

Perspectivas científicas del agro

Serie de documentos de trabajo

Vigilancia científica sobre procesos de gestión de información agroclimática

Leidy Johanna Cárdenas Solano
Carlos Alberto Contreras Pedraza





Serie de documentos de trabajo

Perspectivas científicas del agro

Vigilancia científica sobre procesos de gestión de información agroclimática

Autores

Leidy Johanna Cárdenas Solano
Carlos Alberto Contreras Pedraza

Mosquera, junio 2023

La elaboración de este documento se deriva de las acciones de monitoreo y seguimiento de información científica, desarrollados por el Departamento de Inteligencia Científica y Tecnológica de la Dirección de Investigación y Desarrollo de Agrosavia.

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA)
Sede Central. Kilómetro 14 vía Mosquera-Bogotá, Mosquera, Cundinamarca. Código postal 250047, Colombia.

Citación sugerida: Cárdenas Solano, L. J. & Contreras Pedraza, C. A. (2023). *Vigilancia científica sobre procesos de gestión de información agroclimática*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA).

DOI: 10.21930/agrosavia.vigilanciainformatica.2023.1

Línea de atención al cliente: 018000121515
atencionalcliente@agrosavia.co
<http://www.agrosavia.co>



https://co.creativecommons.org/?page_id=13

Cláusula de responsabilidad: AGROSAVIA no es responsable de las opiniones e información recogidas en el presente texto. Los autores asumen de manera exclusiva y plena toda responsabilidad sobre su contenido, ya sea este propio o de terceros, y declaran, en este último supuesto, que cuentan con la debida autorización de terceros para su publicación; igualmente, declaran que no existe conflicto de interés alguno en relación con los resultados de la investigación propiedad de tales terceros. En consecuencia, los autores serán responsables civil, administrativa o penalmente, frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros relativa a los derechos de autor u otros derechos que se hubieran vulnerado como resultado de su contribución.

Tabla de Contenido

Introducción	7
Generalidades	8
Estrategia de búsqueda	10
Análisis por países	13
Conclusiones	50
Bibliografía.....	53

Lista de Tablas

Tabla 1. Ecuación de búsqueda diseñada.....	11
Tabla 2. Procesos de gestión de información agroclimática en India	13
Tabla 3. Procesos de gestión de información agroclimática en China	16
Tabla 4. Procesos de gestión de información agroclimática en Estados Unidos.....	22
Tabla 5. Procesos de gestión de información agroclimática en Europa (Italia, Francia, Alemania y España)	27
Tabla 6. Procesos de gestión de información agroclimática en Irán.....	37
Tabla 7. Procesos de gestión de información agroclimática en Australia.....	41
Tabla 8. Procesos de gestión de información agroclimática en Brasil.....	47

Lista de Figuras

Figura 1. Gráfico Sankey Países-Instituciones-tópicos generales.....	10
Figura 2. Dinámica de publicaciones.....	11
Figura 3. Palabras clave relacionadas con procesos de gestión de información agroclimática (tendencias generales)	12

Autores

Leidy Johanna Cardenas Solano, M.Sc.

Orcid: [0000-0001-5471-7160](https://orcid.org/0000-0001-5471-7160)

Ingeniera Industrial, MSc en Ingeniería Industrial enfocada en la gestión de la tecnología y la innovación, certificada como Ciudadana de Datos por Alianza Caoba y Científica de datos certificada por MinTIC y Correlation One, con conocimientos en ISO 27001:2013. Investigador Junior reconocido por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia y Analista del Departamento de Inteligencia y Divulgación Científica de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria AGROSAVIA. Formación en Platzi en Transformación Digital y más de 10 años de experiencia en valoración financiera de tecnologías, transferencia tecnológica y formulación de proyectos de I+D+i para el SGR, Minciencias, y CYTED. Docente universitaria, experiencia en la creación del Centro de Investigación en Agua CENIAGUA y formulación de proyectos para la consecución de más de 13 mil millones que se ejecutan a través de proyectos financiados con beneficios tributarios. Las principales áreas de investigación comprenden la gestión del conocimiento, la gestión de la innovación, la gestión de la tecnología, la inteligencia competitiva, la vigilancia tecnológica, la cienciometría, el análisis de las cadenas de valor de la agricultura, la hoja de ruta tecnológica, el benchmarking, y la prospectiva tecnológica.

Carlos Alberto Contreras Pedraza, M.Sc.

Orcid: [0000-0001-7138-2147](https://orcid.org/0000-0001-7138-2147)

Profesional en Ingeniería Industrial, Magíster en Ingeniería Agrícola y estudios en Magister en Ingeniera Industrial de la Universidad Nacional de Colombia. Investigador Master Asociado de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA y Coordinador de Inteligencia Científica de la misma. Experiencia en investigación y ejecución de proyectos en el área de gestión tecnológica, gestión de conocimiento y direccionamiento estratégico de sectores productivos. Ha desarrollado proyectos con la Universidad Nacional de Colombia, el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, AGROSAVIA, La Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria

Naval Marítima y Fluvial - COTECMAR, Cámara de Comercio de Cartagena, Universidad Tecnológica de Bolívar, entre otras. Conocimiento y habilidad en el desarrollo de ejercicios de vigilancia tecnológica y comercial, benchmarking, diagnóstico tecnológico, prospectiva, desarrollo de indicadores en CTI, entre otros. Experiencia en estudios estratégicos para cadenas productivas agroindustriales, manejo de bases de datos de información científica y comercial, elaboración y actualización de indicadores de CTI para el sector agropecuario, al igual herramientas informáticas básicas y especializadas en el campo de la vigilancia tecnológica y comercial.

Introducción

Los avances recientes en tecnologías como el Sistema de Observación de la Tierra, el Acceso Abierto, la Inteligencia Artificial, el Aprendizaje Automático, las Tecnologías de la Información y la Comunicación, las Plataformas de Computación en Nube y la Ciencia Ciudadana han ampliado enormemente el potencial del análisis de Big Data. Estas tecnologías ofrecen herramientas más inteligentes, interoperables y útiles para la toma de decisiones en agricultura, generando información valiosa. Se están realizando esfuerzos para recopilar datos geoetiquetados e información sobre la producción agrícola a diferentes escalas, aprovechando técnicas de aprendizaje automático y datos satelitales. Además, se está integrando la digitalización con varios aspectos del agroecosistema, como la fitogenética, la diversificación de cultivos, el uso eficiente de insumos, las prácticas agronómicas, la gestión de recursos relacionados con el suelo, la tierra y las cuencas hidrográficas, la estabilidad económica, la integración de la economía y el medio ambiente, y la gestión adecuada de los servicios ecosistémicos.

Se espera que, mediante intervenciones tecnológicas y análisis de macrodatos, los agricultores puedan proteger sus cultivos de las fluctuaciones meteorológicas y las amenazas naturales, y se puedan sugerir cultivos adecuados durante períodos de barbecho o regeneración del suelo. Esto aumentaría la productividad y garantizaría una valoración sostenible del agroecosistema.

En resumen, las investigaciones sobre el uso de información agroclimática se centran en comprender los desafíos y oportunidades relacionados con el cambio climático en la agricultura, así como en implementar prácticas agrícolas sostenibles y adaptativas. Según las investigaciones publicadas en Scopus, se ha identificado que los principales países que abordan esta temática desde un punto de vista científico son India, China, Estados Unidos, Italia, Francia, Alemania, España, Australia, Irán y Brasil. A continuación, se muestra una visión general de algunas acciones destacadas que están llevando a cabo en cada país:

Cabe destacar que estos países están realizando avances significativos en la gestión de información agroclimática, pero las iniciativas y proyectos específicos pueden variar en cada caso y estar en diferentes etapas de implementación.

Generalidades

Las investigaciones relacionadas con el "agroclima" son principalmente llevadas a cabo por países como India, China, Estados Unidos, Italia, Francia, Alemania, España, Reino Unido, Australia e Irán. Estos países abordan una amplia gama de temáticas relacionadas con el "agroclima" en sus análisis, como la dinámica de cultivos, la interacción suelo-clima, el impacto del cambio climático en la agricultura, estrategias de desarrollo sostenible, modelos climáticos avanzados, agrometeorología, dinámica de ecosistemas agrícolas, seguridad alimentaria en relación al clima, prácticas de agroecología, monitoreo de estaciones climáticas, evaluación de gases de efecto invernadero y muchos otros aspectos relevantes.

Al examinar específicamente los procesos de gestión de información agroclimática, se puede observar en la Figura 1 un análisis visual a través de un gráfico de flujo (Sankey plot) que muestra la interrelación entre palabras clave (tópicos más frecuentes), organizaciones y países (referentes mundiales). Estos gráficos permiten ver de manera clara cómo los países a través de sus principales instituciones avanzan en la comprensión de la información agroclimática para la toma de decisiones agrícolas. Se destaca, que además de los países mencionados previamente, Brasil también sobresale como un país activo en este campo, y se suma como uno de los diez países principales que contribuyen significativamente a la generación de conocimientos en la gestión de datos agroclimáticos y su aplicación en la toma de decisiones agrícolas.

El enfoque de gestión de información agroclimática es fundamental para lograr una intensificación sostenible de los sistemas agroalimentarios, teniendo en cuenta los cambios climáticos, dietéticos y demográficos (Biradar et al., 2019). En este sentido, la digitalización de los agroecosistemas se ha convertido en una necesidad para asegurar el cumplimiento de sus funciones ecológicas, y una alternativa para alcanzar un equilibrio sustentable y una mayor resiliencia frente a los desafíos actuales. Esta digitalización se integra con diversos elementos que conforman el agroecosistema, tales como la fitogenética para obtener variedades mejoradas, la diversificación de cultivos, el uso eficiente de insumos, las prácticas agronómicas, las condiciones ecológicas, la calidad del medio ambiente, la gestión y conservación de los recursos relacionados con el suelo, la tierra, los recursos naturales y las cuencas hidrográficas, la estabilidad económica, la integración de la

economía y el medio ambiente, y la gestión adecuada de los servicios ecosistémicos (Brussaard et al., 2007; Davis & Schirmer, 1987; Meinke et al., 2009; Neamatollahi et al., 2012a).

Los recientes avances en el Sistema de Observación de la Tierra (EOS), el Acceso Abierto (AO), la Inteligencia Artificial (IA), el Aprendizaje Automático (ML), las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), las Plataformas de Computación en Nube (CCP) y la Ciencia Ciudadana (CS) han aumentado significativamente el potencial del análisis de Big Data. Estas tecnologías proporcionan herramientas más inteligentes, interoperables y útiles para la toma de decisiones, generando valiosa información de base. Al aprovechar estas herramientas, se pueden abordar las lagunas de conocimiento, mejorar los procesos de toma de decisiones y promover intervenciones específicas que apoyen la sostenibilidad ecológica y la productividad en la agricultura (Biradar et al., 2019).

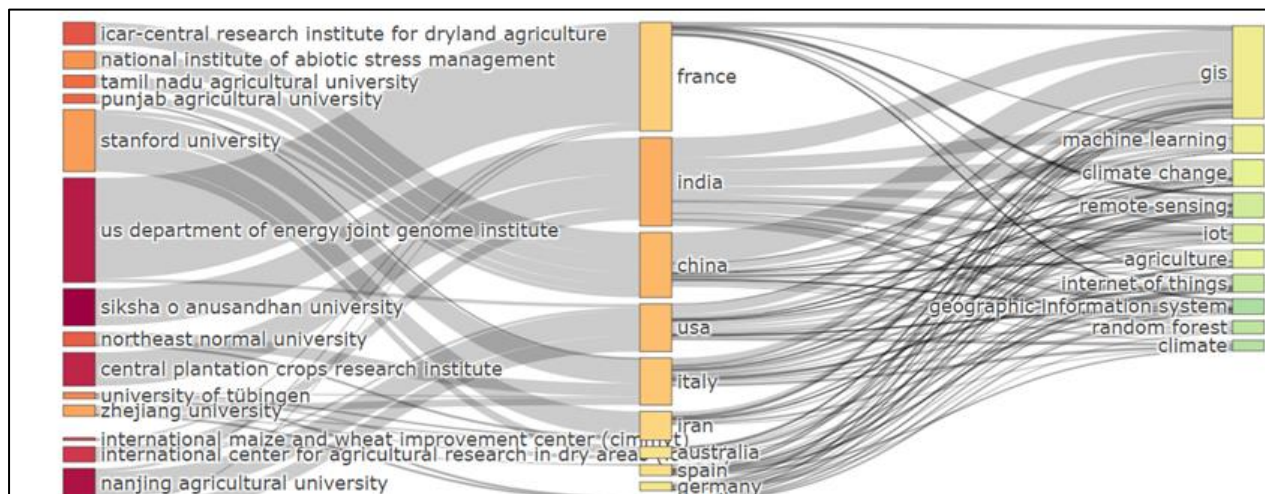
Se están realizando esfuerzos impulsados por el aumento digital de los macrodatos, las tecnologías digitales, el ecosistema de Big Data, para recopilar datos geoetiquetados e información sobre la producción agrícola a diferentes escalas, además de aprovechar las técnicas de aprendizaje automático, combinadas con los macrodatos y las plataformas de computación en la nube, para analizar datos agrometeorológicos, socioeconómicos y de oferta y demanda, e incluso hacer seguimiento espacial mediante datos satelitales. Los algoritmos de ML aprenden de la experiencia o los conocimientos previos para realizar tareas asignadas como el reconocimiento de cultivos, la estimación del rendimiento, la identificación de plagas y enfermedades, y la supervisión en tiempo real de la salud de los cultivos. Sin embargo, es importante destacar la necesidad de enfocarse en las funciones ecológicas, disponer de datos en tiempo real y realizar metaanálisis en tiempo real. Además, se requiere apoyo político para respaldar la difusión de la tecnología digital que integre las funciones ecológicas con el bienestar económico y social, promoviendo la adopción de sistemas agrícolas sostenibles a todas las escalas (Biradar et al., 2019).

Se espera que, utilizando intervenciones tecnológicas de vanguardia y análisis de macrodatos, los agricultores pueden proteger sus cultivos de las fluctuaciones meteorológicas, las plagas, las enfermedades y las catástrofes naturales. Se puedan también, sugerir cultivos adecuados durante los periodos de barbecho o tiempos en que el suelo se está regenerando naturalmente, considerando factores específicos del lugar,

como la salud del suelo, la tipología de la explotación, la disponibilidad de agua, las condiciones climáticas y la demanda del mercado, así como los insumos agrícolas y la cadena de valor del mercado. Este enfoque aumenta la productividad y garantizará la valoración sostenible del agroecosistema (Biradar et al., 2019).

De acuerdo con la Figura 1, los temas generales de referencia en procesos de gestión de información agroclimática están estrechamente relacionados con la problemática del cambio climático, los desafíos derivados del cambio climático y promover prácticas agrícolas sostenibles y adaptativas. También se centran en el uso de sistemas de información geográfica (GIS) para generar mapas de las zonas agroclimáticas y sus áreas aptas para diversas alternativas agrícolas a partir del análisis de parámetros como la lluvia, la altitud, el uso actual de la tierra, la temperatura, la humedad, la evaporación y otros. Además, exploran tópicos como el aprendizaje automático (machine learning), el internet de las cosas (IoT) y la teledetección, que brindan nuevas oportunidades para mejorar la gestión de la información agroclimática.

Figura 1. Gráfico Sankey Países-Instituciones-tópicos generales



Fuente. Elaborado a partir de datos de Scopus®. Fecha de consulta junio de 2023. Software de procesamiento Bibliometrix 4.1.1

Estrategia de búsqueda

Para realizar esta revisión, se utilizó una ecuación de búsqueda específica que recuperó un total de 390 documentos relevantes. Esta ecuación partió de la palabra agroclima combinada con términos relacionados con la gestión de información, como "Information

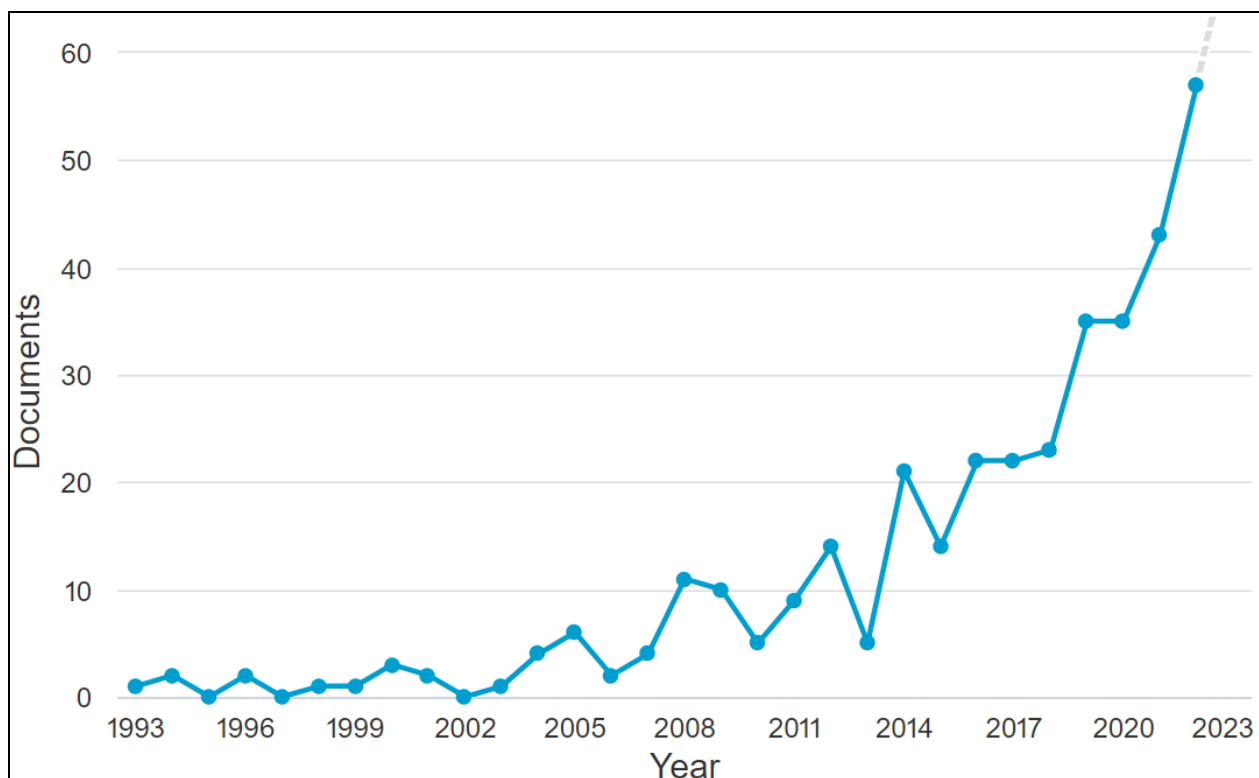
management" (gestión de información), "Data governance" (gobierno de datos), "Information architecture" (arquitectura de la información), "data management" (gestión de datos), IoT (Internet de las cosas), "internet of things" (internet de las cosas), "geographic information systems" (sistemas de información geográfica), "prediction models" (modelos de predicción) y "Machine Learning" (aprendizaje automático). La estructura de la ecuación fue:

Tabla 1. Ecuación de búsqueda diseñada

<p>Ecuación de búsqueda diseñada</p>	<p><i>TITLE-ABS-KEY (agro\$climat*) AND TITLE-ABS-KEY ("information management" OR "Data governance" OR "Information architecture" OR "data management" OR iot OR "internet of things" OR "geographic information systems" OR "prediction models" OR "Machine Learning").</i></p>
---	---

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 2, que refleja la dinámica encontrada en los 390 documentos recuperados.

Figura 2. Dinámica de publicaciones

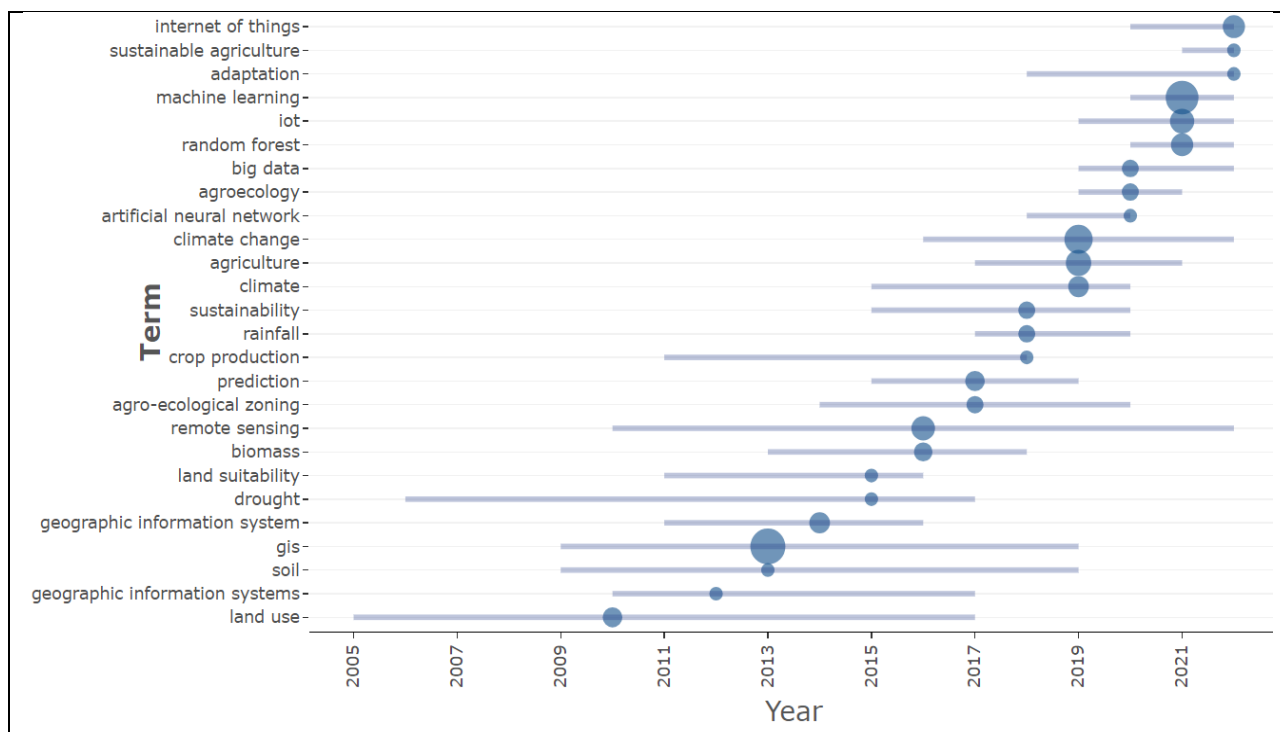


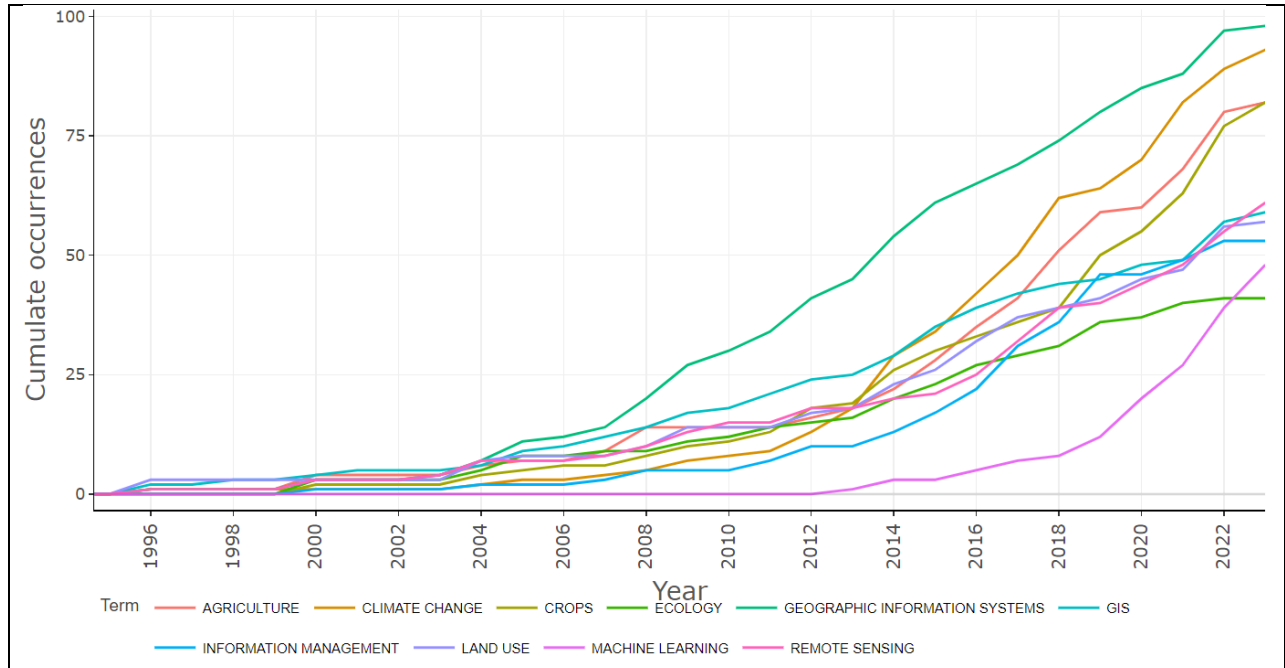
Fuente. Elaborado a partir de datos de Scopus®, fecha de consulta junio de 2023.

Al profundizar en el análisis de tendencias clave utilizando el software de procesamiento Bibliometrix 4.1.1 (ver Figura 3), se observa que a partir del año 2017 se ha trabajado en el uso de datos en diferentes modelos de simulación y estadísticos para la generación de predicciones probabilísticas. También se ha dado énfasis al uso de redes neuronales, el Internet de las Cosas (IoT) y los modelos de aprendizaje automático en el ámbito agroclimático. Además, se ha identificado que la teledetección o detección a distancia ha experimentado un alto grado de desarrollo y es de gran relevancia en el campo de investigación, siendo objeto de análisis desde aproximadamente el año 2010 hasta la actualidad. Estos avances demuestran la creciente importancia de las tecnologías de detección remota para el monitoreo y la gestión de la información agroclimática.

Asimismo, se ha observado que los temas que han sido investigados por un mayor número de autores e instituciones durante los últimos 5 años se centran precisamente en las áreas relacionadas con la cuarta revolución industrial y la agricultura sostenible. Esto refleja la necesidad de abordar los desafíos actuales y futuros del sector agrícola mediante enfoques innovadores y tecnológicos que promuevan la sostenibilidad y la eficiencia en la producción de alimentos.

Figura 3. Palabras clave relacionadas con procesos de gestión de información agroclimática (tendencias generales)



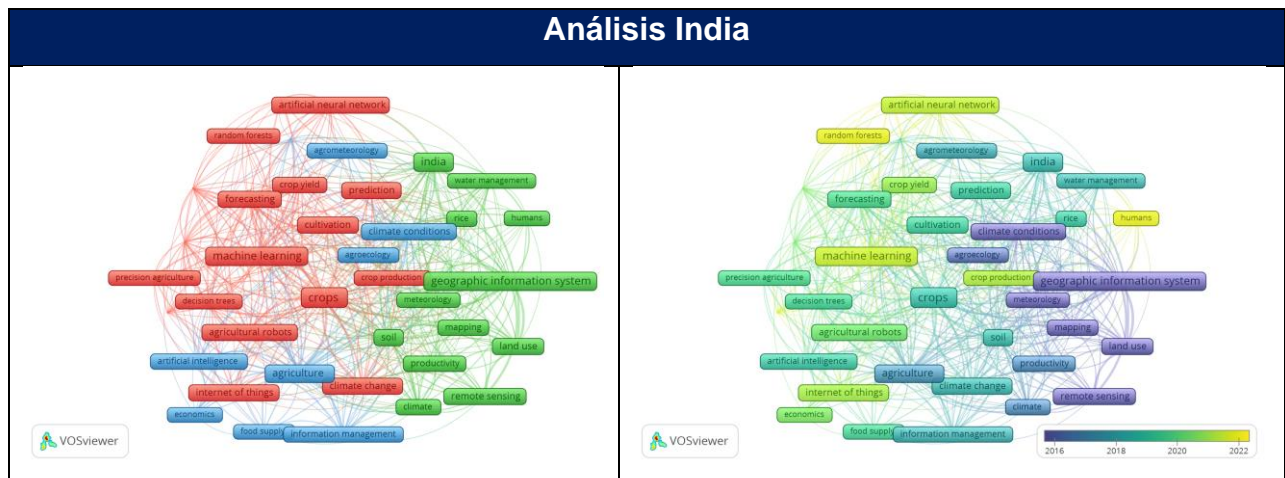


Fuente. Elaborado a partir de datos de Scopus®. Fecha de consulta junio de 2023. Software de procesamiento Bibliometrix 4.1.1.

Análisis por países

Considerando el objetivo de este informe de analizar los procesos de gestión de información agroclimática en distintos países, se presenta a continuación una revisión de los procesos de gestión de información agroclimática reportados en las publicaciones científicas de los países más destacados en la generación de conocimiento en este campo, recuperados de la base de datos Scopus, y según la ecuación mencionada:

Tabla 2. Procesos de gestión de información agroclimática en India



- i. Uso de cuatro modelos en la estimación de las temperaturas horarias del aire en diferentes regiones agroecológicas durante las temporadas de cultivo kharif y rabi. El estudio utiliza las temperaturas máximas y mínimas diarias como datos de entrada y selecciona métodos de la literatura que se utilizan habitualmente en los modelos de simulación del crecimiento de los cultivos. Los autores creen que la aplicación de este estudio puede mejorar el uso de los datos horarios de temperatura, en contraposición a los datos diarios, lo que conduce a una mayor precisión en la predicción de los eventos fenológicos, las interrupciones de la latencia de los brotes, las necesidades de horas de frío y otros factores relacionados (Bal et al., 2023).
- ii. Aplicabilidad de tres modelos de aprendizaje automático supervisado: Extreme Machine Learning, Multi-layer Perceptrons-Neural Network, Support Vector Machine para modelar la evapotranspiración diaria, puesto que, debido al cambio climático, la variación de los aspectos meteorológicos influye en las necesidades hídricas de los cultivos, la evapotranspiración y la asignación de agua de la agricultura, y la estimación precisa la evapotranspiración tiene gran importancia para mejorar la utilización del agua de forma eficiente y la programación del riego (Saggi et al., 2022).
- iii. Uso del Internet de las Cosas (IoT) para seleccionar los cultivos adecuados basándose en las características del suelo, los tipos de suelo y los datos de rendimiento de los cultivos, a través de la selección de atributos utilizando el algoritmo IDCSSO y la predicción de cultivos utilizando el método WLSTM (Kiruthika & Karthika, 2023).
- iv. Desarrollo de un modelo de predicción basado en una red neuronal multicapa feed-forward para optimizar y estimar el rendimiento del aceite esencial de propóleos, a partir del análisis de parámetros edáficos y medioambientales, identificando que la altitud es la variable que más influye, seguida del fósforo y la temperatura media máxima, con lo cual se puede estimar eficazmente el rendimiento de aceite en nuevos emplazamientos y maximizar el rendimiento de aceite de propóleo ajustando los parámetros variables en emplazamientos específicos, ofreciendo una opción comercial viable (Nayak et al., 2023).
- v. Uso de modelos de aprendizaje automático para mapear digitalmente la variabilidad de micronutrientes del suelo y mejorar la biofortificación agronómica, utilizando covariables ambientales centradas en las concentraciones de micronutrientes en el suelo y su presencia en el grano de arroz, en particular Zn, Cu, Fe y Mn disponibles. La aplicación de estos modelos permite tomar decisiones sobre subvenciones basadas en nutrientes, identificar oportunidades de inversión y hacer recomendaciones sostenibles para la

<p>producción de alimentos enriquecidos con micronutrientes, que conlleva a mejorar la salud y el bienestar de la población (Dasgupta et al., 2023a).</p> <p>vi. Uso de diferentes modelos, como la regresión lineal múltiple por pasos, la red neuronal artificial, la contracción mínima absoluta y el operador de selección, la red elástica y la regresión de cresta, para predecir el rendimiento de los cultivos de arroz. Estos modelos se basan en estadísticas históricas de rendimiento y datos meteorológicos, y su objetivo es contribuir a diversos fines, como las políticas de seguridad alimentaria, el almacenamiento de productos agrícolas y su posterior comercialización (Satpathi et al., 2023).</p> <p>vii. Uso de modelos de aprendizaje automático (ML - Machine Learning) y aprendizaje profundo (DL - Deep Learning) para aplicaciones agrometeorológicas que repercuten directamente en optimizar el rendimiento de los cultivos y minimizar el uso del agua. Estos modelos permiten comprender de manera más precisa los factores meteorológicos y climáticos que influyen en la agricultura, así como mejorar la planificación, el diseño y la gestión del riego. Con esta aproximación, se busca maximizar la eficiencia y productividad en la producción agrícola, al tiempo que se reduce el impacto ambiental relacionado con el uso del agua (Jala et al., 2023).</p> <p>viii. Uso de los drones agrícolas o vehículos aéreos no tripulados (UAV) para implementar la agricultura de precisión. Estos drones permiten monitorear y apoyar a los agricultores en todas las etapas del proceso agrícola. Un ejemplo es su utilización en el monitoreo de cultivos y en la aplicación de pesticidas. Esta tecnología ofrece una forma más eficiente y precisa de aplicar los productos fitosanitarios, asegurando una mejor protección de los cultivos y minimizando los riesgos para la salud humana. Además, los drones agrícolas también son utilizados para recopilar datos e información sobre los cultivos, como la detección temprana de enfermedades, el análisis de la salud de las plantas y la estimación de la producción (Mogili & Deepak, 2018; Muralidharan et al., 2023).</p>

Conclusiones sobre India:

<ul style="list-style-type: none"> ▪ Uso de modelos para estimar las temperaturas horarias del aire en diferentes regiones agroecológicas durante las temporadas de cultivo, con el objetivo de mejorar la predicción de eventos fenológicos y otros factores relacionados. ▪ Uso de modelos de aprendizaje automático supervisado para modelar la evapotranspiración diaria, con el fin de mejorar la utilización del agua en la agricultura y la programación del riego. ▪ Uso del Internet de las Cosas (IoT) para seleccionar cultivos adecuados basándose en características del suelo, tipos de suelo y datos de rendimiento

- automático. En este estudio se utilizaron series temporales del índice de vegetación mejorado (EVI) para detectar la presencia de cultivos de algodón, un enfoque probabilístico binomial para obtener la distribución de probabilidad de la aparición del cultivo de algodón, y el método de kriging gaussiano para estimar el rendimiento del algodón dentro de las diferentes zonas de cultivo (Naveed et al., 2023).
- ii. Se hace predicción del patrón espacial de la humedad media del suelo (SM) durante la estación primaveral en las tierras de cultivo del sur de la llanura de Songnen mediante algoritmos de aprendizaje automático y diversos datos medioambientales. Se usa el algoritmo de bosque aleatorio (RF) y se incorporan datos climáticos invernales, propiedades del suelo, relieve topográfico y datos de SM de estaciones agrometeorológicas, logrando una mayor precisión en la predicción de los valores de SM para periodos concretos. En general, el modelo de RF propuesto en este estudio ofrece predicciones más precisas de la sequía del suelo en primavera basándose en las condiciones climáticas invernales. Esta información es crucial para los departamentos de gestión agrícola en la preparación de los cultivos de primavera y el riego, y la mitigación de la salinización del suelo causada por la sequía (Chen et al., 2023).
 - iii. Debido a la falta de información espacialmente explícita y continua sobre las áreas de plantación de arroz en países como China e India, que son los dos países más poblados que se enfrentan a un rápido crecimiento demográfico y a la urbanización, dificulta la comprensión de las implicaciones medioambientales, incluyendo la seguridad alimentaria y del agua, el cambio climático y la transmisión de enfermedades infecciosas zoonóticas. Por ello, se han creado mapas utilizando series temporales de datos del espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) y una plataforma de cartografía del arroz denominada RICE-MODIS, que incorpora técnicas basadas en la fenología y los píxeles. Además, se están desarrollando modelos basados en datos para la predicción de los flujos de CH₄ del arroz con cáscara procedente de los países de Asia monzónica e identificar los predictores más importante combinando datos sobre mediciones del flujo de metano por covarianza de Foucault y datos de teledetección MODIS con técnicas de aprendizaje automático. Acerca de esto, se usa el modelo de bosque aleatorio el cual logra una precisión significativa en la predicción de los flujos de CH₄, siendo la temperatura de la superficie terrestre, la biomasa y los índices relacionados con la disponibilidad de agua los predictores claves. Se reconoce a futuro, la necesidad de incorporar variables adicionales relacionadas con los sustratos de carbono, los flujos de carbono y la gestión y los calendarios de los cultivos (Ouyang et al., 2023; Yan et al., 2005; G. Zhang et al., 2017).

- iv. Uso de modelos de regresión de bosque aleatorio (RFR) junto con datos de múltiples fuentes para mejorar la estimación precisa del estado del nitrógeno (N) vegetal en la agricultura, específicamente en el caso del trigo. Los resultados obtenidos indican que los modelos RFR, al incorporar factores climáticos y de gestión junto con índices de vegetación, superan el rendimiento de los modelos que se basan exclusivamente en índices de vegetación. Además, se implementa una estrategia de selección de variables basada en los coeficientes de correlación de Pearson para identificar las variables clave necesarias para desarrollar los modelos de RFR. Estos avances permitirían la monitorización más eficiente del estado del N en los cultivos, considerando diferentes condiciones edáficas, climáticas y de gestión, a una escala más amplia (Li et al., 2022).
- v. Desarrollo de modelos no lineales de amoníaco (NH₃) que consideran variables de tipo de cultivo, meteorológicas, de suelo y de gestión mediante cuatro métodos de aprendizaje automático, que incluyen máquina de vectores de soporte, perceptrón multicapa, máquina de refuerzo de gradiente y bosque aleatorio (RF), para analizar la volatilización de NH₃ en los cultivos, que según los modelos, está controlada por la entrada total de fertilizante de Nitrógeno (N), seguida de los factores meteorológicos, la gestión humana y las características del suelo. Uno de los resultados es la predicción del aumento potencial en la volatilización de NH₃ debido al cambio climático, el cual puede mitigarse entre un 26.1% y un 47.5% mediante diversas opciones de optimización de la gestión del fertilizante de N (Xu et al., 2021).
- vi. El aumento progresivo de las áreas salinas en las tierras de riego de la Cuenca del Mar de Aral obstaculiza el desarrollo agrícola intensivo y la seguridad alimentaria en la región. Las causas de este fenómeno incluyen el cambio climático, el aumento de los niveles freáticos y su mineralización, el mal funcionamiento del sistema de drenaje y el incumplimiento de los requisitos agrotécnicos. Esto resulta en una disminución de las tierras cultivables y una caída significativa en los rendimientos de los cultivos. En el caso de Uzbekistán, se utilizaron mapas de salinidad del suelo para analizar los cambios espaciales y temporales en la salinidad, empleando el método de interpolación de ponderación inversa de la distancia (IDW) para mapear las áreas de riego afectadas por la salinidad. Se determinó que la salinidad del suelo depende en gran medida de las condiciones locales del terreno y tiene una débil influencia de los factores climáticos. Los hallazgos sugieren que los especialistas agrícolas y los agricultores locales tomen medidas como el uso eficiente del agua de riego, el buen funcionamiento de los sistemas de drenaje y la adopción de tecnologías SIG innovadoras para abordar el problema de la salinidad del suelo en las áreas de riego (Kulmatov et al., 2021).

- vii. La temperatura del aire es un componente climático esencial, especialmente en la gestión de recursos hídricos y la planificación de actividades agrohidrológicas/meteorológicas. Se ha estudiado la capacidad predictiva de tres modelos de aprendizaje automático, máquina de vectores de soporte de mínimos cuadrados (LSSVM), método de grupo y red neuronal de manejo de datos (GMDHNN) y árboles de clasificación y regresión (CART), en la predicción de la temperatura del aire utilizando datos mensuales de temperatura de las estaciones climáticas de Astore y Gilgit en Pakistán. La capacidad predictiva de estos modelos de aprendizaje automático se evalúa utilizando diferentes combinaciones de datos de entrada con retrasos temporales, mediante el uso del error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE) y el coeficiente de determinación (R^2) como indicadores estadísticos. Los resultados obtenidos indicaron que el modelo LSSVM es más preciso en la predicción de la temperatura que los modelos GMDHNN y CART.
- viii. La temperatura del aire es un componente climático esencial, especialmente en la gestión de recursos hídricos y la planificación de actividades agrohidrológicas/meteorológicas. En este sentido, se ha evaluado la capacidad predictiva de tres modelos de aprendizaje automático: máquina de vectores de soporte de mínimos cuadrados (LSSVM), método de grupo y red neuronal de manejo de datos (GMDHNN) y árboles de clasificación y regresión (CART), para predecir la temperatura del aire utilizando datos mensuales de temperatura de las estaciones climáticas de Astore y Gilgit en Pakistán. Se utilizaron diferentes combinaciones de datos de entrada con retrasos temporales, y se emplearon el error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE) y el coeficiente de determinación (R^2) como indicadores estadísticos para evaluar la capacidad predictiva de los modelos. Los resultados mostraron que el modelo LSSVM fue más preciso en la predicción de la temperatura en comparación con los modelos GMDHNN y CART (Adnan et al., 2021).
- ix. La seguridad alimentaria depende tanto del cambio climático como de las mejoras agronómicas en el cultivo de arroz. Mediante el uso de modelos estadísticos y de aprendizaje automático, se ha investigado la contribución separada de estos factores al rendimiento del arroz. Los resultados obtenidos a partir de una base de datos de observaciones de 52 estaciones agrometeorológicas en China indican que las mejoras agronómicas son responsables de más del 40% del cambio observado en el rendimiento del arroz, con variaciones según el tipo de cultivo y la latitud. Entre las prácticas de manejo consideradas, el ajuste de la fecha de siembra tiene un impacto significativo en el rendimiento del arroz temprano y tardío. Además, se observó que el rendimiento del arroz responde de manera más sensible a la temperatura nocturna que a la temperatura diurna, y la velocidad del viento es el principal

factor climático que influye en el rendimiento del arroz temprano. Estos hallazgos basados en observaciones de 1981 a 2018 proporcionan una guía importante para la toma de decisiones agrícolas y puede ayudar a guiar las prioridades agrícolas en la mitigación del impacto del cambio climático en el rendimiento del arroz (J. ; Zhang et al., 2022).

- x. Al igual que en India, en donde los investigadores (Saggi et al., 2022) aplicaron tres modelos de aprendizaje automático supervisado para modelar la evapotranspiración diaria y obtener una estimación precisa que mejore la eficiencia en el uso del agua y la programación del riego, en China también es fundamental estimar la evapotranspiración de referencia (ET_o) en los procesos hidrológicos y agrometeorológicos, así como en la planificación y gestión de prácticas de riego, y la reutilización y reuso de agua. El modelo físico convencional de Penman-Monteith (PM56), desarrollado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), se ha recomendado a nivel mundial para estimar la ET_o. Por lo tanto, en este estudio, se utilizó inicialmente el modelo PM56 para determinar la ET_o utilizando datos meteorológicos requeridos, como temperatura máxima y mínima, velocidad del viento, humedad relativa promedio y horas de sol de seis estaciones en Pakistán. Estos datos se utilizaron para entrenar y probar algoritmos de aprendizaje automático y modelos impulsados por datos, como Support Vector Machine (SVM), Multilayer Perceptron, Group Method of Data Handling, General Regression Neural Network y Cascade Correlation Neural Network. Además, estos mismos modelos se aplicaron en otras estaciones climáticas en China, Nueva Zelanda y Estados Unidos sin datos de entrenamiento para validar y evaluar su rendimiento. Los resultados de la comparación mostraron que el modelo SVM obtuvo la mayor eficiencia para todos los sitios seleccionados. Cabe destacar que todos los modelos impulsados por datos mostraron una divergencia suficiente en diferentes climas, desde hiperárido hasta altamente húmedo, excepto SVM, que mostró resultados casi idénticos en todas las zonas climáticas en comparación con el método estándar FAO-PM56. En conclusión, se puede afirmar que SVM puede considerarse como un método alternativo confiable para estimar la ET_o entre los modelos impulsados por datos (Raza et al., 2020).
- xi. El regadío desempeña un papel crucial en la agricultura de la cuenca media del río Heihe, en el noroeste de China, donde predominan la escasez de agua y el clima seco. A medida que disminuye la disponibilidad de agua fluvial desviada para la agricultura, es necesario mejorar la eficiencia en el uso del agua y satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos para mantener su rendimiento. Por lo tanto, es esencial comprender mejor los procesos agrohidrológicos actuales, el rendimiento del riego, la productividad del agua y

explorar posibles medidas de ahorro de agua a escala regional. Por ello, se desarrolló un modelo agrohidrológico distribuido integrando estrechamente un modelo agrohidrológico (SWAP-EPIC) con el sistema de información geográfica ArcInfo. El modelo tiene en cuenta los efectos combinados de los factores meteorológicos, de cultivo, de suelo y de riego. El análisis de la simulación del escenario objetivo reveló que las mejoras en la conducción del agua y la programación del riego podrían reducir la percolación profunda en un 30% y ahorrar un 15% del agua de riego sin afectar negativamente al rendimiento de los cultivos.

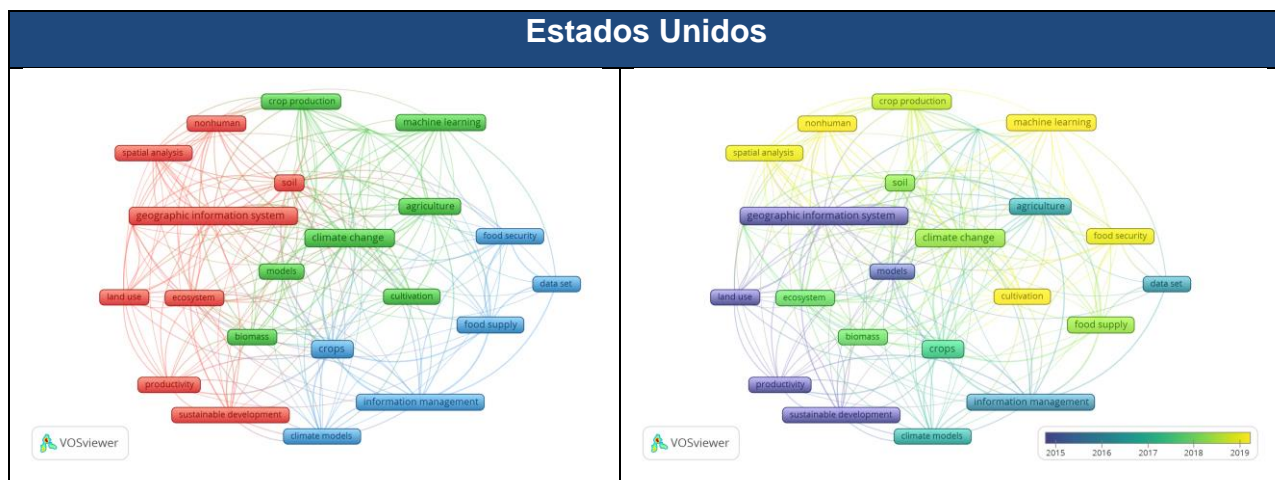
- xii. El riego desempeña un papel crucial en la agricultura de la cuenca media del río Heihe, en el noroeste de China, donde la escasez de agua y el clima seco son predominantes. A medida que la disponibilidad de agua del río para la agricultura disminuye, es necesario mejorar la eficiencia en el uso del agua y satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos para mantener su rendimiento. Por lo tanto, es esencial tener un mejor conocimiento de los procesos agrohidrológicos actuales, el rendimiento del riego, la productividad del agua y explorar medidas potenciales de ahorro de agua a escala regional. De acuerdo con esto, se desarrolló un modelo agrohidrológico distribuido mediante la estrecha integración del modelo agrohidrológico SWAP-EPIC con el sistema de información geográfica ArcInfo. El modelo tuvo en cuenta los efectos combinados de los factores meteorológicos, de cultivo, de suelo y de riego. Se seleccionó el Distrito de Riego Yingke (YID) en la cuenca media del río Heihe como caso de estudio, y se utilizó el modelo para simular los procesos agrohidrológicos de manera distribuida en el YID. Los resultados indicaron que la productividad del agua mostraba variaciones espaciales y era relativamente baja debido al uso excesivo de agua de riego. El análisis de la simulación del escenario objetivo reveló que las mejoras en la conducción del agua y la programación del riego podrían reducir la percolación profunda en un 30% y ahorrar un 15% del agua de riego, sin generar efectos negativos en el rendimiento de los cultivos (Jiang et al., 2015).

Conclusiones sobre China:

- Uso de la tecnología de teledetección para detectar y monitorear la superficie y el rendimiento del cultivo de algodón en la cuenca del río Indo, en Pakistán.
- Uso de algoritmos de aprendizaje automático y diversos datos medioambientales para predecir el patrón espacial de la humedad del suelo en las tierras de cultivo del sur de la llanura de Songnen en China.
- Creación de mapas de áreas de plantación de arroz utilizando series temporales de datos de teledetección.

- Estimación precisa del estado del nitrógeno en cultivos de trigo utilizando modelos de regresión de bosque aleatorio junto con datos de múltiples fuentes.
- Uso de modelos de aprendizaje automático para analizar la volatilización de amoníaco en cultivos y buscar opciones de optimización de la gestión del fertilizante de nitrógeno, considerando variables como el tipo de cultivo, factores meteorológicos, gestión del suelo, etc.
- Análisis de la salinidad del suelo en la Cuenca del Mar de Aral utilizando mapas de salinidad del suelo y técnicas de interpolación para analizar los cambios espaciales y temporales en la salinidad.
- Predicción de la temperatura del aire utilizando modelos de aprendizaje automático (LSSVM, GMDHNN y CART).
- Uso del modelo SVM (Support Vector Machine) para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_o) en diferentes climas, el cual mostró resultados casi idénticos al método estándar FAO-PM56.
- Desarrollo de un modelo agrohidrológico distribuido para mejorar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura.
- Uso de un modelo agrohidrológico distribuido para simular los procesos agrohidrológicos y evaluar la productividad del agua en el riego.

Tabla 4. Procesos de gestión de información agroclimática en Estados Unidos



- i. Para mejorar la biofortificación agronómica, se lleva a cabo un muestreo de suelos y se emplean enfoques de aprendizaje automático para generar mapas digitales de disponibilidad de zinc (Zn), cobre (Cu), hierro (Fe) y manganeso (Mn) en el suelo. Los modelos de regresión lineal revelaron una concordancia moderada entre las concentraciones de micronutrientes en el suelo y en el grano. Estos modelos desarrollados pueden ser utilizados para identificar áreas específicas donde se puedan plantar variedades de arroz con potencial de

- biofortificación. La cartografía digital del suelo tiene implicaciones significativas en la toma de decisiones a nivel regional, las subvenciones basadas en nutrientes, las inversiones y las recomendaciones sostenibles en cuanto a los micronutrientes. En el futuro, se requiere investigación adicional para desarrollar una plataforma digital de inteligencia de suelos que emplee productos de cartografía digital de suelos con micronutrientes en países con limitaciones de recursos (Dasgupta et al., 2023b).
- ii. Se utilizan dos métodos de inteligencia artificial (IA) para predecir los impactos ambientales debido al uso intensivo de insumos agrícolas en la producción de soja en diferentes escenarios. El primero de ellos es el algoritmo ANFIS-FCM (sistema adaptativo de inferencia neuro-fuzzy-fuzzy c-means), que representa un enfoque computacional novedoso. El segundo método es una red neuronal artificial (RNA), que es un enfoque convencional en IA. Tras evaluar ambos métodos de IA, se encontró que el modelo ANFIS-FCM demostró ser una técnica eficaz para predecir con precisión los parámetros medioambientales asociados al cultivo de la soja (Mohammadi Kashka et al., 2023a).
 - iii. Teniendo en cuenta el desafío de estimar de manera no destructiva el estado de Nitrógeno de las plantas en diferentes zonas agroecológicas, se están utilizando modelos de regresión de bosques aleatorios (RFR, por sus siglas en inglés) junto con datos de múltiples fuentes para mejorar la estimación del estado de N del trigo de invierno (*Triticum aestivum* L.) en dos zonas agroecológicas. Se concluye que la integración de datos de múltiples fuentes utilizando modelos RFR puede mejorar significativamente la estimación de indicadores del estado de N del trigo de invierno en comparación con modelos que solo utilizan un índice de vegetación. Sin embargo, se necesitan más estudios para desarrollar modelos de aprendizaje automático basados en vehículos aéreos no tripulados y teledetección satelital para el monitoreo más eficiente del estado de N de los cultivos (Li et al., 2022).
 - v. La mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) es uno de los principales enfoques del Pacto Climático de Glasgow, un acuerdo global que se espera acelere la acción climática. Después del sector energético, los residuos industriales y agrícolas son los principales contribuyentes a las emisiones globales de GEI. Por lo tanto, se están realizando esfuerzos significativos de investigación y desarrollo para cambiar el enfoque convencional de tratamiento de residuos hacia la recuperación de recursos a partir de los mismos, incorporando el concepto de bioeconomía circular. Se han logrado avances significativos en tecnologías como la digestión anaerobia, el compostaje, la pirólisis, el cultivo de algas y la celda de combustible microbiana para la recuperación de recursos a partir de los residuos orgánicos. En este sentido, una de las tendencias recientes y las perspectivas futuras en materia de modelización y optimización de la producción de biogás a partir de la codigestión anaeróbica. Se señala que la

codigestión requiere más investigación sobre diversos biorrecursos y sus proporciones específicas de mezcla. En estudios anteriores no se ha abordado la modelización y optimización de la codigestión con fluctuaciones estacionales del sustrato. El control de los factores clave del proceso, como la temperatura, el pH y la relación carbono-nitrógeno, es fundamental para mejorar la producción de biogás. La mayoría de las investigaciones se centran en la monodigestión, mientras que la codigestión de materias primas, la modelización y la optimización de la digestión anaeróbica requieren una mayor investigación. Es esencial un enfoque multiobjetivo que tenga en cuenta todos los parámetros técnicos y económicos en la modelización y optimización.

v. La mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) es uno de los principales enfoques del Pacto Climático de Glasgow, un acuerdo global que busca acelerar la acción climática. Si bien el sector energético es una fuente importante de emisiones, los residuos industriales y agrícolas también contribuyen significativamente a las emisiones globales de GEI. Por esta razón, se están llevando a cabo esfuerzos significativos en investigación y desarrollo para cambiar el enfoque convencional de tratamiento de residuos hacia la recuperación de recursos, mediante la implementación del concepto de bioeconomía circular (Surendra et al., 2022). En este contexto, se han logrado avances significativos en tecnologías como la digestión anaerobia, el compostaje, la pirólisis, el cultivo de algas y la celda de combustible microbiana, que permiten la recuperación de recursos a partir de los residuos orgánicos. Dentro de este marco, una de las tendencias recientes y las perspectivas futuras se centran en la modelización y optimización de la producción de biogás a través de la codigestión anaeróbica. Se destaca la necesidad de investigar los diversos biorrecursos y las proporciones específicas de mezcla para lograr una codigestión eficiente (Kunatsa & Xia, 2022). Hasta ahora, la modelización y optimización de la codigestión con fluctuaciones estacionales del sustrato no ha sido ampliamente abordada, y es fundamental controlar los factores clave del proceso, como la temperatura, el pH y la relación carbono-nitrógeno, para mejorar la producción de biogás. Aunque la mayoría de las investigaciones se han centrado en la monodigestión, es necesario investigar más sobre la codigestión de diferentes materias primas y desarrollar modelos de optimización para la digestión anaeróbica. Para ello, los estudios sugieren adoptar un enfoque multiobjetivo que tome en cuenta tanto los parámetros técnicos como los económicos en la modelización y optimización de los procesos de digestión anaeróbica. Esto permitirá maximizar la eficiencia y la rentabilidad de la producción de biogás, contribuyendo así a la reducción de las emisiones de GEI y al avance hacia una economía más sostenible (Kunatsa & Xia, 2022).

vi. Los sistemas de seguimiento de cultivos son cruciales para el éxito de la Agricultura Inteligente, especialmente si se tiene en cuenta la creciente demanda

de productos alimenticios por el crecimiento demográfico y la escasez de mano de obra. Por ello, investigadores de la University of North Texas proponen un Sistema de Monitorización de Cultivos (CMS) eficiente, aprovechando la tecnología IoT para automatizar los procedimientos de monitorización. Los datos en tiempo real recogidos de los cultivos se comparten de forma segura utilizando una tecnología privada IOTA Tangle Distributed Ledger. Este sistema proporciona a los agricultores información oportuna basada en parámetros ambientales en tiempo real, lo que les permite tomar decisiones informadas y reducir la necesidad de trabajo manual. Este sistema se ha implementado en la práctica y se ha analizado exhaustivamente en cuanto a escalabilidad y fiabilidad. Al combinar IoT, datos en tiempo real y comunicación segura, el CMS ofrece una solución robusta para el monitoreo de cultivos en la agricultura inteligente (Bapatla et al., 2022).

- ii. Se está realizando el mapeo de la distribución espacial del vector del dengue *Aedes aegypti* y predicción la abundancia de hembras adultas de *Aedes aegypti* en el noreste de Tailandia, usando cinco modelos de aprendizaje supervisado (regresión logística, máquina de vectores de apoyo, vecino más próximo, red neuronal artificial y bosque aleatorio). Para esto, se incorporan factores socioecológicos, de cambio climático y conocimientos, actitudes y prácticas (CAP) sobre el dengue, así como factores paisajísticos, mediante un sistema basado en el aprendizaje automático. Los resultados han mostrado que el modelo de bosque aleatorio tiene el mejor rendimiento predictivo para la abundancia de hembras adultas de *Aedes aegypti*, considerando factores socioeconómicos, CAP y paisajísticos. Al combinar todos los factores, la precisión predictiva del modelo de bosque aleatorio mejora aún más, lo que lo hace más adecuado para predecir la abundancia de *Aedes aegypti* en el noreste de Tailandia. Además, integrar sistemas de información geográfica (SIG) y sistemas de aprendizaje automático demuestra un potencial significativo para comprender la distribución espacial de los vectores del dengue y predecir su abundancia. Los hallazgos pueden contribuir a optimizar las estrategias de control de vectores y a desarrollar estrategias para la supresión de mosquitos, la predicción y el control de enfermedades arbovirales como el dengue, el chikungunya y el Zika (Rahman et al., 2021).
- ii. Se está trabajando en el desarrollo de una plataforma de modelización de agroecosistemas a escala mundial para los cultivos bioenergéticos. Esta plataforma consta de seis componentes principales (i) conjuntos de datos estandarizados sobre recursos naturales, (ii) datos globales de ensayos de campo y prácticas de gestión de cultivos, (iii) unidades de simulación y escenarios de gestión, (iv) calibración y validación de modelos, (v) simulación de computación de alto rendimiento (HPC), y (vi) procesamiento y análisis de los resultados de la simulación. Un ejemplo de modelo utilizado es el HPC-Environmental Policy Integrated Climate (HPC-EPIC), el cual se utiliza para simular el cultivo

bioenergético perenne conocido como pasto varilla (*Panicum virgatum* L.). Este modelo estima los potenciales de producción de materia prima y sus efectos en todo el mundo. La plataforma de modelización puede analizar el secuestro de carbono en el suelo, las emisiones netas de gases de efecto invernadero (GEI), la contaminación por fuentes no puntuales (como la pérdida de nutrientes y pesticidas) y el intercambio de energía con la atmósfera. Además, la plataforma puede ampliarse para incluir otros cultivos bioenergéticos, como miscanthus, caña energética y agave, así como cultivos alimentarios, en diferentes escenarios de gestión. Sin embargo, es importante destacar que actualmente no existe un modelo global de productividad de cultivos energéticos disponible, por lo que estos esfuerzos de desarrollo son cruciales para obtener información cuantitativa y geoespacialmente explícita sobre el potencial de biomasa y la sostenibilidad de los cultivos bioenergéticos (Kang et al., 2014).

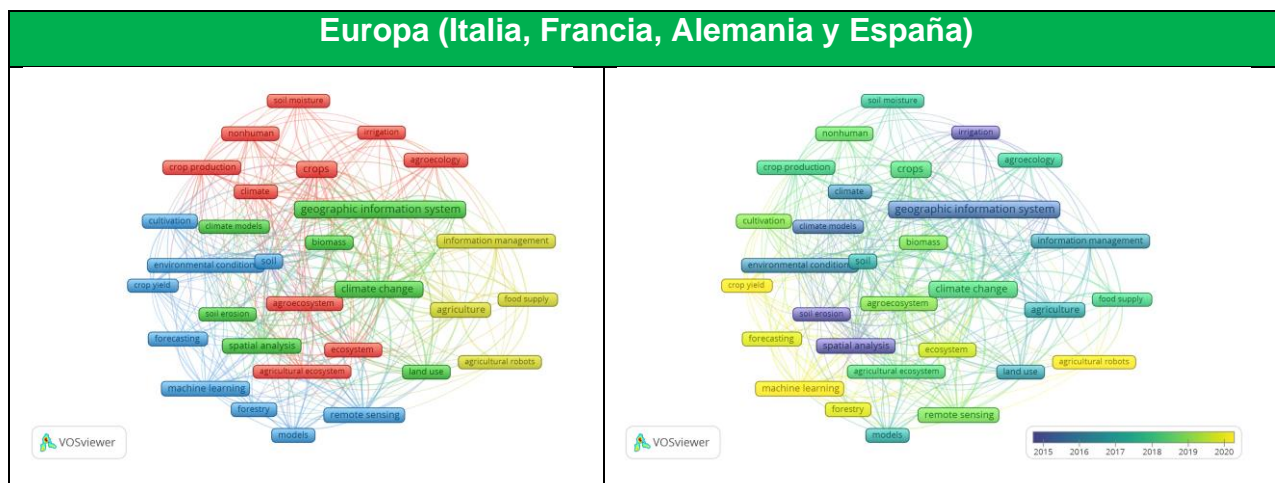
- ix. Se está investigando el impacto potencial de la gestión estratégica de residuos en el cultivo de *Miscanthus*, una materia prima bioenergética celulósica. Aunque el *Miscanthus* tiene una alta productividad sobre el suelo con bajos insumos agroquímicos, la preocupación surge de las temperaturas del suelo por debajo de $-3,5^{\circ}\text{C}$, que podrían amenazar el éxito de este cultivo en regiones templadas. Para abordar esta cuestión, se utiliza un modelo Agro-IBIS para evaluar los efectos de los residuos de cultivos en las temperaturas del suelo y el riesgo de daños en los rizomas (Kucharik et al., 2013).

Conclusiones sobre Estados Unidos:

- Uso de enfoques de aprendizaje automático para generar mapas digitales de disponibilidad de zinc, cobre, hierro y manganeso en el suelo.
- Uso de métodos de inteligencia artificial (IA), ANFIS-FCM y RNA, para predecir los impactos ambientales del cultivo de soja.
- Uso de modelos de regresión de bosques aleatorios y datos de múltiples fuentes para mejorar la estimación del estado de nitrógeno del trigo de invierno en diferentes zonas agroecológicas.
- Uso de un enfoque multiobjetivo que toma en cuenta todos los parámetros técnicos y económicos en la modelización y optimización de la producción de biogás a partir de la codigestión anaeróbica.
- Propuesta de un Sistema de Monitorización de Cultivos (CMS) basado en tecnología IoT para automatizar la monitorización de los cultivos en tiempo real.
- Uso del aprendizaje automático y los sistemas de información geográfica para mapear la distribución del vector del dengue y predecir la abundancia de hembras adultas de *Aedes aegypti*.

- Desarrollo de una plataforma de modelización de agroecosistemas a escala mundial para cultivos bioenergéticos.
- Uso de un modelo para evaluar los efectos de los residuos de cultivos en las temperaturas del suelo y el riesgo de daños en los rizomas.

Tabla 5. Procesos de gestión de información agroclimática en Europa (Italia, Francia, Alemania y España)



i. El proyecto INCREASE tiene como objetivo explorar eficientemente la diversidad de los recursos genéticos vegetales mediante la creación y curación de Colecciones Inteligentes (ICs, por sus siglas en inglés). Estas ICs se desarrollarán para los cultivos de garbanzo, frijol común, lenteja y altramuz. Las ICs se basarán en colecciones de líneas endogámicas purificadas genéticamente, con toda la información genotípica y fenotípica obtenida en diferentes experimentos y por diferentes actores, refiriéndose al mismo genotipo idéntico, obtenidas a partir de una muestra amplia de accesiones representativas de bancos de genes y tendrán la capacidad de "memorizar, aprender, mejorar y evolucionar". A partir del análisis de los datos integrados en las bases de datos sobre la estructura de la diversidad genética, su relación con la diversidad fenotípica y el entorno, las ICs aprenderán y mejorarán, corrigiendo errores y ajustando progresivamente los procedimientos de muestreo según la nueva información obtenida. Además de los datos genotípicos, se realizarán fenotipados en subcolecciones de las ICs mediante actividades de evaluación realizadas por diferentes actores, tanto internos como externos al consorcio del proyecto INCREASE. Se realizarán análisis de asociación genoma-amplio (GWA, por sus siglas en inglés) utilizando enfoques convencionales y de aprendizaje automático basados en inteligencia artificial (IA). Se identificarán asociaciones entre marcadores y rasgos para facilitar la exploración de las colecciones de germoplasma no caracterizadas fenotípicamente. En resumen, INCREASE desarrollará colecciones principales

anidadas para cada uno de los cuatro cultivos de legumbres alimenticias, que incluirán formas silvestres, variedades locales y cultivares mejorados. Estas colecciones estarán compuestas por una Reference-CORE (R-CORE), una Training-CORE (T-CORE) y una Hyper-CORE (H-CORE). La R-CORE contendrá miles de líneas endogámicas genéticamente purificadas y se conservará a largo plazo en bancos de genes. La T-CORE será un subconjunto de la R-CORE y se utilizará para la caracterización fenotípica y genómica. La H-CORE será una muestra más pequeña y se utilizará para una caracterización más profunda. Estas ICs se compartirán como una herramienta entre los bancos de genes y se duplicarán en el Svalbard Global Seed Vault, y coexistirán con las colecciones completas disponibles en diferentes bancos de genes para mejorar la gestión global de la diversidad genética (Bellucci et al., 2021).

- ii. Desarrollo de una biblioteca espectral global del suelo en el infrarrojo visible-cercano (vis-NIR), la cual es considerada la mayor y más diversa base de datos de su tipo. Estos espectros globales son útiles para predecir una variedad de atributos del suelo, como el contenido de carbono orgánico e inorgánico, la proporción de arcilla, limo y arena, el contenido de hierro, la capacidad de intercambio catiónico y el pH. Los autores emplearon algoritmos de aprendizaje automático y ondículas para mejorar el modelado espectroscópico y como resultado, esta biblioteca contiene información espectral que permite comprender la composición del suelo, la cubierta terrestre y la distribución geográfica global, siendo útil como sustituto para evaluar la variabilidad climática a nivel mundial (Viscarra Rossel et al., 2016).
- iii. En el contexto de la cuenca mediterránea, donde los agroecosistemas desempeñan un papel crucial en el paisaje, la conservación de los cultivos es fundamental para preservar la biodiversidad. Por ello, se ha investigado en determinar si los paisajes dominados por cultivos pueden contribuir a la conservación de la biodiversidad en una zona mediterránea que ha experimentado modificaciones humanas durante miles de años y está influenciada por el efecto península, un fenómeno biogeográfico. Para lograr esto, se recopilaron datos de campo mediante un muestreo aleatorio estratificado y se utilizó un método de puntuación. A través de un análisis de regresión lineal múltiple, se realizó una predicción para toda el área de estudio. Finalmente, se llevó a cabo un análisis GAP para comparar la distribución de los puntos calientes de biodiversidad con la red actual de áreas protegidas (Chiatante & Meriggi, 2016).
- iv. Se realizar un análisis agroambiental, económico y energético preliminar para evaluar críticamente el potencial de biomasa de una zona del centro de Italia (Tuscia Romana), y se obtiene un modelo que podría utilizarse para otras zonas similares del centro de Italia. Este modelo evalúa la disponibilidad potencial de

- biomasa agroforestal, el potencial energético y las infraestructuras de transporte utilizando análisis de criterios múltiples y enfoques de sistemas de información geográfica. Este modelo podría aplicarse a escala local para contribuir a la elaboración de políticas medioambientales (Colantoni et al., 2016).
- v. La cuenca hidrográfica de Orgeval es un lugar representativo de las zonas rurales con cultivo intensivo de cereales del mundo templado. En los últimos años, se han llevado a cabo varios estudios para evaluar la lixiviación de nitratos, la contaminación de los acuíferos, la desnitrificación de las aguas subterráneas y la degradación de los suelos. Para ello, mediante simulaciones con modelos se comparan medidas de gestión curativas, como la introducción de estanques, y medidas preventivas, como la conversión a prácticas de agricultura ecológica. Se concluye que sólo las medidas preventivas son capaces de reducir la contaminación sin aumentar aún más las emisiones de N₂O (Garnier et al., 2014).
- vi. Se llevó a cabo la cartografía y cuantificación de la distribución espacial de los carrizos gigantes (GR) en los terraplenes de los cursos de agua utilizando técnicas de teledetección (RS, Remote Sensing) en combinación con un Sistema de Información Geográfica (SIG). En este estudio, se empleó un método de clasificación automática supervisada que se aplicó a tres combinaciones diferentes de bandas espectrales (Imagen en Color Real - TCI; Infrarrojo Cercano, Verde y Azul - NGB; Vegetation Red Edge - VRE) obtenidas de imágenes satelitales Sentinel-2 correspondientes a la temporada estival del 11 de agosto de 2019. El objetivo principal fue determinar la clasificación más adecuada para mapear los carrizos gigantes (GR) (Sciuto et al., 2022).
- vii. El proyecto cooperativo Red Italiana de Fenología (IPHEN) tiene como objetivo producir mapas nacionales de análisis y previsión de las fases fenológicas de las plantas. Estos mapas se elaboran mediante modelos basados en un enfoque de Horas de Calor Normal, que pondera la eficacia de la temperatura del aire horaria para la progresión fenológica de las plantas. Estos mapas se utilizan principalmente para satisfacer las necesidades de la agricultura, la sanidad y el cuidado del medio ambiente. IPHEN es un sistema de procesamiento de datos que consta de los siguientes segmentos principales: (a) recopilación de datos atmosféricos y fenológicos, (b) procesamiento de datos utilizando modelos fenológicos y geoestadísticos apropiados, y (c) generación de mapas (Mariani et al., 2013).
- viii. En el proyecto FOOTPRINT, financiado por la UE, se busca caracterizar la diversidad de las condiciones agrícolas y ambientales en Europa en relación con los parámetros que influyen en el destino de los plaguicidas en el medio ambiente. Para lograr esto, se utilizaron conjuntos de datos paneuropeos sobre

suelos, clima, cubierta terrestre y cultivos, y se aplicaron técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). El objetivo era identificar todas las combinaciones únicas de clima, suelo y tipos de cultivos que caracterizan la agricultura europea en su totalidad (Centofanti et al., 2008).

- ix. Cuatro instituciones de investigación italianas, el Consejo de Investigación Agrícola (ISA, Bari), el Consejo Nacional de Investigación (ISSIA, Bari) y dos universidades (Federico II-Nápoles y Milán), colaboran en un proyecto financiado por el Ministerio de Agricultura y Políticas Forestales de Italia. El objetivo principal de este proyecto es desarrollar un Sistema de Ayuda a la Decisión (SAD) que integre información de teledetección, datos espaciales y modelos de simulación para la gestión de los recursos hídricos en los distritos de riego. Además, se busca simular diferentes escenarios de riego con el fin de evaluar los efectos del estrés hídrico en el rendimiento de los cultivos, utilizando indicadores agroecológicos. Asimismo, se pretende identificar las áreas más sensibles al riesgo de sequía en el sur de Italia. El producto final del proyecto será un Sistema de Ayuda a la Decisión (DSS) que permita integrar imágenes de teledetección, estimar variables relacionadas con la sequía en cultivos y suelos, e incorporar estas variables en un modelo de simulación a escala de distrito. Finalmente, el sistema estimará la evapotranspiración, el estado hídrico de las plantas y los indicadores de sequía (Rinaldi et al., 2006).
- x. La agricultura de conservación (AC) se promueve como una alternativa que, entre otras funciones, mejora la infiltración del agua y limita la evaporación del suelo (Brouder & Gomez-Macpherson, 2014; Lal, 2006; Scopel et al., 2013) mediante el uso de un mantillo de residuos de cultivos en la superficie del suelo (FAO, 2017). Sin embargo, la variabilidad en la distribución de las precipitaciones, combinada con la diversidad de condiciones agroecológicas y cultivos en los trópicos, dificulta la evaluación precisa de la efectividad del acolchado. Además, la literatura científica sugiere que la relación entre el acolchado y la productividad de los cultivos no es directa (Ranaivoson et al., 2017), y se debe tener en cuenta las interacciones dinámicas agua x suelo x cultivo para evaluar con precisión el impacto del acolchado en el balance hídrico y la productividad de los cultivos. Para captar la complejidad de estas interacciones, habría que mantener parcelas experimentales durante un número relativamente grande de años y en distintos lugares para captar las variaciones espaciales y temporales del suelo y el clima. Una posible solución alternativa es utilizar la herramienta de simulación PYE-CA (Potential Yield Estimator for Conservation Agriculture) para llevar a cabo un experimento virtual utilizando una serie de datos meteorológicos a largo plazo que representen el clima local. Esto permitiría identificar los principales impulsores de las interacciones entre las precipitaciones y los cultivos, y su aplicación podría

- extenderse a otras regiones tropicales. Específicamente, se busca identificar las condiciones agroecológicas en las cuales el acolchado puede mitigar la variabilidad de las precipitaciones y el estrés hídrico, y mejorar los rendimientos del arroz de secano en la región del lago Alaotra en Madagascar. Los resultados obtenidos proporcionarían pautas y directrices para los agricultores locales (Bruelle et al., 2017).
- xi. Se ha desarrollado un Sistema de Información Geográfica (SIG) rasterizado o basado en cuadrículas que integra datos sobre la mosca tsetse, la tripanosomiasis, la producción animal, la agricultura y el uso del suelo. Este sistema utiliza imágenes de satélite para facilitar el muestreo de la mosca tsetse en toda el área de estudio, y se aplican diferentes modelos discriminantes para los datos meteorológicos estacionales y series temporales de variables AVHRR y METEOSAT derivadas de satélites de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA). Los resultados se centran en la generación de mapas digitales que representan la distribución y abundancia de la mosca tsetse y su correlación con las condiciones climáticas y agroecológicas locales. Estos mapas, en combinación con la información sobre la enfermedad, los hospedadores y sus propietarios, pueden contribuir a comprender la epidemiología espacial de la tripanosomiasis y ayudar en la planificación de operaciones integradas de control (Hendrickx et al., 2001). Se concluye que el muestreo basado en cuadrículas es el método ideal para evaluar rápidamente la situación actual del vector y de la enfermedad en cualquier país o región, y que la teledetección contribuye en la planificación de un sistema de muestreo de este tipo (Hendrickx et al., 2007).
- xii. La agricultura de secano o de temporal es muy sensible a factores agrometeorológicos como la temperatura, la humedad, la insolación y la radiación, lo cual significa que la evolución de los cultivos está estrechamente ligada a las condiciones climáticas cambiantes. En Marruecos, se espera que el cambio climático se manifieste principalmente a través de la reducción de las precipitaciones, el aumento de las temperaturas y el incremento de los riesgos extremos como sequías, olas de calor, heladas e inundaciones. Por consiguiente, resulta de vital importancia desarrollar métodos de modelización y predicción temprana del rendimiento de los cultivos. En este contexto, el aprendizaje automático se presenta como una herramienta fundamental para la predicción del rendimiento de los cultivos. Se emplean modelos de regresión lineal múltiple (MLR), redes neuronales artificiales (ANN) y bosques aleatorios (RF) que integran índices de sequía obtenidos a partir de imágenes de satélite y datos meteorológicos de reanálisis. Estos modelos permiten tomar decisiones clave en relación con la predicción del rendimiento de los cultivos, a partir de la evaluación de los efectos del cambio climático en la propagación de cereales

de secano de otoño, como el trigo duro, trigo blando y cebada, los cuales desempeñan un papel importante en la producción agroalimentaria de la llanura de Gharb. Los resultados indican que la disminución de la humedad del suelo y del cultivo en la primavera temprana, así como las condiciones térmicas más altas cerca de la cosecha, se asocian con una reducción en el rendimiento de los cultivos. Se destaca que los índices de sequía son más efectivos durante las etapas en las que los cultivos tienen una actividad fotosintética más dinámica, como la primavera, en contraste con las etapas tempranas del ciclo vegetativo, como el otoño y el invierno. Los modelos utilizados, tanto el MLR, ANN como RF, muestran resultados similares, aunque se observan algunas mejoras con el modelo de bosque aleatorio. Estos modelos demuestran una alta precisión en la predicción de la pérdida de rendimiento, obteniendo un gran número de resultados positivos (aciertos) con tasas de acierto (HR) superiores al 90% (Hakam et al., 2023).

- xiii. El consumo de suelo y el cambio climático han intensificado los desastres naturales en las zonas urbanas. En respuesta a estas emergencias en el marco de la Agenda Europea 2030, se han investigado los cambios en el uso y la cubierta del suelo (LULCC, Land-Use and Land-Cover Changes) en el área metropolitana de Roma, con el fin de detectar las variaciones sinérgicas en el suministro de los servicios ecosistémicos de mitigación de inundaciones y de producción agrícola. La metodología se basa en un análisis SIG (Sistema de Información Geográfica) que identifica los procesos de transformación y las permanencias relacionadas con la cobertura del suelo. La variación en los servicios de mitigación de inundaciones se cuantificó mediante el uso del Modelo de Mitigación del Riesgo de Inundaciones Urbanas (UFRM, Urban Flood Risk Mitigation Model) de la suite InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs), mientras que la variación en la producción agrícola a través de los coeficientes de productividad se asoció a los cambios en los usos del suelo. Por último, se realizó un análisis de las sinergias y compensaciones inducidas por los cambios en el uso y la cubierta del suelo entre ambos servicios. Los resultados muestran un cambio negativo neto en la oferta de servicios ecosistémicos, causado principalmente por la urbanización a expensas de las tierras agrícolas (Marino et al., 2023).
- xiv. Se han realizado mediante SIG los mapas de idoneidad climática y de suelos para los cultivos de almendro (*Prunus dulcis* B.), higo (*Ficus carica* L.), avellano (*Corylus avellana* L.), kiwi (*Actinidia chinensis* P.), pistacho (*Pistacia vera* L.) y granado (*Punica granatum* L.), que son especies de árboles frutales inmunes/resistentes a la *Xylella fastidiosa* subsp. *pauca* (Xfp). Estos árboles se plantarían dentro de las zonas olivareras infectadas por el Xfp en la región sur de Italia para compensar las pérdidas económicas y medioambientales en los

- agroecosistemas olivareros. Para el desarrollo de los mapas, se llevó a cabo el análisis de idoneidad de las tierras utilizando datos climáticos y edafológicos, y el procesamiento cartográfico y geoespacial se llevó a cabo con el software QGIS 3.22.11 utilizando WGS 1984 UTM/ZONA 33N (EPGS: 32633) como sistema de referencia de coordenadas. El análisis mostró que las zonas olivareras infectadas por el Xfp son aptas para la plantación de la mayoría de los cultivos de frutales propuestos, con diferentes niveles de aptitud ya que las condiciones climáticas y edáficas varían entre las zonas de estudio. Este es el primer estudio que proporciona medidas prácticas de contención contra la difusión del Xfp en el sur de Italia (Alhajj Ali et al., 2023).
- xv. Uso de un marco de modelización integrado que combina sistemas de información geográfica (SIG), una versión modificada del modelo RothC para simular los cambios en el carbono orgánico del suelo (SOC, soil organic carbon) y métodos de nivel 2 del IPCC para estimar las emisiones de GEI, con el fin de comprender el impacto del cambio climático en los sistemas de pastizales templados húmedos del norte de España utilizados para la producción de leche. El objetivo es evaluar las emisiones netas de gases de efecto invernadero (GEI) en una amplia zona de pastizales bajo diferentes escenarios de cambio climático y compararlas con un escenario base de referencia. La hipótesis es que las emisiones de GEI aumentarán en condiciones de cambio climático, pero las prácticas específicas de gestión del estiércol, como la digestión anaerobia (DA), pueden mitigar el efecto de calentamiento global (Jebari et al., 2023).
- xvi. Desarrollo de un marco de adquisición de datos y modelización para la predicción de la incidencia de las plagas del plátano, basado en sensores IoT, que recogen variables meteorológicas y microclimáticas, como la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento, que se suben en tiempo real a un espacio de almacenamiento en la nube, y luego se adapta un modelo matemático a partir de funciones de crecimiento poblacional y se combina con un modelo de desarrollo de especies de insectos, que permite realizar predicciones a distintos intervalos de tiempo con una precisión superior al 80%, mejorando la capacidad de decisión de los agroproductores y posibilitando la mejora de las acciones de gestión de la plaga (Campos et al., 2022).
- xvii. Hoy en día existe una gran variedad de métodos para abordar el importante problema de estimar el rendimiento de los cultivos a partir de los datos climáticos y de teledetección disponibles. Entre los diferentes enfoques, las técnicas de aprendizaje automático (ML) se están adoptando cada vez más, ya que permiten explotar toda la información sobre el progreso de los cultivos y las condiciones ambientales y sus relaciones con el rendimiento de los cultivos, logrando estimaciones fiables y precisas. Sin embargo, la interpretación de las relaciones aprendidas por los modelos de ML, y por tanto la obtención de

conocimientos sobre el problema, sigue siendo una tarea compleja y normalmente inexplorada. Para ello, se han desarrollado enfoques ML interpretables para la estimación del rendimiento de los cultivos que permiten investigar los impulsores agroecológicos más informativos y las regiones influyentes aprendidas por los modelos, llevando a cabo una serie de experimentos para aprender la selección de factores agroecológicos que conducen a las mejores estimaciones de los principales cultivos de Europa: maíz, cebada y trigo. Se incluyeron datos de índices de vegetación óptica a alta resolución (EVI), datos de satélites basados en microondas a resoluciones media (producto SM1) y gruesa (productos SM y VOD), así como datos atmosféricos (precipitación, temperatura superficial del suelo, radiación) del reanálisis climático ERA5-Land. Se evaluó el rendimiento de todas las posibles combinaciones de variables y se exploraron configuraciones de uno y varios años para los tres cultivos durante la ventana de tiempo 2015-2017, con el fin de determinar las variables más informativas para los modelos de ML de rendimiento agrícola. Los resultados revelaron las variables de entrada más relevantes para cada tipo de cultivo y demostraron que los enfoques de ML que fusionan datos ópticos, de microondas y climáticos proporcionan las mejores estimaciones de rendimiento de los cultivos, aumentando el coeficiente de determinación (R^2) al menos en un 10% y reduciendo el error cuadrático medio (RMSE) en 0.2 t/ha en comparación con las otras combinaciones (Mateo-Sanchis et al., 2021).

- xviii. Se están examinando las consecuencias humanas de los cambios climáticos pasados en la cuenca mediterránea, centrándose en un caso de estudio en Provenza (Francia), a través de la integración de dos herramientas: el modelado de agroecosistemas para estimar los rendimientos agrícolas potenciales y el análisis espacial de datos de patrones de asentamiento arqueológico. Se adapta un modelo de agroecosistema para simular la productividad agrícola potencial durante el Holoceno, utilizando datos paleoclimáticos de alta resolución generados a partir de una reconstrucción del clima mediterráneo. Estos rendimientos agrícolas potenciales se utilizan para analizar los patrones de asentamiento arqueológico y examinar la relación cambiante a lo largo del tiempo entre la productividad agrícola y la ubicación de los asentamientos. Después, se utiliza la productividad agrícola potencial como medida de las consecuencias humanas de los cambios climáticos, centrándose en las magnitudes relativas de los cambios impulsados por el clima en la productividad agrícola potencial y los aumentos potenciales en la productividad mediante la intensificación agrícola. Estos análisis permiten evaluar la vulnerabilidad y la resiliencia de los habitantes de Provenza durante el Holoceno frente al cambio climático (Contreras et al., 2018).

xix. Se llevó a cabo un análisis SIG para identificar tierras marginales salinas en la España peninsular que podrían ser irrigadas con aguas salinas para el cultivo de plantas energéticas tolerantes a la salinidad, específicamente el carrizo gigante (*Arundo donax* L.), y se evaluó el rendimiento agrónomicamente alcanzable para la producción de biomasa lignocelulósica. La metodología utilizada incluyó geodatabases relacionadas con las zonas salinas, condiciones agroclimáticas, requisitos de agua de riego, disponibilidad de tierras agrícolas, restricciones en cuanto a la conductividad eléctrica tolerada por el cultivo, competencia con cultivos agroalimentarios y disponibilidad de agua de riego. Este enfoque puede ser aplicado en otras regiones, y permite identificar tierras marginales donde se podrían cultivar especies vegetales tolerantes a la salinidad con fines bioenergéticos, evitando la competencia con cultivos agroalimentarios y resaltando la importancia de tomar medidas de restauración del suelo (Sánchez et al., 2017).

Conclusiones sobre Europa (Italia, Francia, Alemania y España)

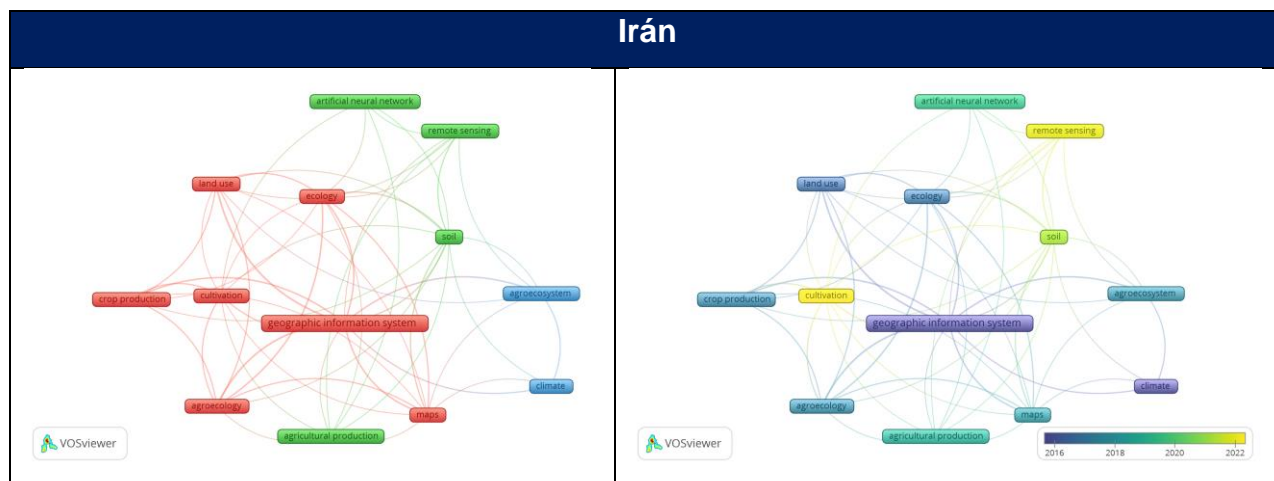
- Desarrollo de Colecciones Inteligentes (ICs) de recursos genéticos vegetales para cultivos de legumbres, basadas en líneas endogámicas purificadas genéticamente con información genotípica y fenotípica.
- Desarrollo de una biblioteca espectral global del suelo utilizando espectros en el infrarrojo visible-cercano (vis-NIR).
- Uso de un método de puntuación para evaluar la biodiversidad y establecer medidas de conservación de cultivos en paisajes mediterráneos modificados por humanos.
- Uso de un modelo basado en análisis de criterios múltiples y enfoques de sistemas de información geográfica para evaluar la disponibilidad de biomasa agroforestal, el potencial energético y las infraestructuras de transporte.
- Uso de modelos de simulación para comparar medidas de gestión curativas y medidas preventivas para reducir la contaminación sin aumentar aún más las emisiones de N₂O en la cuenca hidrográfica de Orgeval.
- Uso de métodos de clasificación automática supervisada para mapear los carrizos gigantes en los terraplenes de los cursos de agua apoyado por técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica.
- Desarrollo del proyecto IPHEN para producir mapas de análisis y previsión de las fases fenológicas de las plantas en Italia.
- Desarrollo del proyecto FOOTPRINT para caracterizar la diversidad de las condiciones agrícolas y ambientales en Europa en relación con el destino de

los plaguicidas, utilizando SIG para identificar las combinaciones únicas de clima, suelo y tipos de cultivos que caracterizan la agricultura europea.

- Desarrollo de un Sistema de Ayuda a la Decisión (SAD) que integre información de teledetección, datos espaciales y modelos de simulación para la estimación de la evapotranspiración, el estado hídrico de las plantas y los indicadores de sequía.
- Uso de la herramienta de simulación PYE-CA (Potential Yield Estimator for Conservation Agriculture) para llevar a cabo un experimento virtual que permita identificar las condiciones agroecológicas en las cuales el acolchado puede mitigar la variabilidad de las precipitaciones y el estrés hídrico.
- Desarrollo de un Sistema de Información Geográfica (SIG) rasterizado o basado en cuadrículas, que incorpora datos sobre la mosca tsetsé, la tripanosomiasis, la producción animal, la agricultura y el uso del suelo.
- Uso de modelos de aprendizaje automático para la predicción del rendimiento de los cultivos. Se emplean modelos de regresión lineal múltiple (MLR), redes neuronales artificiales (ANN) y bosques aleatorios (RF) que integran índices de sequía obtenidos a partir de imágenes de satélite y datos meteorológicos de reanálisis.
- Análisis SIG de las sinergias y compensaciones inducidas por los cambios en el uso y la cubierta del suelo para identificar los procesos de transformación y las permanencias relacionadas con la cobertura del suelo.
- Construcción de mapas de idoneidad climática y de suelos para árboles frutales inmunes/resistentes a la Xfp, y determinar los cultivos aptos a ser plantados dentro de las zonas olivareras infectadas por el Xfp en la región sur de Italia.
- Uso de un marco de modelización integrado que combina sistemas de información geográfica (SIG), una versión modificada del modelo RothC para simular los cambios en el carbono orgánico del suelo (SOC, soil organic carbon) y métodos de nivel 2 del IPCC para estimar las emisiones de GEI.
- Desarrollo de un marco de adquisición de datos y modelización para la predicción de la incidencia de las plagas del plátano, basado en sensores IoT.
- Desarrollo de enfoques ML que fusionen datos ópticos, de microondas y climáticos para la estimación del rendimiento de los cultivos de maíz, cebada y trigo en Europa.
- Integración de el modelado de agroecosistemas y el análisis espacial de datos de patrones de asentamiento arqueológico, que permiten evaluar la vulnerabilidad y la resiliencia de los habitantes frente al cambio climático.

- Análisis SIG para identificar tierras marginales en la España peninsular que podrían ser irrigadas con aguas salinas para el cultivo de plantas energéticas tolerantes a la salinidad con fines bioenergéticos.

Tabla 6. Procesos de gestión de información agroclimática en Irán



- Los impactos ambientales se evalúan mediante el método IMPACT2002+, considerando parámetros como daños a la salud humana, recursos, calidad de los ecosistemas y cambio climático. En este estudio, se emplean dos métodos de inteligencia artificial (IA): el sistema adaptativo de inferencia neuro-fuzzy-fuzzy c-means (ANFIS-FCM, adaptive neuro-fuzzy inference system–fuzzy c-means) y una red neuronal artificial (ANN, artificial neural network), para predecir los impactos ambientales de la producción de soja en diversos escenarios. Los resultados muestran la gama de impactos ambientales asociados a la producción de una tonelada de soja, incluyendo años de vida ajustados en función de la discapacidad (AVAD), energía primaria, fracción potencialmente desaparecida (FDP) \times m² \times año, emisiones de CO₂eq y daños mPt (milipuntos) al medio ambiente. Se determina que el algoritmo ANFIS-FCM es el modelo de predicción más preciso para los indicadores ambientales en comparación con el modelo ANN. En conclusión, se destaca que el modelo ANFIS-FCM propuesto es una técnica eficaz para predecir con precisión los parámetros medioambientales en el cultivo de soja (Mohammadi Kashka et al., 2023b).
- Utilizando un sistema de inferencia difusa y un sistema de información geográfica (SIG), se crean mapas de zonificación agroecológica para el cultivo de garbanzos de regadío y de secano en las provincias iraníes de Khorasan. Los mapas incorporan factores como el clima, el suelo y la topografía para determinar la idoneidad de distintas zonas para la producción de garbanzos. Los resultados destacan la importancia de factores como la precipitación, la pendiente y la capacidad del suelo para determinar la idoneidad. El estudio

identifica las tierras más aptas para el cultivo de garbanzos de secano y regadío, así como las zonas moderadamente aptas, marginalmente aptas o inadecuadas. Destaca la importancia de la zonificación climática y topográfica para determinar las zonas adecuadas para la producción de garbanzos en diferentes condiciones de riego (Nabati et al., 2023).

- iii. Los peligros asociados a las tormentas de arena y polvo (SDS, por sus siglas en inglés) tienen consecuencias significativas en la salud humana, la economía, el medio ambiente y los agroecosistemas. En el caso de Irán, estos fenómenos han ocasionado daños sustanciales en las zonas rurales, que dependen en gran medida de los agroecosistemas para su subsistencia. Por lo tanto, se ha llevado a cabo una evaluación de la vulnerabilidad con el objetivo de desarrollar planes de mitigación de riesgos asociados a las SDS. Esta evaluación se ha realizado mediante un enfoque integrado basado en un sistema de información geográfica (SIG), que ha permitido generar un mapa de la vulnerabilidad rural utilizando indicadores compuestos. Los resultados obtenidos revelan que aproximadamente el 37% de las zonas rurales de Irán presentan niveles altos y muy altos de vulnerabilidad ante las SDS. Estos resultados proporcionan una base sólida para el desarrollo de planes de reducción del riesgo de desastres relacionados con las SDS, al tiempo que permiten a las autoridades priorizar las políticas de mitigación de estos fenómenos a nivel provincial en Irán (Darvishi Boloorani et al., 2023).
- iv. Se ha utilizado aprendizaje automático y cartografía digital del suelo para predecir y mapear la salinidad del suelo en Irán central, con el objetivo de mejorar la productividad agrícola y aplicar programas eficaces de recuperación del suelo. En este estudio, se ha combinado la regresión de vectores de apoyo (SVR) con la transformación wavelet (W-SVR) y diversas covariables ambientales obtenidas de modelos digitales de elevación, datos de teledetección y datos climáticos. La incertidumbre de los algoritmos de aprendizaje automático se ha cuantificado mediante el método de estimación de incertidumbre basado en errores locales y agrupación (UNEEC). Los resultados han demostrado que el enfoque W-SVR ha obtenido mejores resultados en la predicción de la salinidad del suelo para todas las profundidades analizadas. Las covariables topográficas han resultado ser las más relevantes para las profundidades más bajas del suelo, mientras que las covariables de teledetección han desempeñado un papel fundamental en la predicción de la salinidad de la capa superficial del suelo. Por otro lado, los predictores climáticos han sido consistentemente importantes para todas las profundidades del suelo. El análisis de incertidumbre ha revelado que el intervalo de predicción estimado para SVR, mediante el método UNEEC, ha sido más amplio que el de W-SVR, lo cual confirma aún más la mayor eficacia

- de W-SVR. En resumen, este estudio proporciona información valiosa sobre la predicción y cartografía de la salinidad del suelo utilizando técnicas de aprendizaje automático, lo cual contribuye a mejorar la productividad agrícola y aplicar programas de recuperación del suelo en el centro de Irán (Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2021).
- v. Utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG) para la preparación de datos y un sistema de inferencia difusa (SIF) con una función de pertenencia, se realiza la zonificación agroecológica (AEZ) para identificar las tierras más adecuadas para diferentes actividades productivas en función de sus capacidades. Para ello, se emplea la combinación lineal ponderada (CLP) para asignar pesos a los parámetros relevantes, como factores climáticos (precipitaciones, temperatura, temperatura mínima absoluta y evapotranspiración), factores topográficos (pendiente, aspecto e hipsometría), factores edáficos (textura del suelo y erosión) y el uso del suelo (tipo y cubierta). Los resultados del estudio muestran que una parte significativa de la zona estudiada se considera inadecuada o marginal para el cultivo del garbanzo, mientras que solo un pequeño porcentaje se identifica como óptimo. La utilización del SIG y del SIF ha mejorado la precisión de los datos espaciales, permitiendo un análisis más productivo y facilitando el acceso a la información. Estos hallazgos resultan de gran relevancia para la planificación agrícola y la toma de decisiones en el sector (Nabati et al., 2020).
- vi. Uso de dos modelos diferentes de redes neuronales artificiales (ANN) y la técnica de programación de la expresión génica (GEP) para estimar la temperatura diaria del punto de rocío utilizando datos meteorológicos registrados. Se utilizan datos meteorológicos de 8 años que incluyen registros diarios de temperatura del aire, velocidad del viento, humedad relativa, presión atmosférica, radiación solar entrante y temperatura del punto de rocío de dos estaciones meteorológicas ubicadas en Seúl e Incheon, en la República de Corea. La comparación de los resultados demuestra que el modelo GEP supera a la ANN en la precisión de la estimación de los valores diarios de la temperatura del punto de rocío (Shiri et al., 2014).
- vii. En la llanura de Mashhad, ubicada en la provincia de Khorasan Razavi en Irán, se realizó una evaluación cualitativa para determinar la idoneidad de las tierras para los cultivos locales más importantes, como el trigo (*Triticum aestivum*), la remolacha azucarera (*Beta vulgaris*) y el maíz (*Zea mays*). Este análisis se llevó a cabo utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG), consideraron variables climáticas, como las temperaturas diarias máximas, óptimas y mínimas, obtenidas a partir de un conjunto de datos agrometeorológicos recopilados durante 30 años y provenientes de 12 estaciones sinópticas. Como resultado, se estructuró un modelo digital de elevación de la llanura de

Mashhad, utilizando dos fuentes de datos: imágenes de satélite IRS III con una resolución de 23,5 m y mapas topográficos a una escala de 1:25000. Con el software Arc GIS 9.2 se generaron capas de información sobre el aspecto y la pendiente del terreno. El estudio identificó la elevación, la pendiente y los grados días de desarrollo (growing degree days, GDD) más adecuados para lograr un crecimiento óptimo de los cultivos (Neamatollahi et al., 2012b).

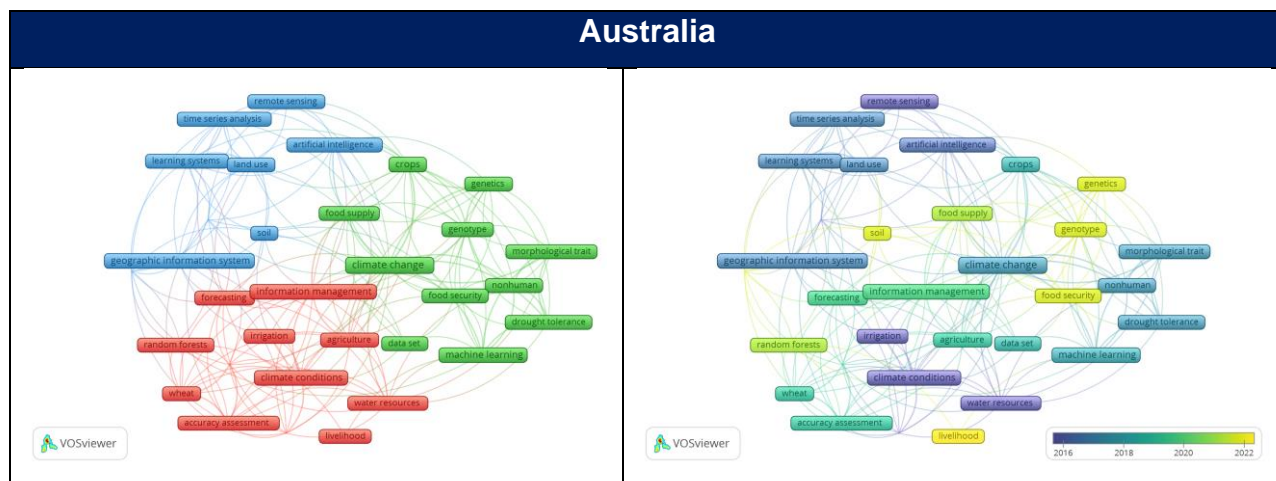
- viii. Con el fin de zonificar y evaluar el rendimiento potencial del azafrán a nivel de agroecosistema en la provincia de Khorasan, Irán, se realizó un estudio durante los años 2001 y 2002, en cuatro localidades seleccionadas incluyendo Birjand, Qaen, Gonabad y Torbat-Haydarieh, que son las principales zonas productoras de azafrán en Irán. Los datos obtenidos se analizaron estadísticamente y se elaboraron mapas de distribución mediante el procedimiento SIG. Los resultados mostraron que la edad de las explotaciones de azafrán era el factor más importante que influía en el rendimiento, contribuyendo en exceso en todas las regresiones ajustadas para el rendimiento en cada localidad (Behdani et al., 2008).

Conclusiones sobre Irán:

- Uso de dos métodos de inteligencia artificial, ANFIS-FCM y ANN, para predecir los impactos ambientales de la producción de soja.
- Se crean mapas de zonificación agroecológica para el cultivo de garbanzos en Irán, utilizando un sistema de inferencia difusa y un sistema de información geográfica.
- Creación de un mapa de vulnerabilidad utilizando un enfoque integrado basado en un SIG para realizar el desarrollo de planes de reducción del riesgo de desastres relacionados con las tormentas de arena y polvo.
- Se utiliza el aprendizaje automático y la cartografía digital del suelo para predecir y mapear la salinidad del suelo en Irán central.
- Se emplea un SIG y un sistema de inferencia difusa para realizar la zonificación agroecológica.
- Se utilizan redes neuronales artificiales y la técnica de programación de la expresión génica para estimar la temperatura diaria del punto de rocío utilizando datos meteorológicos registrados.
- Se realiza una evaluación cualitativa de la idoneidad de las tierras para los cultivos locales más importantes en la llanura de Mashhad, Irán, utilizando un sistema de información geográfica y variables climáticas.

- Se estudia el rendimiento potencial del azafrán en la provincia de Khorasan, Irán, mediante análisis estadístico y elaboración de mapas de distribución utilizando un SIG.

Tabla 7. Procesos de gestión de información agroclimática en Australia



- i. Los sistemas de cultivo de arroz del sur de Asia, situados principalmente en la India, que actualmente cubren 22,3 millones de hectáreas y proporcionan seguridad económica y alimentaria a unos 11 millones de personas, sólo alcanzan el 50% de su potencial de rendimiento debido a estrategias subóptimas de gestión del agua y nutrientes. Por lo que, para hacer frente a estos desafíos, se sugiere la adopción de nuevas tecnologías como la teledetección por satélite, las encuestas basadas en drones, los sistemas móviles de recopilación de datos, los sensores basados en IoT y el uso de inteligencia artificial y modelos de aprendizaje automático (SARKAR et al., 2023).
- ii. La previsión precisa de las precipitaciones desempeña un papel crucial en la detección temprana de la vulnerabilidad a la erosión del suelo, lo que permite tomar las medidas adecuadas para minimizar los daños causados por tormentas, sequías e inundaciones severas. Para lograr esto, se utiliza un enfoque de aprendizaje profundo, específicamente el modelo de red neuronal de memoria a corto plazo (LSTM), junto con el modelo de Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelo (RUSLE), para predecir la probabilidad de erosión del suelo (Senanayake et al., 2022).
- iii. Los fitomejoradores han enfrentado el desafío de mejorar el rendimiento, la nutrición y la resistencia a enfermedades de los cultivos para satisfacer las necesidades de una población mundial en crecimiento y adaptarse a un entorno global cambiante. Aunque se han logrado avances significativos en la investigación genómica y la selección de rasgos en cultivos importantes como

el arroz, el trigo, el maíz y la soja, las especies de cultivos infrautilizados han sido descuidadas en términos de recursos genómicos y caracterización de rasgos. Por lo tanto, se propone el desarrollo de recursos pangenómicos para estas especies, los cuales capturan la variación genética de toda la especie en lugar de un solo individuo. Estos recursos pangenómicos han surgido como una solución para reducir el sesgo de referencia en el análisis genómico y mejorar la predicción de rasgos agrónomicamente importantes. Además, se exploran las posibilidades de utilizar datos previamente recopilados para mejorar el análisis funcional del pangenoma en estudios de asociación de todo el genoma (GWAS) basados en investigaciones realizadas en los cultivos más importantes (Fernandez et al., 2022).

- iv. Se lleva a cabo una evaluación comparativa de tres estrategias de gestión de nutrientes para los principales cereales de las llanuras indogangéticas orientales (EIGP) del sur de Asia. El objetivo era evaluar la productividad, la rentabilidad y la eficiencia en el uso de nutrientes (NUE) de las estrategias y estimar los rendimientos potenciales y las diferencias de rendimiento. En el estudio se analizaron datos de 600 ensayos realizados en explotaciones agrícolas utilizando la herramienta Nutrient Expert® (NE), el modelo de simulación de sistemas de cultivo APSIM y métodos de aprendizaje automático. Los resultados mostraron que las recomendaciones basadas en NE superaban las prácticas de los agricultores y las recomendaciones gubernamentales, lo que se traducía en un aumento de los rendimientos, los beneficios y la mejora de la NUE. Los modelos utilizados también identificaron factores influyentes en el rendimiento del grano en cada estrategia de gestión de nutrientes (Timsina et al., 2021).
- v. La cartografía de cultivos y el análisis de series temporales mediante técnicas de teledetección son fundamentales para monitorear el uso de la tierra, las prácticas de gestión del suelo y analizar los impactos agroambientales y el cambio climático. Actualmente, se están desarrollando técnicas robustas de teledetección para mapear el historial de cultivos en Queensland, Australia, utilizando datos multitemporales de Landsat. Se compara la clasificación tradicional basada en píxeles con la clasificación basada en objetos de imagen utilizando algoritmos avanzados de aprendizaje automático supervisado, como la máquina de vectores de soporte (SVM). Los métodos basados en objetos, que analizan conjuntos agregados de píxeles y consideran características relacionadas con la forma, texturales y espectrales, superaron a los métodos basados en píxeles en la clasificación de cuatro clases principales de uso/cobertura del suelo. El modelo SVM basado en objetos logró una mayor precisión de clasificación global (95%) en comparación con la clasificación tradicional basada en píxeles (89%) utilizando el clasificador de máxima

- verosimilitud (MLC), y también generó imágenes sin motas. Además, se utilizaron los modelos SVM basados en objetos para clasificar diferentes tipos de cultivos de latifoliadas en las estaciones de verano e invierno. El estudio identificó que los cambios temporales en las características espectrales, especialmente a través de los índices de vegetación derivados de los datos Landsat multitemporales, eran cruciales para lograr una precisión de clasificación adecuada (Devadas et al., 2012).
- vi. Se utilizan técnicas de análisis espacial en un estudio para generar mapas de zonificación climática detallados de la zona de regadío de East Murrumbidgee (MIA), en Australia. El estudio analiza la variación climática regional y desarrolla modelos de regionalización cuantitativos y multivariantes para delinear zonas climáticas a múltiples niveles basadas en factores térmicos y de humedad utilizando datos climáticos a largo plazo. Para esto, se utilizan modelos de análisis espacial basados en SIG para cartografiar las subregiones climáticas y presenta dos esquemas de zonificación climática. El estudio subrayó la importancia de la regionalización climática para la gestión de recursos, la regionalización agroclimática y la evaluación del desarrollo regional. Los métodos manuales tradicionales de delineación regional se consideraron lentos y subjetivos, lo que puso de relieve la necesidad de enfoques automatizados y eficientes como los SIG y los métodos estadísticos (Zhou et al., 2009).
- vii. Los cambios agroecológicos del paisaje en la cuenca de Punatsang Chhu, en Bután, se evaluaron mediante técnicas de SIG y teledetección. El estudio analizó imágenes de satélite con menos del 10% de nubosidad de los lugares de estudio obtenidas del sitio web del sistema de observación de los recursos terrestres del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) de los últimos 20 años. El preprocesamiento y el análisis de las imágenes de satélite se realizaron con el software de teledetección ENVI (versión 5.4.1) y también se utilizó ArcGIS (ArcMap 10.4) para mejorar las funciones cartográficas. La clasificación de imágenes se realizó mediante un método supervisado, que utilizó principios de máxima verosimilitud para la agrupación por algoritmos de clases de píxeles de los lugares de formación. Estas imágenes clasificadas se sometieron a una evaluación de precisión, para obtener estadísticas kappa (coeficiente kappa o $KHAT \hat{k}$), que indican la probabilidad de que un píxel de referencia se clasifique correctamente y es también una medida del error de omisión (Cohen et al., 2016; Congalton et al., 1983). Los resultados muestran que la superficie nevada y glaciaria disminuyó un 51%, mientras que la superficie cubierta por afloramientos rocosos y tierra desnuda casi se duplicó. Estos cambios se atribuyeron a los efectos del cambio climático, evidenciados por el aumento de las temperaturas máximas y mínimas y una tendencia a la baja de las precipitaciones medias estacionales. La investigación subraya la

importancia de comprender los cambios en la cubierta terrestre provocados por el cambio climático y las actividades humanas para fundamentar las intervenciones políticas y la gestión de los recursos naturales (Chhogyel et al., 2020).

- viii. El uso de imágenes Landsat multitemporales permitió evaluar los cambios en las categorías de la cubierta terrestre y cuantificar la dinámica espaciotemporal del cambio de uso y cobertura del suelo entre 1995 y 2014. Para ello, se aplicaron técnicas de clasificación basadas en píxeles y en objetos. En primer lugar, se agruparon las imágenes en clústeres naturales según sus propiedades espectrales, y luego se generaron mapas de clasificación no supervisada de la cobertura del suelo utilizando el algoritmo de agrupación ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis). Según los resultados, se observaron cambios en la cubierta terrestre en todas las zonas agroclimáticas, tipos de suelo y clases de pendiente, siendo la conversión de tierras de pastoreo en plantaciones de árboles y el desarrollo de zonas de veda cambios significativos durante el periodo de estudio. Este estudio resalta la importancia de monitorear los cambios en el uso del suelo para lograr una gestión y planificación eficaces de la tierra (Ayele et al., 2018).
- ix. Uso de modelos copula-estadísticos para investigar el comportamiento conjunto de la precipitación estacional influida por múltiples índices climáticos. Se emplean modelos de cópula bivariantes y trivariantes para predecir la precipitación primaveral, considerando influencias de predictor único (ENSO) y doble (ENSO & TPI), respectivamente. Los resultados tienen importantes implicaciones para la gestión de los recursos hídricos y la salud de los cultivos en el cinturón de trigo de Australia, ayudando a adaptar e implementar soluciones agrícolas para hacer frente a los desafíos climáticos (Nguyen-Huy et al., 2017).
- x. Los suelos desempeñan un papel crucial en el almacenamiento de carbono, y las variables climáticas, en particular la precipitación y la temperatura, son factores importantes que influyen en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo (SOC, soil organic carbon). Sin embargo, no hay consenso sobre cómo afectan los cambios en las variables climáticas al SOC. Utilizando la teoría de la cópula, el estudio examina la dinámica del carbono del suelo y la probabilidad de que se produzca SOC en distintas condiciones climáticas en las 14 zonas agroclimáticas de la India. Estos resultados ayudan a identificar las zonas agroclimáticas más sensibles de la India para la gestión del carbono del suelo y las políticas relacionadas con el clima. El estudio destaca la importancia de incorporar big data para desarrollar prácticas de gestión específicas para cada lugar que promuevan la salud del suelo, aumenten la

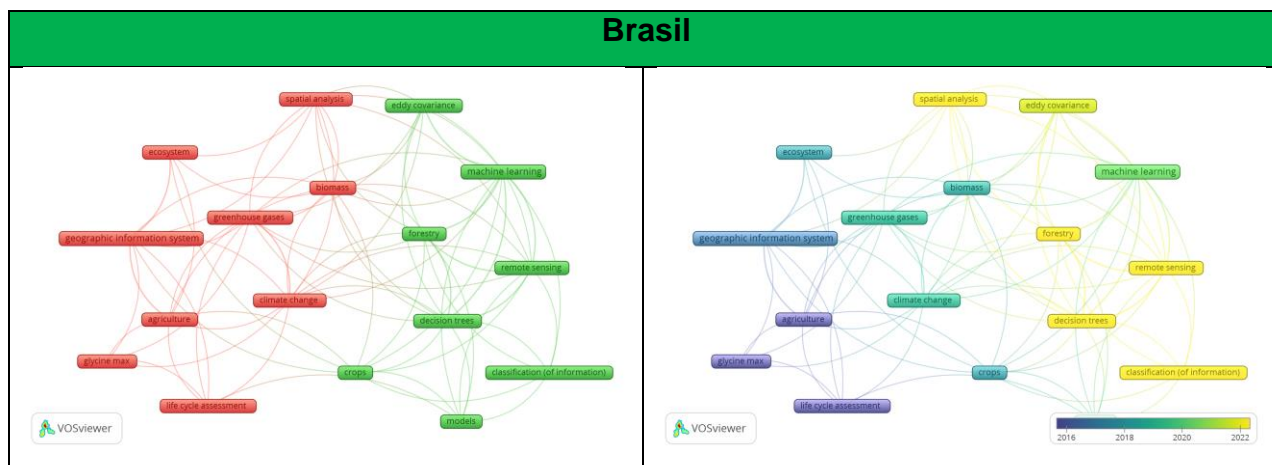
- capacidad de resiliencia del suelo del país para la seguridad alimentaria y mejoren la gestión medioambiental (Hinge et al., 2021).
- xi. Los enfoques de aprendizaje automático, concretamente Support Vector Machine (SVM) y Random Forest (RF), superan al modelo fenomenológico tradicional tipo Jarvis en la predicción de la conductancia estomática (gs) en el trigo. Los modelos de aprendizaje automático demostraron una mayor precisión en la predicción de gs al considerar diversas variables fenológicas y ambientales como la edad de la hoja, la concentración atmosférica de CO₂, la radiación fotosintéticamente activa, el déficit de presión de vapor, la temperatura, la hora del día y la disponibilidad de agua en el suelo. Sin embargo, hay que señalar que los modelos de aprendizaje automático requieren un gran conjunto de datos para el entrenamiento y pueden no proporcionar los mismos conocimientos fisiológicos que el modelo tradicional, que permite hipótesis estadísticamente comprobables. Aunque los modelos de aprendizaje automático son prometedores en cuanto a la precisión de las predicciones, su capacidad para extrapolar más allá de los rangos de datos observados requiere una evaluación más exhaustiva antes de considerarlos sustitutos de los modelos físicos (Houshmandfar et al., 2021).
- xii. Aunque los sistemas de riego automatizados ahorran tiempo a los agricultores al controlar a distancia bombas y válvulas, carecen de información sobre la cantidad y el momento de riego necesarios para los cultivos y sobre cómo deben adaptarse los programas de riego a factores como el tipo de suelo, la gestión de la explotación y el clima. Para solucionar este problema, es necesaria una herramienta de apoyo a la toma de decisiones en materia de riego. Sin embargo, la complejidad y la lentitud del uso diario de tales herramientas suelen disuadir a los agricultores de adoptarlas, lo que se traduce en una eficiencia de riego subóptima. Ante esto, se desarrolló una solución cibernética de circuito cerrado aplicada en una explotación de caña de azúcar del noreste de Australia. La solución integra un sistema de riego automatizado (WiSA) con una herramienta de apoyo a la toma de decisiones de riego (IrrigWeb). El programa Uplink carga los datos de riego y pluviometría directamente en la herramienta de apoyo a la toma de decisiones, lo que ahorra tiempo al agricultor en la introducción manual de datos. El programa Downlink calcula y aplica automáticamente los programas de riego teniendo en cuenta restricciones prácticas como la energía, la capacidad de bombeo, las prioridades de riego y las preferencias del agricultor. Los resultados de la simulación demuestran que la solución de bucle cerrado gestiona eficazmente la programación del riego combinando herramientas de apoyo a la toma de decisiones con consideraciones prácticas. La implantación de sistemas eficientes en el uso del agua puede reportar beneficios prácticos, rentables y

medioambientales a los sistemas agrícolas de regadío de todo el mundo (Wang et al., 2020).

Conclusiones sobre Australia:

- Adopción de nuevas tecnologías como la teledetección por satélite, drones, sensores IoT, inteligencia artificial y modelos de aprendizaje automático para abordar desafíos de los sistemas de cultivo de arroz del sur de Asia.
- Se utiliza un enfoque de aprendizaje profundo y el modelo de Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelo (RUSLE) para predecir la probabilidad de erosión del suelo.
- Se propone el desarrollo de recursos pangenómicos para especies de cultivos infrautilizados. Estos recursos capturan la variación genética de toda la especie y mejoran la predicción de rasgos agronómicos importantes.
- Se realizan recomendaciones basadas en la herramienta Nutrient Expert® (NE) mejorando los rendimientos y la eficiencia en el uso de nutrientes.
- La teledetección y el análisis de series temporales son fundamentales para monitorear el uso de la tierra y analizar los impactos agroambientales y el cambio climático.
- Se utilizan técnicas avanzadas de clasificación basada en objetos y algoritmos de aprendizaje automático supervisado para mapear y clasificar el uso/cobertura del suelo.
- Se utilizan técnicas de análisis espacial y SIG para generar mapas de zonificación climática en diferentes regiones agrícolas.
- La teledetección y los SIG se utilizan para evaluar los cambios en la cubierta terrestre y la dinámica espaciotemporal del cambio de uso y cobertura del suelo.
- Se aplican técnicas de clasificación basadas en píxeles y en objetos para monitorear y planificar eficientemente el uso del suelo.
- Se emplean modelos de cópula estadística para predecir la precipitación estacional influida por múltiples índices climáticos.
- Se utiliza la teoría de la cópula para examinar la dinámica del carbono del suelo y la probabilidad de que se produzca almacenamiento de carbono en diferentes condiciones climáticas.
- Se realiza la predicción de la conductancia estomática (gs) en el trigo a partir de los enfoques de aprendizaje automático como Support Vector Machine (SVM) y Random Forest (RF).

Tabla 8. Procesos de gestión de información agroclimática en Brasil



- i. La pérdida episódica de suelo en las operaciones agrícolas, agravada por las condiciones climáticas extremas, constituye una de las mayores amenazas para mantener agroecosistemas sostenibles. La Ecuación Revisada Universal de Pérdida de Suelo (RUSLE, por sus siglas en inglés) es un modelo que combina los efectos de la lluvia, la erodabilidad del suelo, la topografía, la cobertura vegetal y las prácticas de conservación para estimar las pérdidas anuales promedio de suelo. Actualmente, se ha cuantificado la erosión hídrica del suelo en América del Sur a través de RUSLE utilizando conjuntos de datos disponibles y caracterizando la tasa de entrega promedio de sedimentos a las principales cuencas de América del Sur. El análisis de RUSLE presentó un rendimiento satisfactorio en comparación con otras aplicaciones a escala continental, con una pérdida promedio estimada de suelo para América del Sur de 3.8 t/ha/año. Chile (>20.0 t/ha/año) y Colombia (8.1 t/ha/año) mostraron las mayores pérdidas de suelo. En cuanto a la tasa de entrega de sedimentos, Surinam, Guyana Francesa y Guyana presentaron los valores más bajos (<1.0 t/ha/año) (Riquetti et al., 2022).
- ii. Las estimaciones de evapotranspiración de referencia (ET_o) son fundamentales para una gestión eficaz de los recursos hídricos, ya que brindan una evaluación de la pérdida potencial de agua atmosférica. Aunque el método Penman-Monteith (FAO-PM) es ampliamente recomendado por la FAO debido a su consistencia, requiere una gran cantidad de datos. Por esta razón, se han estudiado varios métodos empíricos de ET_o con menos entradas y enfoques de aprendizaje automático. En el alcance del estudio realizado, estos métodos son clasificados con base en la transferencia de masa, en la radiación, en la temperatura o combinados, junto con 4 ecuaciones generadas por algoritmo genético (GA, genetic algorithm). Los métodos basados en la radiación, en particular los métodos De Bruin-Keijman y Priestley-Taylor, demostraron una mayor precisión y obtuvieron los mejores resultados y son opciones fiables

entre todos los modelos evaluados. Por otra parte, los modelos basados en la transferencia de masa y en la temperatura mostraron errores más elevados y una correlación más baja en comparación con los demás métodos ETo, lo que los hace inadecuados para el contexto dado. Entre los métodos combinados, el método Copais ocupó el quinto lugar en términos de rendimiento entre todas las ecuaciones empíricas probadas. A partir de los resultados, se generaron ecuaciones alternativas de GA, las cuales tienen el potencial de proporcionar estimaciones de ETo similares al método FAO-PM al tiempo que requieren menos entradas. Por lo tanto, las inversiones en investigación de la radiación e instrumentación de medición pueden ser útiles para estimar la ETo con modelos simplificados con menos entradas que el método Penman-Monteith (Valle Júnior et al., 2020).

- iii. Se realizó un estudio para mapear sistemas integrados de cultivo-ganadería (iCL, integrated Crop-Livestock systems) a escala regional utilizando datos de teledetección en seis regiones agroclimáticas de Mato Grosso, el mayor estado productor de soja de Brasil. Se utilizaron imágenes de series temporales del satélite MODIS de 2012 a 2019 junto con datos terrestres y un clasificador Random Forest. El objetivo final es aplicar este enfoque a todo el corredor brasileño de la soja, creando una herramienta operativa para supervisar la adopción de prácticas de intensificación sostenibles esbozadas en el Plan de Agricultura Baja en Carbono de Brasil (ABC PLAN) (Kuchler et al., 2022).
- iv. Se ha estudiado la influencia climática en los minerales de la pupunha (*Bactris gasipaes* Kunth) y se ha evaluado un método rápido para determinar los contenidos de Mg, Cl, K y S en la porción basal del palmito de pupunha utilizando un modelo predictivo multivariado basado en datos agrometeorológicos. Se utilizó el análisis de componentes principales (PCA) para seleccionar las componentes principales y se modelaron los datos utilizando el método de regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS). Los bajos errores relativos medios de predicción (4,60%) confirman la buena capacidad de predicción de los modelos. Los factores que más influyeron en el modelo de predicción de minerales fueron la precipitación pluvial y la radiación solar. Los resultados muestran que el modelo predictivo puede utilizarse como un método rápido para determinar el contenido mineral en la industria del palmito de pupunha, lo que puede ayudar en la selección de regiones geográficas adecuadas para el establecimiento de áreas de cultivo de pupunha. Los modelos pueden proporcionar reducciones de costos y tiempo de análisis para la industria del palmito sin generar efluentes de laboratorio (Bellettini et al., 2019).
- v. Se desarrolló una metodología basada en una evaluación integrada que incorpora análisis estadísticos, sistemas de información geográfica (GIS) y

enfoques de evaluación del ciclo de vida para cuantificar el potencial de generación de electricidad a partir de la combustión directa de residuos agrícolas y agroindustriales en plantas de energía centralizadas en Brasil, con un enfoque en la sostenibilidad ambiental y la viabilidad económica, evaluando además los ahorros de energía y el potencial de reducción de gases de efecto invernadero al reemplazar la electricidad basada en gas natural por bioenergía. Los resultados revelan que la diferencia entre los potenciales técnico y económico indica que las limitaciones para la bioenergía no están relacionadas con la falta de recursos, sino más bien con barreras económicas, logísticas, regulatorias y políticas (Portugal-Pereira et al., 2015).

- vi. Se han caracterizado las condiciones climáticas adecuadas para desarrollar una zonificación agroclimática para el cultivo de jatrofa en regiones seleccionadas de Brasil, mediante el análisis de datos climáticos de estaciones meteorológicas de México y Guatemala, enfocándose en la temperatura, la deficiencia hídrica anual y el excedente hídrico. Los resultados son mapas de idoneidad basados en las condiciones climáticas, que revelan que sólo un pequeño porcentaje de la región Nordeste es apto para el cultivo de jatrofa en seco, mientras que la mayoría de las zonas de los estados de Goiás y Tocantins, así como una parte de Minas Gerais, son aptas para el cultivo. Estos resultados ponen de relieve la importancia de tener en cuenta las condiciones climáticas mínimas para el cultivo sostenible de jatrofa y la obtención de altos rendimientos, teniendo en cuenta que la jatrofa es un cultivo relativamente nuevo en el país, y faltan estudios sobre su idoneidad para diferentes regiones, a pesar de su potencial para zonas marginales con suelos pobres y climas secos (Yamada & Sentelhas, 2014).
- vii. En Brasil, Minas Gerais es el sexto estado en producción de soja. Sin embargo, las condiciones climáticas adversas como mini-sequías cortas, distribución irregular de las lluvias y especialmente altas temperaturas pueden comprometer el buen desarrollo del cultivo en ese estado, especialmente en relación con la producción de semillas de alta calidad. Por ello, se han recolectado y analizado datos para establecer una zonificación agroclimática del estado de Minas Gerais para la producción de semillas de soja de alta calidad. Estos valores fueron georreferenciados en términos de las coordenadas de latitud y longitud y, con el uso de un sistema de información geográfica, se creó un mapa temático en el que están representadas las mejores regiones de cultivo. La definición de zonas de mayor o menor riesgo climático se asoció a la ocurrencia de temperaturas medias durante la fase de maduración de las semillas, la etapa más sensible del crecimiento (De Pádua et al., 2014).

Conclusiones sobre Brasil:

- Uso de Ecuación Revisada Universal de Pérdida de Suelo (RUSLE, por sus siglas en inglés) que combina los efectos de la lluvia, la erodabilidad del suelo, la topografía, la cobertura vegetal y las prácticas de conservación para estimar las pérdidas anuales promedio de suelo.
- Uso de métodos empíricos con menos entradas y enfoques de aprendizaje automático para la estimación de evapotranspiración de referencia (ET_o).
- Mapeo de sistemas integrados de cultivo-ganadería a escala regional utilizando datos de teledetección en seis regiones agroclimáticas de Mato Grosso, el mayor estado productor de soja de Brasil.
- Estudio de la influencia climática en los minerales de la pupunha utilizando un modelo predictivo multivariado basado en datos agrometeorológicos.
- Desarrollo de una metodología que incorpora análisis estadísticos, sistemas de información geográfica (GIS) y enfoques de evaluación del ciclo de vida para cuantificar el potencial de generación de electricidad a partir de residuos agrícolas y agroindustriales.
- Desarrollo de mapas de idoneidad basados en las condiciones climáticas para identificar zonas aptas para el cultivo de jatrofa.
- Mapa temático en el que están definidas las mejores regiones de cultivo para la producción de semillas de soja de alta calidad con el uso de un sistema de información geográfica.

Conclusiones

Las conclusiones derivadas de los proyectos de información agroclimática en diferentes países destacan la creciente integración de tecnologías avanzadas en la agricultura para enfrentar desafíos climáticos y mejorar la eficiencia en la producción agrícola. A nivel mundial, países como India, China, Estados Unidos y Brasil están implementando sistemas que combinan datos satelitales, sensores remotos y modelos de simulación para monitorear y predecir condiciones climáticas y agrícolas. Esta tendencia subraya la importancia de la tecnología en la modernización de la agricultura.

En Europa, países como Francia, Alemania e Italia están desarrollando plataformas digitales y redes de estaciones meteorológicas agrícolas para recopilar y analizar datos climáticos. Estas herramientas permiten a los agricultores tomar decisiones informadas sobre la gestión de cultivos y el riego, mejorando así la productividad y la sostenibilidad de sus prácticas agrícolas.

Países como España, Australia e Irán están enfocándose en la gestión de riesgos climáticos como sequías, inundaciones y salinidad del suelo. El uso de modelos de pronóstico, sistemas de alerta temprana y la zonificación agroecológica ayuda a mitigar los efectos adversos del cambio climático y optimiza la gestión del agua y otros recursos, lo que es crucial para enfrentar estos desafíos.

En países como Brasil, la investigación se centra en abordar los desafíos específicos de las diferentes regiones agroclimáticas, lo que destaca la necesidad de soluciones adaptadas a las particularidades locales. En conjunto, estos esfuerzos reflejan un movimiento global hacia una agricultura más precisa, resiliente y sostenible, apoyada en la tecnología y la ciencia de datos para enfrentar los desafíos climáticos actuales y futuros.

En resumen, a continuación se detalla la conclusión de los documentos analizados sobre procesos de gestión de información agroclimática en cada uno de los siguientes países:

- India: En India, se están implementando proyectos para el desarrollo de sistemas de información agroclimática que brinden pronósticos meteorológicos y asesoramiento a los agricultores. También se están utilizando sensores remotos y datos satelitales para monitorear y predecir las condiciones climáticas y agrícolas.
- China: China está trabajando en el desarrollo de sistemas de monitoreo agroclimático que integran datos meteorológicos, de suelo y de cultivos para crear mapas que proporcionan información en tiempo real para la toma de decisiones en la gestión agrícola, incluyendo la elección de cultivos y el riego.
- Estados Unidos: En Estados Unidos, se están llevando a cabo proyectos de investigación y desarrollo de herramientas y modelos de información agroclimática. Se utilizan datos de satélites, estaciones meteorológicas y sensores en campo para generar pronósticos y asesoramiento basado en datos climáticos para los agricultores. Especialmente, el uso de tecnología IoT para automatizar la monitorización de los cultivos en tiempo real.
- Italia: En Italia, se están realizando esfuerzos para la integración de datos agroclimáticos con modelos de simulación y pronóstico. Por ejemplo, el proyecto

IPHEN para producir mapas de análisis y previsión de las fases fenológicas de las plantas en Italia.

- Francia: Francia ha implementado una red de estaciones meteorológicas agrícolas para recopilar datos climáticos y monitorear las condiciones agroclimáticas en todo el país. Estos datos se utilizan para la planificación de cultivos y la gestión del riesgo agrícola.
- Alemania: En Alemania, se están desarrollando plataformas digitales para la gestión de información agroclimática, que incluyen datos sobre el clima, el suelo y los cultivos. Estas plataformas brindan herramientas de análisis y asesoramiento para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad en la agricultura.
- España: En España, se están llevando a cabo proyectos de investigación y desarrollo en el ámbito de la información agroclimática, con énfasis en la gestión del riego y la adaptación al cambio climático. Se utilizan modelos de simulación y sensores para optimizar el uso del agua y mejorar la productividad agrícola.
- Australia: Australia está adoptando tecnologías de información agroclimática para monitorear y gestionar los riesgos climáticos en la agricultura, como sequías e inundaciones a través de mapas de zonificación climática. Se están desarrollando modelos de pronóstico y sistemas de alerta temprana para ayudar a los agricultores a tomar medidas preventivas frente a precipitaciones, dinámica del carbono en el suelo y probabilidades de erosión.
- Irán: En Irán, se utiliza el aprendizaje automático y la cartografía digital del suelo para predecir y mapear la salinidad, y se usan los mapas basados en SIG para realizar la zonificación agroecológica y también el desarrollo de planes de reducción del riesgo relacionados con las tormentas de arena y polvo.
- Brasil: En Brasil, se están llevando a cabo investigaciones y proyectos para el desarrollo de sistemas de información agroclimática que abordan desafíos específicos del país, como la agricultura en seis regiones agroclimáticas de Mato Grosso y la gestión del agua en la región amazónica. Se utilizan modelos y datos satelitales para brindar información precisa a los agricultores.

Bibliografía

- Adnan, R. M., Liang, Z., Kuriqi, A., Kisi, O., Malik, A., Li, B., & Mortazavizadeh, F. (2021). Air temperature prediction using different machine learning models. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 22(1), 534–541. <https://doi.org/10.11591/IJEECS.V22.I1.PP534-541>
- Alhadj Ali, S., Vivaldi, G. A., Garofalo, S. Pietro, Costanza, L., & Camposeo, S. (2023). Land Suitability Analysis of Six Fruit Tree Species Immune/Resistant to *Xylella fastidiosa* as Alternative Crops in Infected Olive-Growing Areas. *Agronomy* 2023, Vol. 13, Page 547, 13(2), 547. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY13020547>
- Ayele, G. T., Tebeje, A. K., Demissie, S. S., Belete, M. A., Jemberrie, M. A., Teshome, W. M., Mengistu, D. T., & Teshale, E. Z. (2018). Time series land cover mapping and change detection analysis using geographic information system and remote sensing, Northern Ethiopia. *Air, Soil and Water Research*, 11. https://doi.org/10.1177/1178622117751603/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_1178622117751603-FIG12.JPEG
- Bal, S. K., Pramod, V. P., Sandeep, V. M., Manikandan, N., Sarath Chandran, M. A., Subba Rao, A. V. M., Vijaya Kumar, P., Vanaja, M., & Singh, V. K. (2023). Identifying appropriate prediction models for estimating hourly temperature over diverse agro-ecological regions of India. *Scientific Reports* 2023 13:1, 13(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34194-9>
- Bapatla, A. K., Mohanty, S. P., & Kougianos, E. (2022). sFarm: A Distributed Ledger Based Remote Crop Monitoring System for Smart Farming. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 641 IFIP, 13–31. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96466-5_2/COVER
- Behdani, M. A., Koocheki, A., Rezvani, P., & AL-Ahmadi, M. J. (2008). Agro-ecological zoning and potential yield of saffron in Khorasan-Iran. *Journal of Biological Sciences*, 8(2), 298–305. <https://doi.org/10.3923/JBS.2008.298.305>
- Bellettini, M. B., Bach, F., Fabela Morón, M. F., & Bepalhok Filho, J. C. (2019). Modelo predictivo multivariado do conteúdo mineral na porção basal de pupunha utilizando

- datos agrometeorológicos. *Semina: Ciências Agrárias*, 40(6Supl3), 3383–3398. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n6Supl3p3383>
- Bellucci, E., Mario Aguilar, O., Alseekh, S., Bett, K., Brezeanu, C., Cook, D., De la Rosa, L., Delledonne, M., Dostatny, D. F., Ferreira, J. J., Geffroy, V., Ghitarrini, S., Kroc, M., Kumar Agrawal, S., Logozzo, G., Marino, M., Mary-Huard, T., McClean, P., Meglič, V., ... Papa, R. (2021). The INCREASE project: Intelligent Collections of food-legume genetic resources for European agrofood systems. *The Plant Journal*, 108(3), 646–660. <https://doi.org/10.1111/TPJ.15472>
- Biradar, C. M., Ghosh, S., Löw, F., Singh, R., Chandna, P., Sarker, A., Sahoo, R. N., Swain, N., Choudhury, G., Agrawal, S., Rizvi, N., El-Shamaa, K., Atassi, L., Dong, J., Gaur, A., & Werry, J. (2019). GEO BIG DATA AND DIGITAL AUGMENTATION FOR ACCELERATING AGROECOLOGICAL INTENSIFICATION IN DRYLANDS. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3-W6(3/W6), 545–548. <https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLII-3-W6-545-2019>
- Brouder, S. M., & Gomez-Macpherson, H. (2014). The impact of conservation agriculture on smallholder agricultural yields: A scoping review of the evidence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 187, 11–32. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2013.08.010>
- Bruelle, G., Affholder, F., Abrell, T., Ripoche, A., Dusserre, J., Naudin, K., Tittonell, P., Rabeharisoa, L., & Scopel, E. (2017). Can conservation agriculture improve crop water availability in an erratic tropical climate producing water stress? A simple model applied to upland rice in Madagascar. *Agricultural Water Management*, 192, 281–293. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2017.07.020>
- Brussaard, L., de Ruiter, P. C., & Brown, G. G. (2007). Soil biodiversity for agricultural sustainability. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 121(3), 233–244. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2006.12.013>
- Campos, J. C., Manrique-Silupú, J., Ipanaqué, W., Dorneanu, B., & Arellano-García, H. (2022). Mechanistic modelling for thrips incidence in organic banana. *Computer Aided*

- Chemical Engineering, 51, 271–276. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95879-0.50046-1>
- Centofanti, T., Hollis, J. M., Blenkinsop, S., Fowler, H. J., Truckell, I., Dubus, I. G., & Reichenberger, S. (2008). Development of agro-environmental scenarios to support pesticide risk assessment in Europe. *Science of The Total Environment*, 407(1), 574–588. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2008.08.017>
- Chen, X., Li, X., Jiang, B., Su, J., Zheng, X., & Wang, G. (2023). Prediction of spring agricultural drought using machine learning algorithms in the southern Songnen Plain, China. *Land Degradation & Development*. <https://doi.org/10.1002/LDR.4720>
- Chhogyel, N., Kumar, L., & Bajgai, Y. (2020). Spatio-temporal landscape changes and the impacts of climate change in mountainous Bhutan: A case of Punatsang Chhu Basin. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 18, 100307. <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2020.100307>
- Chiatante, G., & Meriggi, A. (2016). The Importance of Rotational Crops for Biodiversity Conservation in Mediterranean Areas. *PLOS ONE*, 11(2), e0149323. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0149323>
- Cohen, M., Rey, F., Ubeda, X., & Vila-Subiros, J. (2016). Landscapes and erosion in the mediterranean mountains: A comparison between France, Spain and Italy. In *Landscape and Sustainable Development: The French Perspective* (pp. 37–46). Taylor and Francis. <https://doi.org/10.4324/9781315591360-10>
- Colantoni, A., Delfanti, L., Recanatesi, F., Tolli, M., & Lord, R. (2016). Land use planning for utilizing biomass residues in Tusciana Romana (central Italy): Preliminary results of a multi criteria analysis to create an agro-energy district. *Land Use Policy*, 50, 125–133. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2015.09.012>
- Congalton, R. G., Oderwald, R. G., & Mead, R. A. (1983). Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate analysis statistical techniques. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 49(12), 1671–1678. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0020968740&origin=inward&txGid=44ed425a9633ce54f9c00d839bbd61d3>

- Contreras, D. A., Hiriart, E., Bondeau, A., Kirman, A., Guiot, J., Bernard, L., Suarez, R., & Van Der Leeuw, S. (2018). Regional paleoclimates and local consequences: Integrating GIS analysis of diachronic settlement patterns and process-based agroecosystem modeling of potential agricultural productivity in Provence (France). *PLOS ONE*, 13(12), e0207622. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0207622>
- Darvishi Bolorani, A., Soleimani, M., Neysani Samany, N., Bakhtiari, M., Qareqani, M., Papi, R., & Mirzaei, S. (2023). Assessment of Rural Vulnerability to Sand and Dust Storms in Iran. *Atmosphere* 2023, Vol. 14, Page 281, 14(2), 281. <https://doi.org/10.3390/ATMOS14020281>
- Dasgupta, S., Debnath, S., Das, A., Biswas, A., Weindorf, D. C., Li, B., Kumar Shukla, A., Das, S., Saha, S., & Chakraborty, S. (2023a). Developing regional soil micronutrient management strategies through ensemble learning based digital soil mapping. *Geoderma*, 433, 116457. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2023.116457>
- Dasgupta, S., Debnath, S., Das, A., Biswas, A., Weindorf, D. C., Li, B., Kumar Shukla, A., Das, S., Saha, S., & Chakraborty, S. (2023b). Developing regional soil micronutrient management strategies through ensemble learning based digital soil mapping. *Geoderma*, 433, 116457. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2023.116457>
- Davis, T. J., & Schirmer, I. A. (1987). Sustainability issues in agricultural development: proceedings of the seventh agriculture sector symposium.
- De Pádua, G. P., De Barros França-Neto, J., Rossi, R. F., & Cândido, H. G. (2014). Agroclimatic zoning of the state of Minas Gerais for the production of high quality soybean seeds. *Journal of Seed Science*, 36(4), 413–418. <https://doi.org/10.1590/2317-1545V36N41023>
- Devadas, R., Denham, R. J., & Pringle, M. (2012). SUPPORT VECTOR MACHINE CLASSIFICATION OF OBJECT-BASED DATA FOR CROP MAPPING, USING MULTI-TEMPORAL LANDSAT IMAGERY. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 185–190. <http://glovis.usgs.gov/>
- Fernandez, C. G. T., Nestor, B. J., Danilevicz, M. F., Gill, M., Petereit, J., Bayer, P. E., Finnegan, P. M., Batley, J., & Edwards, D. (2022). Pangenomes as a Resource to

Accelerate Breeding of Under-Utilised Crop Species. *International Journal of Molecular Sciences* 2022, Vol. 23, Page 2671, 23(5), 2671. <https://doi.org/10.3390/IJMS23052671>

Garnier, J., Billen, G., Vilain, G., Benoit, M., Passy, P., Tallec, G., Tournebize, J., Anglade, J., Billy, C., Mercier, B., Ansart, P., Azougui, A., Sebilo, M., & Kao, C. (2014). Curative vs. preventive management of nitrogen transfers in rural areas: Lessons from the case of the Orgeval watershed (Seine River basin, France). *Journal of Environmental Management*, 144, 125–134. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2014.04.030>

Hakam, O., Baali, A., & Belhaj Ali, A. (2023). Modeling drought-related yield losses using new geospatial technologies and machine learning approaches: case of the Gharb plain, North-West Morocco. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(1), 647–667. <https://doi.org/10.1007/S40808-022-01523-2/FIGURES/12>

Hendrickx, G., Napala, A., Dao, B., Batawui, D., De Deken, R., Vermeilen, A., & Slingenbergh, J. H. W. (2007). A systematic approach to area-wide tsetse distribution and abundance maps. In *Bulletin of Entomological Research* (Vol. 89, Issue 3, pp. 231–244). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/S0007485399000358>

Hendrickx, G., Napala, A., Slingenbergh, J. H. W., Deken, R. De, & Rogers, D. J. (2001). A contribution towards simplifying area-wide tsetse surveys using medium resolution meteorological satellite data. *Bulletin of Entomological Research*, 91(5), 333–346. <https://doi.org/10.1079/BER2001103>

Hinge, G., Surampalli, R. Y., Goyal, M. K., Gupta, B. B., & Chang, X. (2021). Soil carbon and its associate resilience using big data analytics: For food Security and environmental management. *Technological Forecasting and Social Change*, 169, 120823. <https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2021.120823>

Houshmandfar, A., O'Leary, G., Fitzgerald, G. J., Chen, Y., Tausz-Posch, S., Benke, K., Uddin, S., & Tausz, M. (2021). Machine learning produces higher prediction accuracy than the Jarvis-type model of climatic control on stomatal conductance in a dryland wheat agro-ecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology*, 304–305, 108423. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2021.108423>

- Jala, P. K., Meenal, R., Nagabushanam, P., Selvakumar, A. I., Jude Hemanth, D., & Rajasekaran, E. (2023). Machine Learning, Deep Learning Models for Agro-Meteorology Applications. ICSPC 2023 - 4th International Conference on Signal Processing and Communication, 196–200. <https://doi.org/10.1109/ICSPC57692.2023.10125635>
- Jebari, A., Del Prado, A., Pardo, G., & Álvaro-Fuentes, J. (2023). Climate change effects on northern Spanish grassland-based dairy livestock systems. *Plant and Soil*, 1–20. <https://doi.org/10.1007/S11104-023-05936-5/TABLES/3>
- Jiang, Y., Xu, X., Huang, Q., Huo, Z., & Huang, G. (2015). Assessment of irrigation performance and water productivity in irrigated areas of the middle Heihe River basin using a distributed agro-hydrological model. *Agricultural Water Management*, 147, 67–81. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2014.08.003>
- Kang, S., Nair, S. S., Kline, K. L., Nichols, J. A., Wang, D., Post, W. M., Brandt, C. C., Wullschleger, S. D., Singh, N., & Wei, Y. (2014). Global simulation of bioenergy crop productivity: Analytical framework and case study for switchgrass. *GCB Bioenergy*, 6(1), 14–25. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12047>
- Kiruthika, S., & Karthika, D. (2023). IOT-BASED professional crop recommendation system using a weight-based long-term memory approach. *Measurement: Sensors*, 27, 100722. <https://doi.org/10.1016/J.MEASEN.2023.100722>
- Kucharik, C. J., VanLoocke, A., Lenters, J. D., & Motew, M. M. (2013). Miscanthus Establishment and Overwintering in the Midwest USA: A Regional Modeling Study of Crop Residue Management on Critical Minimum Soil Temperatures. *PLoS ONE*, 8(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0068847>
- Kuchler, P. C., Simões, M., Ferraz, R., Arvor, D., de Almeida Machado, P. L. O., Rosa, M., Gaetano, R., & Bégué, A. (2022). Monitoring Complex Integrated Crop–Livestock Systems at Regional Scale in Brazil: A Big Earth Observation Data Approach. *Remote Sensing 2022*, Vol. 14, Page 1648, 14(7), 1648. <https://doi.org/10.3390/RS14071648>
- Kulmatov, R., Khasanov, S., Odilov, S., & Li, F. (2021). Assessment of the Space-Time Dynamics of Soil Salinity in Irrigated Areas Under Climate Change: a Case Study in

- Sirdarya Province, Uzbekistan. *Water, Air, and Soil Pollution*, 232(5), 1–13.
<https://doi.org/10.1007/S11270-021-05163-7/TABLES/2>
- Kunatsa, T., & Xia, X. (2022). A review on anaerobic digestion with focus on the role of biomass co-digestion, modelling and optimisation on biogas production and enhancement. *Bioresource Technology*, 344, 126311.
<https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2021.126311>
- Lal, R. (2006). Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands. *Land Degradation & Development*, 17(2), 197–209. <https://doi.org/10.1002/LDR.696>
- Li, Y., Miao, Y., Zhang, J., Cammarano, D., Li, S., Liu, X., Tian, Y., Zhu, Y., Cao, W., & Cao, Q. (2022). Improving Estimation of Winter Wheat Nitrogen Status Using Random Forest by Integrating Multi-Source Data Across Different Agro-Ecological Zones. *Frontiers in Plant Science*, 13, 890892.
<https://doi.org/10.3389/FPLS.2022.890892/BIBTEX>
- Mariani, L., Alilla, R., Cola, G., Monte, G. D., Epifani, C., Puppi, G., & Osvaldo, F. (2013). IPHEN-a real-time network for phenological monitoring and modelling in Italy. *International Journal of Biometeorology*, 57(6), 881–893.
<https://doi.org/10.1007/S00484-012-0615-X/FIGURES/9>
- Marino, D., Palmieri, M., Marucci, A., Soraci, M., Barone, A., & Pili, S. (2023). Linking Flood Risk Mitigation and Food Security: An Analysis of Land-Use Change in the Metropolitan Area of Rome. *Land* 2023, Vol. 12, Page 366, 12(2), 366.
<https://doi.org/10.3390/LAND12020366>
- Mateo-Sanchis, A., Piles, M., Amorós-López, J., Muñoz-Marí, J., Adsuara, J. E., Moreno-Martínez, Á., & Camps-Valls, G. (2021). Learning main drivers of crop progress and failure in Europe with interpretable machine learning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 104, 102574.
<https://doi.org/10.1016/J.JAG.2021.102574>
- Meinke, H., Howden, S. M., Struik, P. C., Nelson, R., Rodriguez, D., & Chapman, S. C. (2009). *Adaptation science for agriculture and natural resource management —*

- urgency and theoretical basis. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1(1), 69–76. <https://doi.org/10.1016/J.COSUST.2009.07.007>
- Mogili, U. R., & Deepak, B. B. V. L. (2018). Review on Application of Drone Systems in Precision Agriculture. *Procedia Computer Science*, 133, 502–509. <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2018.07.063>
- Mohammadi Kashka, F., Tahmasebi Sarvestani, Z., Pirdashti, H., Motevali, A., Nadi, M., & Valipour, M. (2023a). Sustainable Systems Engineering Using Life Cycle Assessment: Application of Artificial Intelligence for Predicting Agro-Environmental Footprint. *Sustainability* 2023, Vol. 15, Page 6326, 15(7), 6326. <https://doi.org/10.3390/SU15076326>
- Mohammadi Kashka, F., Tahmasebi Sarvestani, Z., Pirdashti, H., Motevali, A., Nadi, M., & Valipour, M. (2023b). Sustainable Systems Engineering Using Life Cycle Assessment: Application of Artificial Intelligence for Predicting Agro-Environmental Footprint. *Sustainability* 2023, Vol. 15, Page 6326, 15(7), 6326. <https://doi.org/10.3390/SU15076326>
- Muralidharan, C., Yoosuf, M. S., Rajkumar, Y., & Shivaprasad, D. D. (2023). Internet of Agro Drones for Precision Agriculture. *Internet of Drones*, 139–153. <https://doi.org/10.1201/9781003252085-9/INTERNET-AGRO-DRONES-PRECISION-AGRICULTURE-MURALIDHARAN-MOHAMED-SIRAJUDEEN-YOOSUF-RAJKUMAR-SHIVAPRASAD>
- Nabati, J., Nezami, A., Neamatollahi, E., & Akbari, M. (2020). GIS-based agro-ecological zoning for crop suitability using fuzzy inference system in semi-arid regions. *Ecological Indicators*, 117, 106646. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2020.106646>
- Nabati, J., Nezami, A., Neamatollahi, E., & Akbari, M. (2023). An integrated approach land suitability for agroecological zoning based on fuzzy inference system and GIS. *Environment, Development and Sustainability*, 25(3), 2316–2338. <https://doi.org/10.1007/S10668-022-02127-7/TABLES/6>
- Naveed, M., He, H. S., Zong, S., Du, H., Satti, Z., Sun, H., & Chang, S. (2023). Cotton cultivated area detection and yield monitoring combining remote sensing with field

- data in lower Indus River basin, Pakistan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(3), 1–16. <https://doi.org/10.1007/S10661-023-11004-3/TABLES/3>
- Nayak, G., Sahu, A., Bhuyan, S. K., Akbar, A., Bhuyan, R., Kar, D., Nayak, G. C., Satapathy, S., Pattnaik, B., & Kuanar, A. (2023). Developing a computational tool based on an artificial neural network for predicting and optimizing propolis oil, an important natural product for drug discovery. *PLOS ONE*, 18(5), e0283766. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0283766>
- Neamatollahi, E., Bannayan, M., Jahansuz, M. R., Struik, P., & Farid, A. (2012a). Agro-ecological zoning for wheat (*Triticum aestivum*), sugar beet (*Beta vulgaris*) and corn (*Zea mays*) on the Mashhad plain, Khorasan Razavi province. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 15(1), 99–112. <https://doi.org/10.1016/J.EJRS.2012.05.002>
- Neamatollahi, E., Bannayan, M., Jahansuz, M. R., Struik, P., & Farid, A. (2012b). Agro-ecological zoning for wheat (*Triticum aestivum*), sugar beet (*Beta vulgaris*) and corn (*Zea mays*) on the Mashhad plain, Khorasan Razavi province. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 15(1), 99–112. <https://doi.org/10.1016/J.EJRS.2012.05.002>
- Nguyen-Huy, T., Deo, R. C., An-Vo, D. A., Mushtaq, S., & Khan, S. (2017). Copula-statistical precipitation forecasting model in Australia's agro-ecological zones. *Agricultural Water Management*, 191, 153–172. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2017.06.010>
- Ouyang, Z., Jackson, R. B., McNicol, G., Fluet-Chouinard, E., Runkle, B. R. K., Papale, D., Knox, S. H., Cooley, S., Delwiche, K. B., Feron, S., Irvin, J. A., Malhotra, A., Muddasir, M., Sabbatini, S., Alberto, M. C. R., Cescatti, A., Chen, C. L., Dong, J., Fong, B. N., ... Zhang, Y. (2023). Paddy rice methane emissions across Monsoon Asia. *Remote Sensing of Environment*, 284, 113335. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2022.113335>
- Portugal-Pereira, J., Soria, R., Rathmann, R., Schaeffer, R., & Szklo, A. (2015). Agricultural and agro-industrial residues-to-energy: Techno-economic and environmental assessment in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, 81, 521–533. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2015.08.010>

- Rahman, M. S., Pientong, C., Zafar, S., Ekalaksananan, T., Paul, R. E., Haque, U., Rocklöv, J., & Overgaard, H. J. (2021). Mapping the spatial distribution of the dengue vector *Aedes aegypti* and predicting its abundance in northeastern Thailand using machine-learning approach. *One Health*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.onehlt.2021.100358>
- Ranaivoson, L., Naudin, K., Ripoche, A., Affholder, F., Rabeharisoa, L., & Corbeels, M. (2017). Agro-ecological functions of crop residues under conservation agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(4), 26. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0432-z>
- Raza, A., Shoaib, M., Faiz, M. A., Baig, F., Khan, M. M., Ullah, M. K., & Zubair, M. (2020). Comparative Assessment of Reference Evapotranspiration Estimation Using Conventional Method and Machine Learning Algorithms in Four Climatic Regions. *Pure and Applied Geophysics*, 177(9), 4479–4508. <https://doi.org/10.1007/S00024-020-02473-5/TABLES/12>
- Rinaldi, M., Castrignanò, A., Mastroilli, M., Rana, G., Ventrella, D., Acutis, M., D'Urso, G., & Mattia, F. (2006). Decision Support Systems To Manage Water Resources At Irrigation District Level In Southern Italy Using Remote Sensing Information. An Integrated Project (AQUATER). *AIP Conference Proceedings*, 852(1), 107–114. <https://doi.org/10.1063/1.2349334>
- Riquetti, N. B., Mello, C. R., Leandro, D., Guzman, J. A., & Beskow, S. (2022). Assessment of the soil-erosion-sediment for sustainable development of South America. *Journal of Environmental Management*, 321, 115933. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.115933>
- Saggi, M. K., Jain, S., Bhatia, A. S., & Sharda, R. (2022). Proposition of new ensemble data-intelligence model for evapotranspiration process simulation. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 14(7), 8881–8897. <https://doi.org/10.1007/S12652-021-03636-5/FIGURES/12>
- Sánchez, J., Curt, M. D., & Fernández, J. (2017). Approach to the potential production of giant reed in surplus saline lands of Spain. *GCB Bioenergy*, 9(1), 105–118. <https://doi.org/10.1111/GCBB.12329>

- SARKAR, N. C., MONDAL, K., DAS, A., MUKHERJEE, A., MANDAL, S., GHOSH, S., BHATTACHARYA, B., LAWES, R., & HUDA, S. (2023). Enhancing livelihoods in farming communities through super-resolution agromet advisories using advanced digital agriculture technologies. *Journal of Agrometeorology*, 25(1), 68–78. <https://doi.org/10.54386/JAM.V25I1.2080>
- Satpathi, A., Setiya, P., Das, B., Nain, A. S., Jha, P. K., Singh, S., & Singh, S. (2023). Comparative Analysis of Statistical and Machine Learning Techniques for Rice Yield Forecasting for Chhattisgarh, India. *Sustainability (Switzerland)*, 15(3), 2786. <https://doi.org/10.3390/SU15032786/S1>
- Sciuto, L., Licciardello, F., Barbera, A. C., & Cirelli, G. (2022). A GIS-based multicriteria decision analysis to reduce riparian vegetation hydrogeological risk and to quantify harvested biomass (Giant reed) for energetic retrieval. *Ecological Indicators*, 144, 109548. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2022.109548>
- Scopel, E., Triomphe, B., Affholder, F., Da Silva, F. A. M. E., Corbeels, M., Xavier, J. H. V., Lahmar, R., Recous, S., Bernoux, M., Blanchart, E., De Carvalho Mendes, I., & De Tourdonnet, S. (2013). Conservation agriculture cropping systems in temperate and tropical conditions, performances and impacts. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(1), 113–130. <https://doi.org/10.1007/S13593-012-0106-9/METRICS>
- Senanayake, S., Pradhan, B., Alamri, A., & Park, H. J. (2022). A new application of deep neural network (LSTM) and RUSLE models in soil erosion prediction. *Science of The Total Environment*, 845, 157220. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.157220>
- Shiri, J., Kim, S., & Kisi, O. (2014). Estimation of daily dew point temperature using genetic programming and neural networks approaches. *Hydrology Research*, 45(2), 165–181. <https://doi.org/10.2166/NH.2013.229>
- Surendra, K. C., Angelidaki, I., & Khanal, S. K. (2022). Bioconversion of waste-to-resources (BWR-2021): Valorization of industrial and agro-wastes to fuel, feed, fertilizer, and biobased products. *Bioresource Technology*, 347, 126739. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2022.126739>
- Taghizadeh-Mehrjardi, R., Schmidt, K., Toomanian, N., Heung, B., Behrens, T., Mosavi, A., S. Band, S., Amirian-Chakan, A., Fathabadi, A., & Scholten, T. (2021). Improving

- the spatial prediction of soil salinity in arid regions using wavelet transformation and support vector regression models. *Geoderma*, 383, 114793. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2020.114793>
- Timsina, J., Dutta, S., Devkota, K. P., Chakraborty, S., Neupane, R. K., Bishta, S., Amgain, L. P., Singh, V. K., Islam, S., & Majumdar, K. (2021). Improved nutrient management in cereals using Nutrient Expert and machine learning tools: Productivity, profitability and nutrient use efficiency. *Agricultural Systems*, 192, 103181. <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2021.103181>
- Valle Júnior, L. C. G., Ventura, T. M., Souza, R. S. R., de S. Nogueira, J., de A. Lobo, F., Vourlitis, G. L., & Rodrigues, T. R. (2020). Comparative assessment of modelled and empirical reference evapotranspiration methods for a brazilian savanna. *Agricultural Water Management*, 232, 106040. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2020.106040>
- Viscarra Rossel, R. A., Behrens, T., Ben-Dor, E., Brown, D. J., Demattê, J. A. M., Shepherd, K. D., Shi, Z., Stenberg, B., Stevens, A., Adamchuk, V., Aichi, H., Barthès, B. G., Bartholomeus, H. M., Bayer, A. D., Bernoux, M., Böttcher, K., Brodský, L., Du, C. W., Chappell, A., ... Ji, W. (2016). A global spectral library to characterize the world's soil. *Earth-Science Reviews*, 155, 198–230. <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2016.01.012>
- Wang, E., Attard, S., Linton, A., McGlinchey, M., Xiang, W., Philippa, B., & Everingham, Y. (2020). Development of a closed-loop irrigation system for sugarcane farms using the Internet of Things. *Computers and Electronics in Agriculture*, 172, 105376. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2020.105376>
- Xu, X., Ouyang, X., Gu, Y., Cheng, K., Smith, P., Sun, J., Li, Y., & Pan, G. (2021). Climate change may interact with nitrogen fertilizer management leading to different ammonia loss in China's croplands. *Global Change Biology*, 27(24), 6525–6535. <https://doi.org/10.1111/GCB.15874>
- Yamada, E. S. M., & Sentelhas, P. C. (2014). Agro-climatic zoning of *Jatropha curcas* as a subside for crop planning and implementation in Brazil. *International Journal of Biometeorology*, 58(9), 1995–2010. <https://doi.org/10.1007/S00484-014-0803-Y/TABLES/6>

- Yan, X., Yagi, K., Akiyama, H., & Akimoto, H. (2005). Statistical analysis of the major variables controlling methane emission from rice fields. *Global Change Biology*, 11(7), 1131–1141. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2486.2005.00976.X>
- Zhang, G., Xiao, X., Biradar, C. M., Dong, J., Qin, Y., Menarguez, M. A., Zhou, Y., Zhang, Y., Jin, C., Wang, J., Doughty, R. B., Ding, M., & Moore, B. (2017). Spatiotemporal patterns of paddy rice croplands in China and India from 2000 to 2015. *Science of The Total Environment*, 579, 82–92. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2016.10.223>
- Zhang, J. ;, Liu, Y., Yang, H., Li, Z., Huang, C., Yin, D., Zhang, J., & Liu, Y. (2022). Agronomic Improvements, Not Climate, Underpin Recent Rice Yield Gains in Changing Environments. *Agronomy* 2022, Vol. 12, Page 2071, 12(9), 2071. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY12092071>
- Zhou, D., Khan, S., Abbas, A., Rana, T., Zhang, H., & Chen, Y. (2009). Climatic regionalization mapping of the Murrumbidgee Irrigation Area, Australia. *Progress in Natural Science*, 19(12), 1773–1779. <https://doi.org/10.1016/J.PNSC.2009.07.007>



AGROSAVIA
Corporación colombiana de investigación agropecuaria