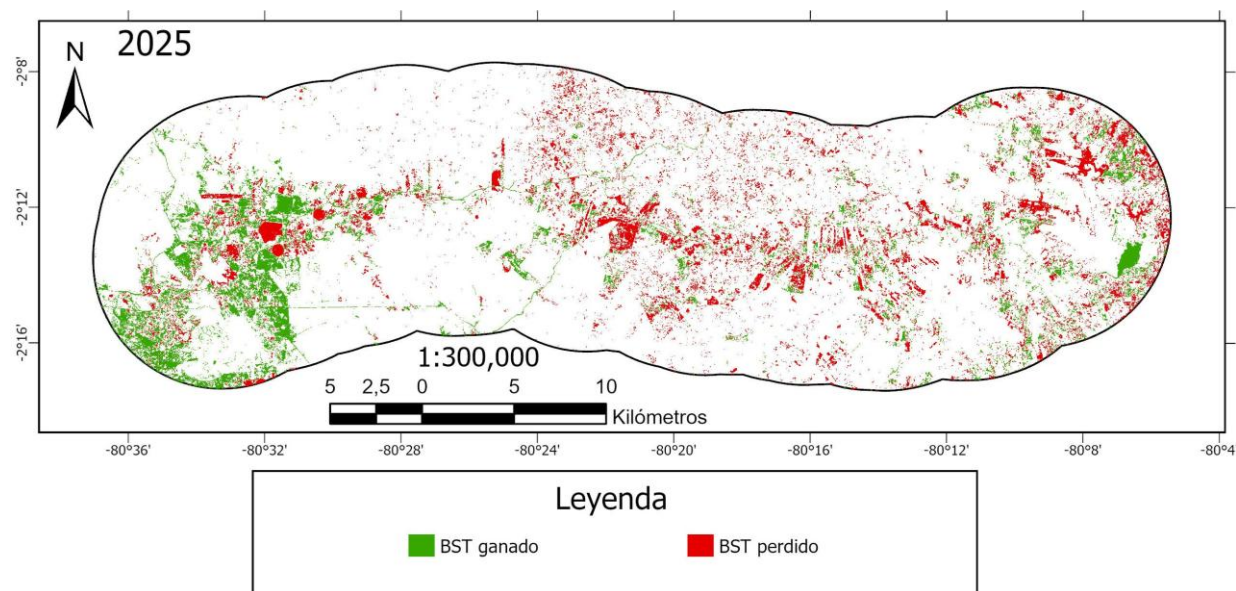
3.4.1 Clasificación de UCS y evaluación de precisión

La clasificación con RF alcanzó un rendimiento ligeramente superior en 2019 a comparación con 2025. La clasificación de 2019 obtuvo una OA de 100% y un κ de 0,99, lo que indica una concordancia adecuada entre la clasificación y los datos de referencia. En contraste, la clasificación de 2025 alcanzó una OA de 97,89% y un κ de 0,94. La disminución en el rendimiento de la clasificación en 2025 se evidencia en las métricas por clase, donde la PA de la clase Agricultura cayó de 99% a 87.7% y su UA de 99.03% a 97.13%, debido a confusiones principalmente con la clase BST. Las clases de Agua clara y Agua turbia mantuvieron PA y UA = 1 en ambos años. La clase Construcciones mejoró su UA de 95% a 99.27%, aunque persisten confusiones, con la clase Agricultura. Estas confusiones son coherentes con similitudes espectrales asociadas a la fenología de cultivos y a la cobertura vegetal, suelo expuesto sobre superficies de construcción. Aun así, la OA de 2025 es cercana a 100%, ideal para cartografía temática, además se utilizó filtro de Salt and pepper para mejorar la agrupación de los píxeles sueltos.

La matriz de transición representada en la **Tabla 3.6** presenta valores en ha. Las columnas corresponden a las clases UCS 2019 y las filas a las clases UCS 2025. Cada celda indica el área que pasó de la clase de la columna en 2019 a la clase de la fila en 2025. La diagonal principal muestra la permanencia de las clases, mientras que las celdas fuera de la diagonal representan las transiciones de clases. Por otro lado, la **Figura 3.3** muestra los mapas UCS correspondientes a 2019 y 2025 que fueron elaborados en GEE usando RF y exportados a ArcGIS Pro. Finalmente, la **Figura 3.4** muestra el mapa de cambios respecto al área de BST

Figura 3.3*Mapa de clasificación UCS 2019 y 2025*

Nota. BST: bosque seco tropical

Figura 3.4*Mapa de cambios BST 2019-2025**Nota.* BST: bosque seco tropical**Tabla 3.6***Matriz de transición*

UCS 2025	UCS 2019					Total (b)	Variación (b-a)
	BST	Agua clara	Agua turbia	Agricultura	Área construida		
BST	68.280 ha	197 ha	74 ha	4.414 ha	65 ha	73.029 ha	-1.224 ha
Agua clara	509 ha	1.296 ha	27 ha	83 ha	2 ha	1.916 ha	+249 ha
Agua turbia	108 ha	168 ha	51 ha	69 ha	0 ha	395 ha	+234 ha
Agricultura	5.279 ha	7 ha	10 ha	1.789 ha	64 ha	7.148 ha	+756 ha
Área construida	77 ha	0 ha	0 ha	38 ha	61 ha	176 ha	-15 ha
Total (a)	74.253 ha	1.667,2 ha	161 ha	6.391 ha	191 ha	82.664 ha	

Nota. UCS: Uso y cobertura de suelo; BST: Bosque seco tropical; Variación (b-a): ganancia (+) o pérdida (-) total de área de la clase.

3.4.2 Análisis de cambios y evaluación de impactos

En las **Figuras 3.3 y 3.4** y **Tabla 3.6** se observa que el BST disminuyó en gran medida en áreas centrales de la zona de estudio, principalmente en las cercanías del canal Chongón-Sube y Baja, en comparación con la sección de río natural Cauchi/Bejuco (Cachul). El BST fue desplazado por la clase agricultura, que comprende en su mayoría cultivos de maíz y pasto (forraje), seguidos de ciruelo, mango, chí, cacao, banano y maracuyá. Además, se reportan cultivos de especies maderables como *Tectona grandis* (MAG, 2020). En la zona oeste del AdI, (alrededores del trasvase El Azúcar) se identifica recuperación de BST ocupando área anteriormente agrícola, pero a pesar de esta recuperación de BST hay una pérdida neta de - 1.223,77 ha en el periodo de 6 años.

Por otro lado, se observa un aumento significativo de agua turbia en el embalse receptor El Azúcar, cubriendo la mayoría del embalse. En composición RGB la apariencia del agua turbia es de color verdoso lo que indica presencia de clorofila por proliferación de biomasa vegetal acuática como macrófitas flotantes y algas. Esta presencia de clorofila en el agua está relacionada a un proceso de alta carga de nutrientes, que puede estar asociado a los nutrientes vertidos por la industria agrícola que se desarrolla en los alrededores del canal de agua. Esto a su vez podría estar relacionado con la reducción de agricultura en las cercanías del Embalse receptor El Azúcar por presencia de contaminación en el agua, se han reportado condiciones insalubres y presencia de animales muertos en el río Cauchí/Bejuco (Cachul) (GAD Parroquial Rural de Simón Bolívar, 2024) (Subsecretaría Técnica de los Recursos Hídricos, 2013). Cabe resaltar que el agua del embalse El azúcar se distribuye a varias regiones en Santa Elena para su uso como agua potable. Para la clase áreas construidas, el modelo RF mostró menor precisión debido al tamaño reducido de la clase y su heterogeneidad. La aparente reducción de construcciones se atribuye a errores de clasificación más que a un cambio real. Además, algunos

sectores con suelo expuesto en 2019 aparecen con vegetación en 2025, lo que favoreció la confusión con las clases BST y Agricultura.

Trabajos previos documentan un incremento sostenido de la macrófita invasora *Eichhornia crassipes* entre 2000 y 2020, periodo donde llegó a cubrir 80% del espejo de agua en el embalse EL Azúcar (Calderón, 2021). Esta especie es un indicador de eutrofización ya que se alimenta de nitrógeno y fósforo, por otro lado, agrava la eutrofización si no se gestiona su biomasa (Villamagna & Murphy, 2010). Estudios han propuesto la extracción de 20 ha o más al año para aprovecharlas como compostaje y reducir su proliferación (Calderón, 2021). Desde 2013 entidades del gobierno ecuatoriano reconocen a El Azúcar como uno de los embalses afectados por la especie macrófita *Eichhornia crassipes* y han planteado proyectos de recolección que incluyen barcazas cosechadoras y transportadoras, elevadores, retroexcavadoras y volquetas para el retiro y disposición final (Subsecretaría Técnica de los Recursos Hídricos, 2013). Por lo que en el mapeo del escenario 2019 se muestra bajos niveles de la especie invasora, pero incrementa nuevamente en 2025 hasta cubrir más de la mitad de la superficie de El Azúcar, por lo que deben mantenerse los procesos de extracción de la especie macrófita, y aplicar metodologías que permitan reducir el nivel de nutrientes en el agua que genera la industria agrícola (García-Ávila et al., 2025; Withers et al., 2014).

Es necesario priorizar la restauración y protección de BST y planificar un ordenamiento territorial sostenible y amigable con el medio ambiente. En este trabajo la clase con mayor cambio fue la clase BST, este resultado coincide con lo encontrado en otros trabajos sobre TI, que documentan reconfiguraciones del uso del suelo, pérdida de vegetación ribereña y mayor presión antrópica asociada a cambios en el régimen de caudales y en el acceso al recurso hídrico (Pittock et al., 2009; Yi & Kondolf, 2024). Este trabajo puede ser útil para los tomadores de decisión y conocer los efectos no considerados a partir de la construcción del trasvase,

motivando el inicio de la actividad agrícola en áreas de BST, debido a la facilidad de acceso al agua. Por un lado, la finalidad del trasvase fue suplir de agua a las comunidades locales y el AdI no estuvo considerada inicialmente como zona de riego, sin embargo, lo que realmente ocurrió fue el suplir de agua a la agricultura expansiva en la región desplazando o impactando a la flora y fauna del BST, como también a la calidad del agua para la comunidad.

En la ruta central del SNWDP ocurrieron impactos ecosistémicos semejantes mitigados con implementación de cortinas forestales, vías de servicio, propusieron no intervenir el rango hasta 0.1 km a cada lado del canal y declarar área de protección con usos controlados en el rango hasta 0.5 km (Dong et al., 2016). Otro impacto documentado es la disminución de caudal en ríos acompañado de más descargas contaminantes, motivo por el cual (Li et al., 2013) sugiere asegurar caudales ecológicos, control de nutrientes y franjas de protección como también sugiere (Dong et al., 2016) para filtrar escorrentía junto al monitoreo constante. Recientemente el máximo órgano judicial de España exigió aplicar de inmediato caudales ecológicos en tramos protegidos del trasvase Tajo-Segura (Cater, 2025), trasvase que inspiró la construcción del proyecto PHASE en Ecuador. Estudios han investigado el rol de la fitorremediación en estos contextos, como el tipo de vegetación óptimo para remoción de N y P (Chen et al., 2017), asociados a procesos de eutrofización y agricultura intensiva motivada por implementación de trasvases (Greenpeace, 2021). El área asociada al sistema Chongón-El Azúcar presenta vegetación caducifolia con baja captación de nutrientes en la estación seca, por lo que se puede plantear insertar franjas de vegetación con mayor capacidad de captación, que no alteren el equilibrio ecosistémico y asegurar caudales ecológicos.

Con respecto a ambientes similares a nuestra AdI un estudio documentó expansión agrícola en el valle del São Francisco, acompañado de una reducción del bosque seco Caatinga, aumento de temperatura en áreas de pasto y suelos expuestos, y evapotranspiración más alta en

áreas irrigadas, indicando una reconfiguración ecohidrológica típica de ecosistemas secos sometidos a nuevas disponibilidades de agua (Jardim et al., 2022). Las recomendaciones de (Jardim et al., 2022) están alineadas con aquellas discutidas en párrafos previos. El desarrollo de nuestro estudio presentó limitaciones como ausencia de imágenes de buena calidad espacial para años previos a la construcción del trasvase y los años durante la construcción. Por otro lado, la clasificación píxel a píxel con RF y el remuestreo de bandas de 20/60 m a 10 m aumentan la mezcla espectral en bordes y, junto con la heterogeneidad y el desbalance de clases menores, pueden generar confusiones.

3.5 Conclusiones y Recomendaciones

El AdI mostró permanencia global de 85.57%. Aun así, los flujos dominantes confirman un intercambio fuerte entre BST y Agricultura con retornos insuficientes para compensar la pérdida neta de BST equivalente a 1,223.77 ha. La actividad agrícola se está expandiendo y desplazando BST, principalmente en las cercanías del canal Chongón Sube y Baja, donde se observa un patrón espacial de deforestación dominante tipo Fishbone y patrones geométricos. Hacia el oeste en áreas aledañas al embalse El Azúcar se observa recuperación de bosque previamente agrícola, como vegetación herbácea y matorrales. El incremento de agua turbia en el embalse receptor El Azúcar indica incremento de biomasa vegetal acuática, que es un indicador de altos niveles de nitrógeno y fósforo consistente con procesos de eutrofización que empeora si no se reduce el nivel de biomasa vegetal acuática, que pese a los intentos de erradicarla a vuelto a cubrir gran superficie del lago.

Este estudio ofrece insumos para la formulación de políticas públicas orientadas a la restauración y preservación del BST y al ordenamiento del crecimiento agropecuario. Si bien el trasvase se concibió para abastecer de agua a las comunidades locales y el AdI no fue planificado inicialmente como zona de riego, la mayor disponibilidad hídrica habría facilitado la expansión

agrícola sobre áreas con BST, con impactos potenciales en la biodiversidad y en la calidad del agua utilizada por la población. En este contexto, se recomienda dirigir la expansión agrícola hacia suelos ya transformados, estableciendo zonas de exclusión tanto en BST como en los alrededores del canal y afluentes asociados, implementar corredores ribereños alrededor de remanentes de BST, junto a buenas prácticas agrícolas y controles de cargas de sedimentos y nutrientes (franjas de amortiguamiento, manejo de agroquímicos, control de escorrentía) para mejorar la calidad del agua en el embalse El Azúcar; Poner en marcha un programa operativo de monitoreo satelital que permita a las autoridades vigilar sustitución o desplazamiento del BST por agricultura expansiva y aplicar medidas correctivas.

3.6 Referencias

- Abbaszadeh Tehrani, N., Mohd Shafri, H. Z., Salehi, S., Chanussot, J., & Janalipour, M. (2022). Remotely-sensed ecosystem health assessment (RSEHA) model for assessing the changes of ecosystem health of Lake Urmia Basin. *International Journal of Image and Data Fusion*, 13(2), 180–205. <https://doi.org/10.1080/19479832.2021.1924880>
- Aguirre, N., Eguiguren, P., Maita, J., Ojeda, T., Sanamiego, N., Furniss, M., & Aguirre, Z. (2017). Potential impacts to dry forest species distribution under two climate change scenarios in southern Ecuador. *Neotropical Biodiversity*, 3(1), 18–29. <https://doi.org/10.1080/23766808.2016.1258867>
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., de Moraes Gonçalves, J. L., & Sparovek, G. (2013). Köppen’s climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Andrews, C. M., D’Amato, A. W., Fraver, S., Palik, B., Battaglia, M. A., & Bradford, J. B. (2020). Low stand density moderates growth declines during hot droughts in semi-arid forests. *Journal of Applied Ecology*, 57(6), 1089–1102. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13615>
- Aragão, J. R. V., Groenendijk, P., & Lisi, C. S. (2019). Dendrochronological potential of four neotropical dry-forest tree species: Climate-growth correlations in northeast Brazil. *Dendrochronologia*, 53, 5–16. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.10.011>
- Benítez, Á., Ortiz, J., Matamoros-Apolo, D., Bustamante, A., López, F., Yangua-Solano, E., & Gusmán-Montalván, E. (2024). Forest disturbance determines diversity of epiphytic

lichens and bryophytes on trunk bases in tropical dry forests. *Forests*, 15(9).

<https://doi.org/10.3390/f15091565>

Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32.

<https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>

Cabral, H., Piatti, L., & Santana, D. (2024). Impacts of climate change in taxonomic, phylogenetic and functional diversity in snakes in largest dry forest ecoregion, the Gran Chaco. *Journal of Arid Environments*, 224, 105214.

<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2024.105214>

Calderón, M. (2021). Análisis de la cobertura de *Eichhornia crassipes* por sensores remotos para propuesta de gestión ambiental en el embalse El Azúcar [Tesis de licenciatura, Universidad Agraria del Ecuador].

<https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/CALDERON%20FLOREANO%20MIRKA%20AL EJANDRA.pdf>

Cater, D. (2025). Spanish Supreme Court ruling affects Tagus-Segura water transfers. *Water News Europe*. <https://www.waternewseurope.com/spanish-supreme-court-ruling-affects-tagus-segura-water-transfers/>

Chaturvedi, R. K., Singh, R., & Bhadouria, R. (2021). Tropical dry deciduous forests: Emerging features and ecological perspectives. In *Tropical dry deciduous forests: Emerging features and ecological perspectives*.

Chen, C., Zhao, T., Liu, R., & Luo, L. (2017). Performance of five plant species in removal of nitrogen and phosphorus from an experimental phytoremediation system in the Ningxia

irrigation area. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(10), 497.

<https://doi.org/10.1007/s10661-017-6213-y>

Choksi, P., Kotian, M., Burivalova, Z., & DeFries, R. (2023). Social and ecological outcomes of tropical dry forest restoration through invasive species removal in central India.

Ecological Indicators, 155, 111054. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111054>

Cueva Ortiz, J., Espinosa, C. I., Dahik, C. Q., Mendoza, Z. A., Ortiz, E. C., Gusmán, E., Weber, M., & Hildebrandt, P. (2019). Influence of anthropogenic factors on the diversity and structure of a dry forest in the central part of the Tumbesian region (Ecuador–Peru).

Forests, 10(1). <https://doi.org/10.3390/f10010031>

Dadzie, E., Twumasi, Y. A., Ning, Z. H., Osei, J. D., Gyan, D. T., Aniewu, D., & Loh, P. M.

(2025). Mapping the extent of land degradation in East Baton Rouge Parish. *The*

International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information

Sciences, XLVIII-M–5, 21–28. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-5-2024-21-2025>

De C. Teixeira, A., Scherer-Warren, M., Hernandez, F., Andrade, R., & Leivas, J. (2013). Large-scale water productivity assessments with MODIS images in a changing semi-arid environment: A Brazilian case study. *Remote Sensing*, 5(11), 5783–5804.

<https://doi.org/10.3390/rs5115783>

de Sosa, L. L., Carmona, I., Panettieri, M., Griffith, D. M., Espinosa, C. I., Jara-Guerrero, A.,

Plaza, C., & Madejón, E. (2024). Ecosystem function associated with soil organic carbon

declines with tropical dry forest degradation. *Land Degradation & Development*, 35(6),

2109–2121. <https://doi.org/10.1002/ldr.5047>

- Desai, S., Mattoo, M., Deshpande, A. M., Dey, A., & Akiwate, S. (2024). Vegetation change detection through NDVI analysis using Landsat-8 data. In 2024 4th International Conference on Computer, Communication, Control & Information Technology (C3IT) (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/C3IT60531.2024.10829460>
- Dong, M., Tang, M., Li, S., Cao, H., Deng, H., & Wu, G. (2016). Effects of water transfer project construction on vegetation patterns. *Acta Ecologica Sinica*, 36(20).
<https://doi.org/10.5846/stxb201504080718>
- dos Reis-Silva, F., Pizzigalli, C., Seck, S., Cabeza, M., Rainho, A., Rocha, R., & Palmeirim, A. F. (2025). Unveiling how herpetofauna cope with land-use changes—Insights from forest–cashew–rice landscapes in West Africa. *Biotropica*, 57(1).
<https://doi.org/10.1111/btp.13416>
- dos Santos, U. J., Duda, G. P., Marques, M. C., Valente de Medeiros, E., de Sousa Lima, J. R., Soares de Souza, E., Brossard, M., & Hammecker, C. (2019). Soil organic carbon fractions and humic substances are affected by land uses of Caatinga forest in Brazil. *Arid Land Research and Management*, 33(3), 255–273.
<https://doi.org/10.1080/15324982.2018.1555871>
- El Attaoui, A., Koulou, Y., & El Hami, N. (2025). At the core of artificial intelligence. In *Methods and applications of artificial intelligence* (pp. 77–119). Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9781394351817.ch5>
- El Comercio. (2018, October 5). Un daño en la estación de bombeo Chongón preocupa a comunidades y agricultores de Santa Elena. *El Comercio*.

<https://www.elcomercio.com/actualidad/ecuador/dano-estacion-bombeodeagua-chongon-santaelena/>

Empresa Pública del Agua (EPA-EP). (2015). Intervención, ampliación y construcción del Plan Hidráulico Acueducto Santa Elena (PHASE). <https://www.empresaagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/11/Perfil-Plan-Hidráulico-de-Acueducto-de-Santa-Elena.pdf>

Escribano-Avila, G., Cervera, L., Ordóñez-Delgado, L., Jara-Guerrero, A., Amador, L., Paladines, B., Briceño, J., Parés-Jiménez, V., Lizcano, D. J., Duncan, D. H., & Espinosa, C. I. (2017). Biodiversity patterns and ecological processes in Neotropical dry forest: The need to connect research and management for long-term conservation. *Neotropical Biodiversity*, 3(1), 107–116. <https://doi.org/10.1080/23766808.2017.1298495>

Fan, Y., Chen, R., Sang, Y., Chen, H., Zhou, Z., Hao, Y., & Yan, S. (2021). Comparative research on several denoising methods for pepper and salt noise images (pp. 1549–1556). https://doi.org/10.1007/978-981-16-0115-6_178

Fundación Amigos de la Naturaleza. (2019). Reporte de incendios forestales en Santa Cruz: 15 de septiembre de 2019.

GAD Parroquial Rural de Simón Bolívar. (2024). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia Simón Bolívar: Actualización 2023–2027. <http://www.gadsimonbolivar.gob.ec/pdot/4/>

- Gadea, O. C. A., & Khan, S. D. (2023). Detection of bastnäsite-rich veins in rare earth element ores through hyperspectral imaging. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 20, 1–4. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2023.3249624>
- García-Ávila, F., García-Pizarro, E., Malla-Aguilar, G., Sánchez-Cabrera, C., Cadme-Galabay, M., Valdiviezo-Gonzales, L., & Cabello-Torres, R. (2025). Influence of nutrients on aquatic vegetation and trophic status of lakes: Analysis of eutrophication and mitigation. *Results in Engineering*, 27, 106381. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106381>
- Ghezali, S., & Boukhemacha, M. A. (2024). Mapping typical LULC classes using spatiotemporal analysis and the thresholds of spectral optical satellite imagery indices: A case study in Algiers city. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(1), 67. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13577-z>
- Google Earth Engine. (2023). COPENICUS/S2_SR_HARMONIZED: Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A. Google Developers. https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPENICUS_S2_SR_HARMONIZED?hl=es-419
- Greenpeace. (2021). El Mar Menor, una víctima del trasvase Tajo-Segura. <https://es.greenpeace.org/es/sala-de-prensa/informes/mar-menor-victima-trasvase-completo/>
- Hasnat, G. N. T. (2022). Climate change effects, adaptation, and mitigation techniques in tropical dry forests. In *Research anthology on environmental and societal impacts of climate change* (pp. 309–331). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-3686-8.ch016>

Huete, A. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)

INAMHI. (2013). Biblioteca – Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.
<https://www.inamhi.gob.ec/biblioteca/>

Ishida, A., Yamaji, K., Nakano, T., Ladpala, P., Popradit, A., Yoshimura, K., Saiki, S.-T., Maeda, T., Yoshimura, J., Koyama, K., Diloksumpun, S., & Marod, D. (2023). Comparative physiology of canopy tree leaves in evergreen and deciduous forests in lowland Thailand. *Scientific Data*, 10(1), 601. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02468-6>

Jadán, O., Donoso, D. A., Ponce-Ramírez, E., Pucha-Cofrep, F., & Cabrera, O. (2022). Six forests in one: Tree species diversity in the Bosque Protector Chongón Colonche, a lowland mountain range in coastal Ecuadorian. *Forest Ecosystems*, 9, 100069. <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2022.100069>

Jardim, A. M. da R. F., Araújo Júnior, G. do N., Silva, M. V. da, Santos, A. dos, Silva, J. L. B. da, Pandorfi, H., Oliveira-Júnior, J. F. de, Teixeira, A. H. de C., Teodoro, P. E., de Lima, J. L. M. P., Silva Junior, C. A. da, Souza, L. S. B. de, Silva, E. A., & Silva, T. G. F. da. (2022). Using remote sensing to quantify the joint effects of climate and land use/land cover changes on the Caatinga biome of northeast Brazilian. *Remote Sensing*, 14(8), 1911. <https://doi.org/10.3390/rs14081911>

Khosravi Mashizi, A., & Sharafatmandrad, M. (2023). Dry forests conservation: A comprehensive approach linking ecosystem services to ecological drivers and sustainable

management. *Global Ecology and Conservation*, 47, e02652.

<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2023.e02652>

Kusuma, Y. W. C., Rembold, K., Tjitrosoedirdjo, S. S., & Kreft, H. (2018). Tropical rainforest conversion and land use intensification reduce understorey plant phylogenetic diversity. *Journal of Applied Ecology*, 55(5), 2216–2226. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13201>

Li, Q., Song, J., Wei, A., & Zhang, B. (2013). Changes in major factors affecting the ecosystem health of the Weihe River in Shaanxi Province, China. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 7(6), 875–885. <https://doi.org/10.1007/s11783-013-0568-2>

Liu, H., He, B., Zhou, Y., Yang, X., Zhang, X., Xiao, F., Feng, Q., Liang, S., Zhou, X., & Fu, C. (2021). Eutrophication monitoring of lakes in Wuhan based on Sentinel-2 data. *GIScience & Remote Sensing*, 58(5), 776–798. <https://doi.org/10.1080/15481603.2021.1940738>

Luebert, F. (2021). The two South American dry diagonals. *Frontiers of Biogeography*, 13(4). <https://doi.org/10.21425/F5FBG51267>

MAATE. (2015). Bosque seco ecuatoriano es parte de la Red Mundial de Reservas de Biosfera de la UNESCO. Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. <https://www.ambiente.gob.ec/bosque-seco-ecuatoriano-es-parte-de-la-red-mundial-de-reservas-de-biosfera-de-la-unesco/#:~:text=En%20Ecuador%2C%20encontramos%20bosques%20secos,conservaci%20de%20su%20gran%20biodiversidad.>

Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (2020). Mapa de cobertura y uso de la tierra y sistemas productivos agropecuarios del Ecuador.

<http://geoportal.agricultura.gob.ec/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/4f7e118f-0439-42bf-ab62-f0e7c842a379>

Maheshwari, R., Pathak, K., & Kamal, A. K. (2024). Context-aware CNN approach to denoise salt and pepper images. In 2024 IEEE International Conference on Interdisciplinary Approaches in Technology and Management for Social Innovation (IATMSI) (pp. 1–6).

<https://doi.org/10.1109/IATMSI60426.2024.10502512>

Martinuzzi, F., Mahecha, M. D., Montero, D., Alonso, L., & Mora, K. (2024). SpectralIndices.jl: Streamlining spectral indices access and computation for Earth system research. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVIII-4/W, 89–95. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W12-2024-89-2024>

Mattson, M., Sousa, D., Quandt, A., Ganster, P., & Biggs, T. (2024). Mapping multi-decadal wetland loss: Comparative analysis of linear and nonlinear spatiotemporal characterization. Remote Sensing of Environment, 302, 113969.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113969>

Melo, F. P. L. (2018). The socio-ecology of the Caatinga: Understanding how natural resource use shapes an ecosystem. In Caatinga: The largest tropical dry forest region in South America. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68339-3_14

- Mishra, S., & Mishra, D. R. (2012). Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. *Remote Sensing of Environment*, 117, 394–406. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.016>
- Moura, M. R., do Nascimento, F. A. O., Paolucci, L. N., Silva, D. P., & Santos, B. A. (2023). Pervasive impacts of climate change on the woodiness and ecological generalism of dry forest plant assemblages. *Journal of Ecology*, 111(8), 1762–1776. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.14139>
- Moura, M. R., Oliveira, G. A., Paglia, A. P., Pires, M. M., & Santos, B. A. (2023). Climate change should drive mammal defaunation in tropical dry forests. *Global Change Biology*, 29(24), 6931–6944. <https://doi.org/10.1111/gcb.16979>
- Mulungu, K. (2024). Contribution of non-timber forest products to national employment following weather shocks: Evidence from 24 countries. *Applied Economics Letters*, 31(12), 1067–1071. <https://doi.org/10.1080/13504851.2023.2174495>
- Mwaluseke, M. L., Mwakalukwa, E. E., & Salim Maliondo, S. M. (2023). Vegetation composition, diversity, stand structure and carbon stock of a dry evergreen montane forest of Lendikinya forest reserve in Tanzania. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 24(1). <https://doi.org/10.13057/biodiv/d240164>
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2025). POWER | Data Access Viewer. NASA. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

- Ogaya, R., Barbeta, A., Başnou, C., & Peñuelas, J. (2015). Satellite data as indicators of tree biomass growth and forest dieback in a Mediterranean holm oak forest. *Annals of Forest Science*, 72(1), 135–144. <https://doi.org/10.1007/s13595-014-0408-y>
- Pavani-Biju, B., Borges, J., Marques, S., & Teodoro, A. (2025). Satellite images and spectral vegetation indices as auxiliary tools to monitoring fuel availability in areas prone to wildfire: Study case in the northern region of Portugal. In *Proceedings of the 11th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management* (pp. 51–60). <https://doi.org/10.5220/0013249400003935>
- Pittock, J., Meng, J., Geiger, M., & Chapagain, A. K. (2009). Interbasin water transfers and water scarcity in a changing world – A solution or a pipedream?
- Raj, S., Harish, A., & Ramamoorthy, S. (2023). Water logging analysis over Dubai using Sentinel-2 satellite imagery (pp. 683–696). https://doi.org/10.1007/978-981-99-3033-3_56
- Ray, B., & Mukherjee, P. (2023). Forest income and rural livelihoods in West Bengal, India. *Studies in Microeconomics*, 11(1), 10–35. <https://doi.org/10.1177/23210222211024389>
- Rivas, C. A., Guerrero-Casado, J., & Navarro-Cerrillo, R. M. (2021). Deforestation and fragmentation trends of seasonal dry tropical forest in Ecuador: Impact on conservation. *Forest Ecosystems*, 8(1), 46. <https://doi.org/10.1186/s40663-021-00329-5>
- Rivas, C. A., Guerrero-Casado, J., & Navarro-Cerrillo, R. M. (2024). Assessment of habitat connectivity in a highly fragmented ecosystem: The seasonal tropical dry forest in Ecuador. *Applied Vegetation Science*, 27(2). <https://doi.org/10.1111/avsc.12770>

- Rivas, C. A., Navarro-Cerrillo, R. M., Johnston, J. C., & Guerrero-Casado, J. (2020). Dry forest is more threatened but less protected than evergreen forest in Ecuador's coastal region. *Environmental Conservation*, 47(2), 79–83. <https://doi.org/10.1017/S0376892920000077>
- Rivas, C. A., & Navarro-Cerrillo, R. M. (2024). Forest fragmentation and connectivity in South American dry forests. *Biodiversity and Conservation*, 33(11), 3015–3037. <https://doi.org/10.1007/s10531-024-02894-x>
- Rodríguez-Echeverry, J. (2023). Extensification of agricultural land-use generates severe effects on the critically endangered Inter-Andean dry forest in the Ecuadorian Andean landscape. *Journal of Landscape Ecology*, 16(3), 132–148. <https://doi.org/10.2478/jlecol-2023-0020>
- Rodríguez-Echeverry, J., & Leiton, M. (2021). State of the landscape and dynamics of loss and fragmentation of forest critically endangered in the Tropical Andes Hotspot: Implications for conservation planning. *Journal of Landscape Ecology*, 14(1), 73–91. <https://doi.org/10.2478/jlecol-2021-0005>
- Romero-Muñoz, A., Jansen, M., Nuñez, A. M., Toledo, M., Almonacid, R. V., & Kuemmerle, T. (2019). Fires scorching Bolivia's Chiquitano forest. *Science*, 366(6469), 1082–1082. <https://doi.org/10.1126/science.aaz7264>
- Romero-Saritama, J. M. (2018). Seed conservation: An alternative to store germplasm and recover threatened Ecuadorian forests. *Neotropical Biology and Conservation*, 13(1), 74–85. <https://doi.org/10.4013/nbc.2018.131.09>
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In *Proceedings of the Third Earth Resources*

Technology Satellite-1 Symposium (pp. 309–317).

<https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>

Santra, A., Mitra, S. S., Sinha, S., & Routh, S. (2020). Performance testing of selected spectral indices in automated extraction of impervious built-up surface features using Resourcesat LISS-III image. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(22), 1229.

<https://doi.org/10.1007/s12517-020-06183-z>

Schipper, J. (2020). Ecuadorian dry forests. One Earth.

<https://www.oneearth.org/ecoregions/ecuadorian-dry-forests/>

Shahzad, K., Ali, W. S., Muhammad, S., Dai, J., Zeb, U., & Zhu, M. (2024). Assessment of plant biodiversity in tropical dry forests of Sialkot, Pakistan: Insight into environmental, anthropogenic influence and conservation strategies. *Frontiers in Forests and Global Change*, 7. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1362117>

Shi, M., Gong, H., Gao, M., Chen, B., Zhang, S., & Zhou, C. (2020). Recent ground subsidence in the North China Plain, China, revealed by Sentinel-1A datasets. *Remote Sensing*, 12(21), 3579. <https://doi.org/10.3390/rs12213579>

Spacesystems, N., & Team, U. S. /Japa. A. S. (2019). ASTER Global Digital Elevation Model V003 (ASTGTM). <https://doi.org/10.5067/ASTER/ASTGTM.003>

Subsecretaría Técnica de los Recursos Hídricos, G. N. de O. y M. (2013). Obras de mantenimiento del sistema control de inundaciones de la Cuenca Baja del Guayas; sistema Trasvase Daule–Santa Elena de otros sectores propensos a inundaciones en la Demarcación Hidrográfica Guayas. <https://www.empresaagua.gob.ec/wp->

<content/uploads/downloads/2018/04/Perfil-del-Programa-de-Mantenimiento-y-Operación1.pdf?utm>

Tabarelli, M., Filgueiras, B. K. C., Ribeiro, E. M. S., Lopes, A. V., & Leal, I. R. (2024). Tropical dry forests. In *Encyclopedia of biodiversity* (pp. 294–312). Elsevier.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822562-2.00090-6>

Troya, F. (2014). Determinación de la disponibilidad del recurso hídrico en el área de influencia del Plan Hidráulico Acueducto de Santa Elena (PHASE) para consumo humano y uso agrícola [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)].

<https://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/41530>

Velastegui-Montoya, A., García-Romero, J. A., Chuizaca-Espinoza, I. A., Quevedo, R. P., Santana-Cunha, C., Ochoa-Brito, J. I., & Arias-Hidalgo, M. (2024). Assessing regressive erosion effects: Unveiling riverside land use/land cover changes post hydroelectric project construction. *Environmental Challenges*, 15, 100882.

<https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100882>

Villamagna, A. M., & Murphy, B. R. (2010). Ecological and socio-economic impacts of invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): A review. *Freshwater Biology*, 55(2), 282–298.

<https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02294.x>

Wang, S., Liu, Y., Guo, J., Liu, J., & Chai, H. (2024). Impacts of the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project on land surface temperature and fractional vegetation coverage in the Danjiang River Basin. *Remote Sensing*, 16(14), 2665.

<https://doi.org/10.3390/rs16142665>

- Wang, X., Liu, Z., & Wu, J. (2025). Inter-basin water transfer and water security: A landscape sustainability science perspective. *Journal of Environmental Management*, 390, 126326. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126326>
- Withers, P., Neal, C., Jarvie, H., & Doody, D. (2014). Agriculture and eutrophication: Where do we go from here? *Sustainability*, 6(9), 5853–5875. <https://doi.org/10.3390/su6095853>
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Yi, S., & Kondolf, G. M. (2024). Environmental planning and the evolution of inter-basin water transfers in the United States. *Frontiers in Environmental Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1489917>
- Yılmaz, O. S., Acar, U., Sanli, F. B., Gülgen, F., & Ateş, A. M. (2025). Investigation of water quality in İzmir Bay with remote sensing techniques using NDCI on Google Earth Engine platform. *Transactions in GIS*, 29(1). <https://doi.org/10.1111/tgis.13301>
- Zemp, D. C., Ehbrecht, M., Seidel, D., Ammer, C., Craven, D., Erkelenz, J., Irawan, B., Sundawati, L., Hölscher, D., & Kreft, H. (2019). Mixed-species tree plantings enhance structural complexity in oil palm plantations. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 283, 106564. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.06.003>
- Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24(3), 583–594. <https://doi.org/10.1080/01431160304987>

- Zhang, L., Li, S., Loáiciga, H. A., Zhuang, Y., & Du, Y. (2015). Opportunities and challenges of interbasin water transfers: A literature review with bibliometric analysis. *Scientometrics*, 105(1), 279–294. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1656-9>
- Zhao, C., Pan, Y., & Zhang, P. (2024). Development of a new indicator for identifying vegetation destruction events using remote sensing data. *Ecological Indicators*, 166, 112553. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112553>
- Zinner, D., Wygoda, C., Razafimanantsoa, L., Rasoloarison, R., Andrianandrasana, H. T., Ganzhorn, J. U., & Torkler, F. (2014). Analysis of deforestation patterns in the central Menabe, Madagascar, between 1973 and 2010. *Regional Environmental Change*, 14(1), 157–166. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0475-x>

Capítulo 4

4. CONSIDERACIONES FINALES

Esta tesis analiza el uso de la teledetección en el monitoreo de impactos ambientales asociados a la implementación de megaproyectos hídricos como los trasvases de agua entre cuencas a través del tiempo, así como el impacto generado por un sistema de trasvase en un ecosistema de bosque seco tropical.

El primer artículo analizó la evolución y estado actual de la literatura mediante un análisis bibliométrico realizado sobre las dimensiones trasvases de agua entre cuencas e impactos ambientales, la revisión sistemática se realizó profundizando en el rol de la teledetección y utilizó la metodología PRISMA. Se obtuvieron registros de bases de datos de Scopus y WoS por su calidad y prestigio. Para la unificación, limpieza, procesamiento de datos y elaboración de gráficos se usaron varios softwares como VOSviewer, Rstudio, Bibliometrix y Python.

El segundo artículo presentó la evaluación multitemporal de los cambios en la cobertura terrestre asociados al sistema de trasvase Chongón-El Azúcar en Ecuador. El estudio se realizó para un periodo de seis años utilizando mosaicos de imágenes satelitales sentinel-2 y cinco índices espectrales en Google Earth Engine para realizar el mapa LULC con el clasificador Random Forest, luego se utilizó ArcGIS Pro para generar la matriz de transición y elaboración de mapas finales.

Los resultados del capítulo 2 revelaron un aumento exponencial en el número de publicaciones entre 1971 y 2024, evolucionando desde un enfoque técnico, hacia enfoques ecológicos, sostenibilidad y justicia hídrica. Se identificaron a China y estados Unidos como los países que más colaboran en publicaciones sobre impactos ambientales asociados a TI. Se ilustró la naturaleza multidimensional de los TI, desde la perspectiva operativa y de ingeniería hasta las consideraciones ecológicas y tecnológicas. Se confirma la tendencia hacia una consideración

más significativa de los impactos integrales, los costos ecológicos y las herramientas de monitoreo tecnológico, como la teledetección para la planificación y operación de proyectos de transferencia de agua. Se reconoce la teledetección como una herramienta esencial para evaluar y monitorear los impactos ambientales asociados con las transferencias de agua, Sin embargo, la mayoría de los estudios analizados sistemáticamente carecen de series temporales extensas y a menudo no integran suficientemente los aspectos socioeconómicos y la biodiversidad faunística. Los datos de teledetección deben combinarse con información in situ y modelos avanzados (FEFLOW, RIPAM, RSHS) para lograr una comprensión holística.

Los resultados del capítulo 3 revelaron pérdida de área de BST desplazada por expansión agrícola, asociada a la implementación de TI, además de un incremento significativo en el área cubierta por agua turbia, asociado a biomasa vegetal acuática. Se identificaron problemas parecidos en escenarios similares mediante la literatura científica identificando las soluciones aplicadas en estos contextos, como dirigir la expansión agrícola hacia suelos ya transformados, establecer zonas de exclusión tanto en TDF como en los alrededores del canal y afluentes, implementar corredores ribereños alrededor de remanentes de TDF, junto a buenas prácticas agrícolas y controles de cargas de sedimentos y nutrientes (franjas de amortiguamiento, manejo de agroquímicos, control de escorrentía) para mejorar la calidad del agua en el embalse El Azúcar, finalmente se sugiere poner en marcha un programa operativo de monitoreo satelital que permita a las autoridades vigilar sustitución o desplazamiento del TDF por agricultura expansiva y aplicar medidas correctivas.

La revisión sistemática filtró 12 artículos para ser analizados en profundidad, lo que equivale al 2,67% de la base de datos depurada que contenía 450 registros, esto no implica directamente que la teledetección esté ausente en el 97,23% de los proyectos de TI. Sin embargo, refleja que la literatura científica sobre la integración de la teledetección con impactos

ambientales de los proyectos de TI es pequeña en comparación con los estudios generales de TI y sus impactos en el medio ambiente o los ecosistemas. La teledetección es una herramienta que debería incorporarse al estudio y monitoreo de grandes obras de infraestructura hidráulica, ya que permite un análisis previo a la construcción, durante la construcción y después de la construcción cuando los impactos son lo suficientemente grandes para ser notados y empezar a estudiarse, una de las limitaciones es la disponibilidad de imágenes satelitales y su calidad espacial y temporal, añadiendo que áreas con demasiada nubosidad dificultan los análisis. Pero la tendencia va en dirección de la generación de imágenes de mucha mejor calidad espacial y temporal, junto a mejoras en los algoritmos, software y sistemas de procesamiento como plataformas de procesamiento en la nube. En contraste con estudios in situ la teledetección es más económica, aunque estudios in situ y en remoto pueden combinarse para obtener mejores resultados.

Con respecto al caso de estudio Chongón-El Azúcar, la presencia artificial del recurso hídrico motivó su aprovechamiento para el desarrollo de actividades agropecuarias, que deben regularse para no devastar el ecosistema de bosque seco tropical que está perdiendo área con los años, el exceso de nutrientes que genera la agricultura principalmente N y P, probablemente están derivando hacia el embalse El Azúcar por lo identificado en el presente trabajo y reportes de contaminación en la literatura. Además, se detallan varias propuestas de mitigación para los impactos negativos como corredores riberños, franjas de amortiguamiento y monitoreo satelital.

Referencias

- Gallardo, B., & Aldridge, D. C. (2018). Inter-basin water transfers and the expansion of aquatic invasive species. *Water Research*, 143, 282–291.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.06.056>
- Liu, H., He, B., Zhou, Y., Yang, X., Zhang, X., Xiao, F., Feng, Q., Liang, S., Zhou, X., & Fu, C. (2021). Eutrophication monitoring of lakes in Wuhan based on Sentinel-2 data. *GIScience & Remote Sensing*, 58(5), 776–798.
<https://doi.org/10.1080/15481603.2021.1940738>
- Rivas, C. A., Guerrero-Casado, J., & Navarro-Cerrillo, R. M. (2024). Assessment of habitat connectivity in a highly fragmented ecosystem: The seasonal tropical dry forest in Ecuador. *Applied Vegetation Science*, 27(2). <https://doi.org/10.1111/avsc.12770>
- Rivas, C. A., Navarro-Cerillo, R. M., Johnston, J. C., & Guerrero-Casado, J. (2020). Dry forest is more threatened but less protected than evergreen forest in Ecuador's coastal region. *Environmental Conservation*, 47(2), 79–83. <https://doi.org/10.1017/S0376892920000077>
- Shi, M., Gong, H., Gao, M., Chen, B., Zhang, S., & Zhou, C. (2020). Recent ground subsidence in the North China Plain, China, revealed by Sentinel-1A datasets. *Remote Sensing*, 12(21), 3579. <https://doi.org/10.3390/rs12213579>
- Sun, S., Zhou, X., Liu, H., Jiang, Y., Zhou, H., Zhang, C., Zhou, G., & Fu, G. (2021). Unraveling the effect of inter-basin water transfer on reducing water scarcity and its inequality in China. *Water Research*, 194, 116931.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.116931>

- United Nations. (2024). The United Nations World Water Development Report 2024: Water for prosperity and peace. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388948>
- Wang, S., Liu, Y., Guo, J., Liu, J., & Chai, H. (2024). Impacts of the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project on land surface temperature and fractional vegetation coverage in the Danjiang River Basin. *Remote Sensing*, 16(14), 2665. <https://doi.org/10.3390/rs16142665>
- Yan, H., Lin, Y., Chen, Q., Zhang, J., He, S., Feng, T., Wang, Z., Chen, C., & Ding, J. (2023). A review of the eco-environmental impacts of the South-to-North Water Diversion: Implications for interbasin water transfers. *Engineering*, 30, 161–169. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.05.012>
- Zhang, L., Li, S., Loáiciga, H. A., Zhuang, Y., & Du, Y. (2015). Opportunities and challenges of interbasin water transfers: A literature review with bibliometric analysis. *Scientometrics*, 105, 279–294. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1656-9>
- Zhuang, W. (2016). Eco-environmental impact of inter-basin water transfer projects: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 12867–12879. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6854-3>