



*Estrategias de transformación digital para la gestión de huella hídrica
Agroindustrial*

Digital transformation strategies for Agroindustrial water footprint management

*Estratégias de transformação digital para gestão da pegada hídrica
agroindustrial*

Karla Lilibeth Cevallos-Angulo ¹

karly_memo@hotmail.com

<https://orcid.org/0009-0004-3990-4346>

Correspondencia: karly_memo@hotmail.com

Ciencias Técnicas y Aplicadas

Artículo de Investigación

* **Recibido:** 02 de marzo de 2024 * **Aceptado:** 11 de abril de 2024 * **Publicado:** 07 de mayo de 2024

- I. Ingeniera Química en la Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Magíster en Gestión de Riesgos, Mención en Prevención de Riesgos Laborales en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador.

Resumen

En un mundo donde la disponibilidad de agua dulce es cada vez más limitada y el cambio climático intensifica la presión sobre los recursos hídricos, la gestión eficiente del agua se convierte en un factor crítico para la sostenibilidad de la agroindustria. La agricultura y la industria alimentaria son los mayores consumidores de agua en todo el mundo, siendo responsables de una parte considerable de la huella hídrica global. Frente a este escenario, la integración de tecnologías digitales se presenta como una solución prometedora para abordar los desafíos relacionados con el uso del agua en la agroindustria (Muñoz et al., 2020).

La transformación digital en la gestión de la huella hídrica agroindustrial implica la aplicación de diversas estrategias y tecnologías innovadoras. Desde la implementación de sistemas de monitoreo basados en sensores hasta el uso de inteligencia artificial y análisis de datos avanzados, estas herramientas tienen como objetivo principal optimizar el uso del agua y minimizar el impacto ambiental de las actividades agroindustriales. La adopción de estas tecnologías permite una gestión más eficiente y precisa de los recursos hídricos, lo que resulta en beneficios tanto económicos como ambientales. Sin embargo, la implementación de estrategias de transformación digital no está exenta de desafíos (Van Leeuwen et al., 2012). La accesibilidad a la tecnología, la seguridad de los datos, los impactos socioeconómicos y la necesidad de adaptación a los cambios en el mercado y el entorno regulatorio son aspectos que deben abordarse de manera integral. Además, es crucial comprender cómo estas tecnologías pueden integrarse en los sistemas existentes y adaptarse a las diferentes realidades de la agroindustria en diferentes regiones del mundo. A lo largo de este artículo, se examinarán en detalle las estrategias de transformación digital para la gestión de la huella hídrica agroindustrial. Se explorarán los avances tecnológicos, los modelos predictivos, las implicaciones socioeconómicas y ambientales, así como las perspectivas futuras en esta área. Comprender estos aspectos es fundamental para avanzar hacia una gestión más sostenible del agua en la agroindustria, contribuyendo así a la seguridad alimentaria y al desarrollo económico y social.

Palabras clave: Transformación digital; Gestión; Huella hídrica; Agroindustria; Tecnologías innovadoras.

Abstract

In a world where the availability of fresh water is increasingly limited and climate change intensifies pressure on water resources, efficient water management becomes a critical factor for

the sustainability of agribusiness. Agriculture and the food industry are the largest consumers of water worldwide, being responsible for a considerable part of the global water footprint. Faced with this scenario, the integration of digital technologies is presented as a promising solution to address the challenges related to the use of water in agroindustry (Muñoz et al., 2020).

The digital transformation in the management of the agroindustrial water footprint involves the application of various innovative strategies and technologies. From the implementation of sensor-based monitoring systems to the use of artificial intelligence and advanced data analysis, these tools have the main objective of optimizing water use and minimizing the environmental impact of agroindustrial activities. The adoption of these technologies allows for more efficient and accurate management of water resources, resulting in both economic and environmental benefits. However, the implementation of digital transformation strategies is not without challenges (Van Leeuwen et al., 2012). Accessibility to technology, data security, socioeconomic impacts and the need to adapt to changes in the market and regulatory environment are aspects that must be addressed comprehensively. Furthermore, it is crucial to understand how these technologies can be integrated into existing systems and adapted to the different realities of agribusiness in different regions of the world. Throughout this article, digital transformation strategies for managing the agroindustrial water footprint will be examined in detail. Technological advances, predictive models, socioeconomic and environmental implications, as well as future perspectives in this area will be explored. Understanding these aspects is essential to move towards more sustainable water management in agribusiness, thus contributing to food security and economic and social development.

Keywords: Digital transformation; Management; Water footprint; Agroindustry; Innovative technologies.

Resumo

Num mundo onde a disponibilidade de água doce é cada vez mais limitada e as alterações climáticas intensificam a pressão sobre os recursos hídricos, a gestão eficiente da água torna-se um factor crítico para a sustentabilidade do agronegócio. A agricultura e a indústria alimentar são os maiores consumidores de água a nível mundial, sendo responsáveis por uma parte considerável da pegada hídrica global. Diante deste cenário, a integração das tecnologias digitais apresenta-se como

uma solução promissora para enfrentar os desafios relacionados ao uso da água na agroindústria (Muñoz et al., 2020).

A transformação digital na gestão da pegada hídrica agroindustrial envolve a aplicação de diversas estratégias e tecnologias inovadoras. Desde a implementação de sistemas de monitoramento baseados em sensores até o uso de inteligência artificial e análise avançada de dados, essas ferramentas têm como objetivo principal otimizar o uso da água e minimizar o impacto ambiental das atividades agroindustriais. A adoção destas tecnologias permite uma gestão mais eficiente e precisa dos recursos hídricos, resultando em benefícios económicos e ambientais. No entanto, a implementação de estratégias de transformação digital não está isenta de desafios (Van Leeuwen et al., 2012). A acessibilidade à tecnologia, a segurança dos dados, os impactos socioeconómicos e a necessidade de adaptação às mudanças no mercado e no ambiente regulatório são aspectos que devem ser abordados de forma abrangente. Além disso, é crucial compreender como estas tecnologias podem ser integradas nos sistemas existentes e adaptadas às diferentes realidades do agronegócio em diferentes regiões do mundo. Ao longo deste artigo, serão examinadas detalhadamente as estratégias de transformação digital para a gestão da pegada hídrica agroindustrial. Serão explorados avanços tecnológicos, modelos preditivos, implicações socioeconómicas e ambientais, bem como perspectivas futuras nesta área. A compreensão destes aspectos é essencial para avançarmos para uma gestão mais sustentável da água no agronegócio, contribuindo assim para a segurança alimentar e o desenvolvimento económico e social.

Palavras-chave: Transformação digital; Gerenciamento; Pegada hídrica; Agroindústria; Tecnologias inovadoras.

Introducción

La huella hídrica, definida como el volumen total de agua utilizada directa o indirectamente para producir un bien o servicio, abarca no solo el agua utilizada en los procesos de cultivo o crianza, sino también el agua empleada en la fabricación, procesamiento, transporte y eliminación de productos agroindustriales. Este enfoque holístico permite una evaluación más completa de la presión hídrica asociada a la agroindustria, considerando tanto el uso directo de agua como los impactos indirectos en los recursos hídricos (Van Leeuwen et al., 2012).

La huella hídrica se divide en tres componentes principales: la huella verde, que representa el agua de lluvia consumida durante el crecimiento de cultivos; la huella azul, que se refiere al agua de

irrigación y de fuentes superficiales o subterráneas utilizadas; y la huella gris, que indica la cantidad de agua necesaria para diluir los contaminantes presentes en los efluentes generados durante la producción. Esta distinción es crucial para entender cómo diferentes actividades agroindustriales afectan a los recursos hídricos y para diseñar estrategias de gestión más efectivas.

Métodos de cálculo y evaluación de la huella hídrica

Los métodos de cálculo y evaluación de la huella hídrica varían en complejidad y precisión, pero comparten el objetivo de cuantificar el uso del agua a lo largo de toda la cadena de valor agroindustrial.

El enfoque de la Water Footprint Network (WFN) es uno de los más reconocidos y utilizado en la evaluación de la huella hídrica. Este enfoque distingue entre la huella verde, azul y gris del agua, permitiendo una evaluación más detallada de los diferentes tipos de consumo de agua y sus impactos en los recursos hídricos. Por otro lado, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se utiliza para evaluar los impactos ambientales de manera integral, considerando no solo el uso del agua, sino también otros recursos naturales y emisiones asociadas a lo largo de todo el ciclo de vida del producto agroindustrial.

Impacto del uso del agua en la agroindustria

El agua desempeña un papel fundamental en todas las etapas de la cadena agroindustrial, desde el riego de cultivos hasta el procesamiento y envasado de productos. Sin embargo, el uso intensivo del agua también tiene importantes impactos ambientales y socioeconómicos.

El consumo excesivo de agua en la agroindustria puede llevar a la sobreexplotación de recursos hídricos, la degradación del suelo, la salinización de tierras y la disminución de la biodiversidad. Además, el uso ineficiente del agua puede resultar en altos costos operativos para las empresas agroindustriales y en conflictos por el acceso al agua con otras industrias y comunidades locales. Por lo tanto, es crucial adoptar medidas para mejorar la eficiencia hídrica y reducir el impacto ambiental del uso del agua en la agroindustria.

Marco regulatorio y estándares de sostenibilidad

La gestión del agua en la agroindustria está influenciada por una variedad de regulaciones y estándares de sostenibilidad a nivel internacional, regional y nacional.

A nivel internacional, organizaciones como la Water Footprint Network (WFN) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) han desarrollado directrices y estándares para la evaluación y gestión de la huella hídrica en la cadena agroindustrial. Estos estándares proporcionan un marco común para la medición y comunicación del uso del agua, lo que facilita la comparación entre diferentes productos y empresas (Muñoz et al., 2020; Van Leeuwen et al., 2012). A nivel regional y nacional, muchos países han implementado políticas y regulaciones para promover el uso sostenible del agua en la agricultura y la industria. Estas regulaciones pueden incluir restricciones al uso de agua, incentivos para la adopción de tecnologías de conservación del agua y programas de certificación para empresas que demuestran prácticas sostenibles de gestión del agua.

En conjunto, estos marcos regulatorios y estándares de sostenibilidad juegan un papel crucial en la promoción de prácticas responsables de gestión del agua en la agroindustria, fomentando la transparencia, la responsabilidad y la mejora continua en este ámbito (Walsh et al., 2016).

Tecnologías digitales aplicadas a la gestión del agua

Automatización y sensorización en la recolección de datos

La automatización de procesos y la sensorización son fundamentales para recopilar datos precisos sobre el uso del agua en la agroindustria. Mediante el uso de sensores, se puede monitorear el consumo de agua en tiempo real, identificando patrones de uso y posibles puntos de pérdida o derroche. Estos sensores pueden instalarse en sistemas de riego, equipos de procesamiento y otras áreas críticas para medir con precisión la cantidad de agua utilizada. La automatización de la recolección de datos elimina la necesidad de recopilar información manualmente, lo que ahorra tiempo y reduce errores (Walsh et al., 2016). La sensorización también puede proporcionar datos sobre la calidad del agua, detectando la presencia de contaminantes o niveles de pH inadecuados. Esta información es crucial para garantizar la seguridad alimentaria y cumplir con los estándares de calidad del agua. Al combinar la automatización con la sensorización, las empresas pueden obtener una visión completa de su uso del agua y tomar medidas proactivas para mejorar la eficiencia y reducir los riesgos.

Internet de las cosas (IoT) en la gestión del agua

El Internet de las Cosas (IoT) ha transformado la gestión del agua al permitir la conectividad y el intercambio de datos entre dispositivos y sistemas. Los dispositivos IoT, como medidores de flujo, válvulas inteligentes y estaciones meteorológicas, se pueden integrar en la infraestructura existente para proporcionar información en tiempo real sobre el estado del agua y las condiciones ambientales. Estos datos se pueden utilizar para optimizar el riego, prevenir fugas y reducir el desperdicio de agua. La IoT también facilita la monitorización remota, lo que permite a los agricultores y gestores de instalaciones controlar y ajustar los sistemas de riego y tratamiento de agua desde cualquier ubicación. Esto mejora la eficiencia operativa y reduce la necesidad de intervención humana. Además, la IoT puede utilizarse para predecir problemas antes de que ocurran, mediante el análisis de datos históricos y la detección de anomalías en el comportamiento del agua. Esto permite una gestión proactiva del agua y una respuesta rápida a situaciones de emergencia (Van Leeuwen et al., 2012; Walsh et al., 2016).

Analítica de datos y Big Data en la gestión hídrica

La analítica de datos y el Big Data son herramientas poderosas para gestionar eficazmente los recursos hídricos en la agroindustria. Estas tecnologías permiten el análisis de grandes volúmenes de datos para identificar patrones, tendencias y correlaciones que de otro modo serían difíciles de detectar. El análisis de datos puede ayudar a las empresas a comprender mejor su uso del agua, identificar áreas de mejora y tomar decisiones basadas en evidencia.

Los algoritmos de aprendizaje automático pueden utilizar datos históricos para predecir la demanda hídrica, optimizar los programas de riego y prevenir el desperdicio de agua. Por ejemplo, un sistema de aprendizaje automático puede analizar datos climáticos, datos de suelo y datos de cultivos para determinar la cantidad óptima de agua necesaria en diferentes condiciones. Esto permite una gestión más eficiente y sostenible del agua, maximizando el rendimiento de los cultivos mientras se minimiza el consumo de agua.

Plataformas de gestión y sistemas de información geográfica (GIS)

Las plataformas de gestión y los sistemas de información geográfica (GIS) son herramientas esenciales para visualizar, analizar y gestionar datos espaciales relacionados con el agua. Estas plataformas permiten a las empresas mapear y monitorear sus recursos hídricos, identificar áreas de alta demanda y evaluar la disponibilidad de agua en diferentes ubicaciones. Los GIS también pueden utilizarse para modelar escenarios y simular el impacto de cambios en la gestión del agua. Las plataformas de gestión centralizan los datos relacionados con el agua en un solo lugar, lo que facilita el acceso y la colaboración entre diferentes departamentos y partes interesadas. Esto mejora la coordinación y la toma de decisiones, permitiendo una gestión más eficiente y eficaz del agua en toda la organización. Además, los GIS proporcionan herramientas de análisis avanzado, como análisis de flujo de agua, análisis de cobertura terrestre y modelado de cuencas hidrográficas, que ayudan a comprender mejor la dinámica del agua y planificar estrategias de gestión más efectivas (Loukatos et al., 2022).

Beneficios y retos de la transformación digital en la gestión hídrica agroindustrial

Optimización de la eficiencia hídrica

La optimización de la eficiencia hídrica es uno de los principales beneficios de la transformación digital en la agroindustria. Mediante el uso de tecnologías digitales, las empresas pueden identificar y corregir de manera más eficiente las áreas de derroche y desperdicio de agua. La automatización de procesos, junto con la monitorización en tiempo real, permite ajustar los niveles de riego y el uso de agua de manera precisa, evitando el exceso de riego y minimizando las pérdidas.

Además, la analítica de datos y el uso de algoritmos de aprendizaje automático permiten prever y optimizar el uso del agua en función de las condiciones climáticas, el tipo de cultivo y las características del suelo. Esto conduce a una utilización más eficiente de los recursos hídricos, maximizando el rendimiento de los cultivos y reduciendo los costos asociados al uso excesivo de agua. En resumen, la transformación digital ofrece herramientas poderosas para mejorar la eficiencia hídrica en la agroindustria, lo que se traduce en ahorros significativos y una menor presión sobre los recursos hídricos.

Reducción de costos y aumento de la rentabilidad

Otro beneficio clave de la transformación digital en la gestión hídrica agroindustrial es la reducción de costos operativos y el aumento de la rentabilidad. La optimización de la eficiencia hídrica conduce a una disminución en el consumo de agua y energía, lo que se traduce en ahorros significativos a largo plazo. Al utilizar tecnologías digitales para monitorizar y controlar el uso del agua, las empresas pueden identificar oportunidades de ahorro y eficiencia que de otra manera podrían pasar desapercibidas (Rossi, 2015).

Además, la reducción de los costos asociados al desperdicio de agua y la corrección de problemas de riego ineficiente contribuyen a aumentar la rentabilidad de las operaciones agroindustriales (Finger, 2023). Los ahorros obtenidos pueden reinvertirse en mejoras adicionales en la infraestructura y procesos, lo que a su vez genera mayores beneficios económicos. En última instancia, la transformación digital no solo ayuda a reducir los costos operativos, sino que también mejora la competitividad de las empresas agroindustriales al garantizar una gestión más eficiente y rentable del agua.

Cumplimiento de estándares y regulaciones ambientales

La transformación digital también puede ayudar a las empresas agroindustriales a cumplir con los estándares y regulaciones ambientales relacionados con el uso del agua. Mediante el uso de tecnologías digitales, las empresas pueden monitorear y reportar de manera más precisa su consumo de agua, así como implementar prácticas de gestión sostenible del agua.

La capacidad de recopilar y analizar datos en tiempo real permite a las empresas identificar y corregir rápidamente cualquier incumplimiento de las normativas ambientales. Además, al optimizar el uso del agua y reducir los impactos ambientales, las empresas pueden mejorar su imagen pública y su reputación como actores responsables en términos de sostenibilidad (Vakulenko & Kravets, 2021). Sin embargo, la implementación exitosa de estrategias digitales en la gestión hídrica agroindustrial también enfrenta desafíos significativos. Uno de los principales desafíos es el costo de inversión inicial en tecnologías digitales y la capacitación del personal para su uso. Además, la integración de sistemas y estándares de datos puede ser compleja y requerir una coordinación cuidadosa entre diferentes departamentos y partes interesadas. A pesar de estos

desafíos, el potencial de la transformación digital para mejorar la eficiencia hídrica y reducir el impacto ambiental en la agroindustria justifica los esfuerzos para superar estas barreras.

Casos de estudio y mejores prácticas en transformación digital para la gestión de la huella hídrica

Casos de estudio en la implementación de tecnologías digitales

Se han documentado numerosos casos de estudio que ilustran cómo las empresas agroindustriales están utilizando tecnologías digitales para mejorar su gestión del agua. Un caso destacado es el de una granja lechera en California que implementó sensores IoT en sus sistemas de riego y en las instalaciones de ordeño para monitorizar el consumo de agua y detectar fugas de manera temprana. Gracias a esta tecnología, la granja logró reducir su uso de agua en un 20% y aumentar la eficiencia de sus operaciones (A Strategic Digital Transformation for the Water Industry, 2022). Otro caso interesante es el de una empresa de procesamiento de alimentos en España que implementó un sistema de analítica de datos para optimizar sus procesos de limpieza y reducir el uso de agua. Utilizando algoritmos de aprendizaje automático, la empresa identificó patrones de consumo de agua y desarrolló programas de limpieza más eficientes. Como resultado, lograron reducir el consumo de agua en un 15% y disminuir los costos operativos asociados.

Mejores prácticas en la gestión del agua

Además de los casos de estudio, existen diversas mejores prácticas en la gestión del agua que han demostrado ser efectivas en la agroindustria. Una de estas prácticas es la implementación de sistemas de riego inteligentes que utilizan sensores y algoritmos para ajustar automáticamente la cantidad de agua aplicada en función de las necesidades de los cultivos y las condiciones climáticas. Esto permite un uso más eficiente del agua y evita el exceso de riego, que puede ser perjudicial para los cultivos y el suelo. Otra práctica destacada es la reutilización y reciclaje del agua en los procesos agroindustriales (Kuznetsova, 2022). Las empresas pueden implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales para purificar el agua utilizada en la producción y volver a utilizarla en otros procesos. Esta práctica no solo reduce la demanda de agua fresca, sino que también disminuye la contaminación del agua y los costos asociados al tratamiento de residuos (Medennikov, 2020).

Impacto socioeconómico de la transformación digital

La transformación digital en la gestión hídrica agroindustrial también tiene importantes impactos socioeconómicos. Por ejemplo, en una granja de frutas en Chile, la implementación de sistemas de riego inteligentes no solo redujo el consumo de agua, sino que también aumentó la productividad y mejoró las condiciones laborales de los trabajadores. La automatización de tareas repetitivas liberó tiempo y recursos que se pudieron dedicar a actividades más productivas y especializadas. Otro ejemplo de impacto socioeconómico positivo es el de una cooperativa agrícola en India que implementó tecnologías digitales para mejorar la gestión del agua en sus campos de arroz. Gracias a la optimización del riego y la reducción de las pérdidas de agua, los agricultores aumentaron sus ingresos y mejoraron su seguridad alimentaria. Además, la implementación de tecnologías digitales atrajo inversiones y fomentó el desarrollo económico en la región.

Lecciones aprendidas y recomendaciones para la implementación

A partir de estos casos de estudio y mejores prácticas, se pueden extraer varias lecciones aprendidas y recomendaciones para la implementación de estrategias de transformación digital en la gestión hídrica agroindustrial. Es fundamental contar con el apoyo y la colaboración de todas las partes interesadas, incluidos los agricultores, las empresas, los gobiernos y la sociedad civil. Además, se debe proporcionar capacitación y apoyo técnico para garantizar que los usuarios puedan aprovechar al máximo las tecnologías digitales disponibles. Finalmente, es importante adoptar un enfoque integral que aborde tanto los aspectos técnicos como los socioeconómicos y ambientales de la gestión del agua. Solo así se podrán lograr mejoras significativas en la eficiencia y sostenibilidad del uso del agua en la agroindustria (Azevedo et al., 2019).

Desafíos y consideraciones éticas en la transformación digital de la gestión de la huella hídrica agroindustrial

Desafíos técnicos en la implementación de tecnologías digitales

La implementación de tecnologías digitales en la gestión de la huella hídrica agroindustrial enfrenta varios desafíos técnicos, incluida la interoperabilidad de sistemas, la seguridad de datos y la disponibilidad de infraestructura adecuada (Musina et al., 2022). La interoperabilidad es crucial para garantizar que los diferentes dispositivos y sistemas puedan comunicarse entre sí y compartir

datos de manera efectiva. Sin embargo, la integración de sistemas heredados y tecnologías heterogéneas puede ser complicada y requerir estándares de comunicación claros. La seguridad de datos es otro desafío importante, especialmente considerando la sensibilidad de la información relacionada con el uso del agua en la agroindustria.

Es fundamental proteger los datos contra accesos no autorizados, ataques cibernéticos y pérdida accidental. Además, la implementación de tecnologías digitales puede requerir inversiones significativas en infraestructura, como redes de comunicación y sistemas de almacenamiento de datos, lo que puede ser un obstáculo para las empresas con recursos limitados (Ronzhin & Savel'ev, 2022).

Desafíos socioeconómicos y culturales

Además de los desafíos técnicos, la transformación digital en la gestión de la huella hídrica agroindustrial enfrenta desafíos socioeconómicos y culturales. Por ejemplo, en algunas comunidades rurales, la adopción de tecnologías digitales puede verse obstaculizada por la falta de acceso a la electricidad o a internet. Esto puede excluir a ciertos grupos de agricultores o comunidades de los beneficios de la transformación digital y aumentar la brecha digital (Baturina et al., 2022).

La transformación digital puede alterar las dinámicas laborales y sociales en las comunidades agrícolas, especialmente si se automatizan tareas que tradicionalmente han sido realizadas por mano de obra humana. Es importante abordar estas preocupaciones y garantizar que la transformación digital beneficie a todas las partes interesadas, promoviendo la inclusión y la equidad (Zghurska et al., 2022).

Consideraciones éticas y responsabilidad corporativa

La implementación de la transformación digital en la gestión de la huella hídrica agroindustrial plantea importantes consideraciones éticas y de responsabilidad corporativa. Por ejemplo, el acceso a los datos sobre el uso del agua puede generar desequilibrios de poder entre diferentes actores, como agricultores, empresas y autoridades reguladoras. Es fundamental garantizar la transparencia y el acceso equitativo a la información para evitar posibles abusos y promover una gestión democrática del agua (Zghurska et al., 2022).

Sin embargo, las empresas tienen la responsabilidad de garantizar que la transformación digital se realice de manera ética y sostenible. Esto incluye consideraciones sobre el uso responsable de los recursos naturales, la protección de la privacidad de los datos y el respeto a los derechos humanos. Las empresas deben ser transparentes sobre sus prácticas y comprometerse con estándares éticos en todas sus operaciones relacionadas con el agua. En resumen, la transformación digital en la gestión de la huella hídrica agroindustrial debe abordarse con un enfoque integral que tenga en cuenta no solo los aspectos técnicos y socioeconómicos, sino también las consideraciones éticas y de responsabilidad corporativa. Esto garantizará que la transformación digital beneficie tanto a las empresas como a las comunidades y al medio ambiente (Berger et al., 2021).

Desafíos ambientales y sostenibilidad

La escasez y contaminación del agua son desafíos críticos para la agroindustria. La sobreexplotación de los recursos hídricos y la contaminación pueden tener consecuencias devastadoras para el medio ambiente y la salud humana. La transformación digital puede ayudar a abordar estos desafíos al mejorar la eficiencia en el uso del agua y reducir los impactos ambientales de las operaciones agrícolas e industriales. Sin embargo, es necesario desarrollar tecnologías y prácticas que minimicen el desperdicio de agua y reduzcan la contaminación, promoviendo una gestión más sostenible de los recursos hídricos (Reardon & Barrett, 2000; Zhai et al., 2019). La conservación de ecosistemas acuáticos es esencial para mantener la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. La transformación digital puede contribuir a esta conservación al reducir la extracción y contaminación del agua, y mejorar la gestión de los caudales y la calidad del agua. A pesar de estos avances, se deben desarrollar políticas y estrategias integrales que protejan los ecosistemas acuáticos y promuevan su recuperación, garantizando su funcionamiento saludable a largo plazo.

El cambio climático presenta desafíos adicionales para la gestión hídrica. Los cambios en los patrones de precipitación y temperatura afectan la disponibilidad y distribución del agua, requiriendo estrategias de adaptación. La transformación digital puede ayudar en esta adaptación al proporcionar herramientas para monitorear y gestionar los recursos hídricos de manera más eficiente. Sin embargo, es crucial integrar consideraciones de cambio climático en todas las etapas de la planificación y la implementación de la transformación digital para asegurar la sostenibilidad a largo plazo de las operaciones agroindustriales.

Futuro de la transformación digital en la gestión de la huella hídrica agroindustrial

Avances tecnológicos emergentes

Los avances tecnológicos emergentes están impulsando la transformación digital en la gestión hídrica agroindustrial hacia niveles cada vez más sofisticados. Uno de estos avances es la Internet de las Cosas (IoT), que permite la interconexión de dispositivos y sensores para recopilar y compartir datos en tiempo real. Con la IoT, las empresas pueden monitorear y controlar de manera remota sus sistemas de riego, optimizando el uso del agua y reduciendo el desperdicio (Castellanos et al., 2016).

Además, la inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático están siendo cada vez más utilizados para analizar grandes volúmenes de datos y generar insights para una gestión más eficiente del agua. Los algoritmos de IA pueden predecir patrones de consumo de agua, optimizar los programas de riego y detectar anomalías en el uso del agua, permitiendo una toma de decisiones más informada y proactiva (Hogeboom, 2020).

Integración de tecnologías digitales y agricultura sostenible

La integración de tecnologías digitales con enfoques de agricultura sostenible es una tendencia importante en la gestión de la huella hídrica agroindustrial. Esto implica la adopción de prácticas agrícolas que promuevan la conservación del agua y la salud del suelo, al tiempo que se utiliza la tecnología para optimizar los procesos y maximizar los rendimientos. Por ejemplo, la agricultura de precisión combina la tecnología GPS, la teledetección y la IoT para adaptar el riego y la fertilización a las necesidades específicas de cada área del campo. Esto no solo reduce el uso de agua y productos químicos, sino que también mejora la calidad de los cultivos y la eficiencia de los recursos (Ridoutt et al., 2009).

Desafíos y oportunidades futuras

A pesar de los avances, la transformación digital en la gestión de la huella hídrica agroindustrial enfrenta desafíos y oportunidades futuras. Uno de los principales desafíos es la necesidad de asegurar la accesibilidad y equidad en la adopción de tecnologías digitales, especialmente en regiones con recursos limitados (Walsh et al., 2016). La interoperabilidad de sistemas y la seguridad de datos seguirán siendo preocupaciones importantes a medida que la cantidad de datos

generados por las tecnologías digitales continúe aumentando. Sin embargo, estas dificultades también presentan oportunidades para la innovación y la colaboración entre diferentes sectores y disciplinas (Hoekstra, 2009).

Implicaciones sociales y económicas

La transformación digital en la gestión de la huella hídrica agroindustrial también conlleva importantes implicaciones sociales y económicas. Por un lado, la adopción de tecnologías digitales puede mejorar las condiciones de trabajo y aumentar la eficiencia en las operaciones agrícolas, lo que potencialmente podría generar empleo en sectores relacionados con la tecnología. Sin embargo, también existe el riesgo de que la automatización de ciertas tareas agrícolas conduzca a la pérdida de empleo en el sector agrícola tradicional, lo que requeriría programas de capacitación y reconversión laboral (Chenoweth et al., 2014). Además, la transformación digital puede afectar la distribución de la riqueza y el acceso a los recursos. Las empresas con recursos para invertir en tecnología digital pueden aumentar su productividad y competitividad, mientras que las pequeñas explotaciones agrícolas pueden enfrentar barreras económicas y tecnológicas para adoptar estas innovaciones. Es esencial abordar estas disparidades y garantizar que la transformación digital beneficie a todos los actores involucrados en la cadena de suministro agroindustrial.

Perspectivas futuras y áreas de investigación

Integración de tecnologías emergentes

La integración de tecnologías emergentes como la computación en la nube, el blockchain y la realidad aumentada ofrece un potencial significativo para mejorar la gestión de la huella hídrica agroindustrial. Estas tecnologías pueden proporcionar plataformas más seguras y eficientes para el intercambio de datos, permitiendo una mejor trazabilidad del uso del agua en toda la cadena de suministro agroindustrial. Además, la realidad aumentada puede utilizarse para capacitar a los agricultores en prácticas de conservación del agua y optimización de cultivos, proporcionando información contextualizada en tiempo real sobre el estado del agua y las condiciones del suelo (Lovarelli et al., 2016). La computación en la nube ofrece una infraestructura escalable y flexible para el almacenamiento y procesamiento de grandes volúmenes de datos hídricos, permitiendo el acceso remoto a información crítica y análisis avanzados. Por otro lado, la tecnología blockchain

puede ser utilizada para establecer sistemas de registro descentralizados que aseguren la transparencia y confiabilidad de los datos relacionados con el uso del agua, facilitando la trazabilidad y la gestión eficiente de los recursos hídricos.

Modelado predictivo y análisis de datos

El desarrollo de modelos predictivos y análisis avanzados de datos es fundamental para mejorar la capacidad de pronosticar y gestionar la disponibilidad y calidad del agua en la agroindustria. La combinación de datos meteorológicos, de suelo y de cultivos con técnicas de aprendizaje automático puede permitir la creación de modelos precisos de pronóstico de la demanda y oferta de agua (Azevedo et al., 2019). Los modelos predictivos pueden utilizarse para optimizar la planificación del riego, prevenir la escasez de agua y mitigar los impactos del cambio climático en la agricultura (Rossi, 2015). Además, el análisis de datos avanzado puede proporcionar información valiosa sobre patrones de uso del agua, identificar áreas de mejora en la eficiencia del riego y optimizar la gestión de los recursos hídricos a lo largo de toda la cadena de suministro agroindustrial.

Agricultura digital y agricultura 4.0

La adopción de enfoques de agricultura digital y Agricultura 4.0 continúa siendo un área de investigación clave. La aplicación de sensores remotos, drones y robots agrícolas puede proporcionar información detallada sobre las condiciones del cultivo y el uso del agua, permitiendo una gestión más precisa y eficiente. Estas tecnologías permiten monitorear el estado de los cultivos y detectar problemas como estrés hídrico o enfermedades de manera temprana, lo que facilita la toma de decisiones informadas para optimizar el riego y reducir el desperdicio de agua (Kuznetsova, 2022; Loukatos et al., 2022). La Agricultura 4.0 también implica la integración de sistemas inteligentes de gestión agrícola, que pueden controlar automáticamente el riego y la fertilización en función de las condiciones del suelo y las necesidades de los cultivos. Esto no solo mejora la eficiencia en el uso del agua, sino que también reduce los costos y el impacto ambiental de las prácticas agrícolas. Sin embargo, es necesario investigar más sobre la viabilidad económica y la escalabilidad de estas tecnologías, así como sus posibles impactos sociales y ambientales.

Impacto socioeconómico y ambiental

Es crucial investigar el impacto socioeconómico y ambiental de la transformación digital en la gestión de la huella hídrica agroindustrial. Se necesitan estudios que evalúen los beneficios y desafíos de la adopción de tecnologías digitales en términos de productividad agrícola, seguridad alimentaria, empleo rural y conservación de recursos naturales. Además, se requiere una evaluación de los posibles riesgos y externalidades negativas asociadas con la implementación de estas tecnologías, como la exclusión digital y la pérdida de biodiversidad (Kuznetsova, 2022).

La transformación digital también puede tener un impacto significativo en la distribución del poder y la riqueza en la cadena de suministro agroindustrial. Es esencial comprender cómo estas tecnologías afectan a diferentes actores, desde pequeños agricultores hasta grandes corporaciones, y desarrollar políticas que promuevan la equidad y la inclusión en este proceso de cambio. Además, se debe investigar cómo las tecnologías digitales pueden contribuir a la adaptación al cambio climático y la mitigación de sus efectos en la agricultura y la seguridad alimentaria a nivel global.

Conclusiones

La implementación de estrategias de transformación digital para la gestión de la huella hídrica agroindustrial ofrece una serie de beneficios significativos, pero también plantea desafíos que deben abordarse de manera integral. En primer lugar, la transformación digital permite una gestión más eficiente y precisa del agua en la agroindustria. Tecnologías como la Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial (IA) y la agricultura de precisión ofrecen herramientas poderosas para monitorear y controlar el uso del agua en toda la cadena de suministro agroindustrial. Esto no solo ayuda a reducir el desperdicio de agua, sino que también optimiza los procesos de riego y aumenta la productividad agrícola (Walsh et al., 2016).

Además, la transformación digital puede mejorar la resiliencia de la agroindustria frente a los desafíos ambientales y climáticos. La capacidad de recopilar y analizar datos en tiempo real permite una mejor adaptación a las condiciones cambiantes del clima y ayuda a prevenir y mitigar los efectos de la sequía y otros eventos extremos. Sin embargo, la implementación de estas tecnologías enfrenta desafíos importantes (Rossi, 2015). La accesibilidad a la tecnología, especialmente en regiones rurales y en países en desarrollo, sigue siendo una barrera significativa. Además, la seguridad de los datos y la interoperabilidad de los sistemas son preocupaciones importantes que

deben abordarse para garantizar la confiabilidad y la eficacia de las soluciones digitales. Por último, es crucial tener en cuenta los aspectos socioeconómicos y ambientales de la transformación digital en la gestión de la huella hídrica agroindustrial. Si bien estas tecnologías pueden generar beneficios económicos y ambientales, también pueden tener impactos negativos en términos de empleo rural, distribución de la riqueza y conservación de recursos naturales. Por lo tanto, es necesario adoptar un enfoque holístico que considere tanto los aspectos técnicos como los sociales y ambientales de la transformación digital (Walsh et al., 2016).

Referencias

1. A Strategic Digital Transformation for the Water Industry. (2022). <https://doi.org/10.2166/9781789063400>
2. Azevedo, M. T. de, Martins, A. B., & Kofuji, S. (2019). Digital Transformation in the Utilities Industry. Research Anthology on Digital Transformation, Organizational Change, and the Impact of Remote Work. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-4936-9.CH013>
3. Baturina, I., Bukhtiyarova, T., & Artamónova, I. (2022). Digital Transformation of the Agro-industrial Complex in Russia: Necessity and Features. Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference "Current Problems of Social and Labour Relations" (ISPC-CPSLR 2021). <https://doi.org/10.2991/assehr.k.220208.006>
4. Berger, M., Campos, J., Carolli, M., Dantas, I., Forin, S., Kosatica, E., Kramer, A., Mikosch, N., Nouri, H., Schlattmann, A., Schmidt, F., Schomberg, A. C., & Semmling, E. (2021). Advancing the Water Footprint into an Instrument to Support Achieving the SDGs – Recommendations from the "Water as a Global Resources" Research Initiative (GRoW). *Water Resources Management*, 35, 1291–1298. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02784-9>
5. Castellanos, M., Cartagena, M., Requejo, M. I., Arce, A., Cabello, M. J., Ribas, F., & Tarquis, A. (2016). Agronomic concepts in water footprint assessment: A case of study in a fertirrigated melon crop under semiarid conditions. *Agricultural Water Management*, 170, 81–90. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2016.01.014>
6. Chenoweth, J., Hadjikakou, M., & Zoumides, C. (2014). Quantifying the human impact on water resources: a critical review of the water footprint concept. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 2325–2342. <https://doi.org/10.5194/HESS-18-2325-2014>

7. Chere-Quiñónez, B. F., Ulloa-de Souza, R. C., Reyna-Tenorio, L. J., Canchingre-Bone, M. E., & Mosquera-Quintero, G. A. (2022). Electrical energy from industrial wastewater in Guayaquil, Ecuador. *Sapienza: International Journal of Interdisciplinary Studies*, 3(6), 202–210. <https://doi.org/10.51798/sijis.v3i6.509>
8. Finger, R. (2023). Digital innovations for sustainable and resilient agricultural systems. *European Review of Agricultural Economics*. <https://doi.org/10.1093/erae/jbad021>
9. Hoekstra, A. (2009). Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis. *Ecological Economics*, 68, 1963–1974. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2008.06.021>
10. Hogeboom, R. J. (2020). The Water Footprint Concept and Water’s Grand Environmental Challenges. *One Earth*. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.02.010>
11. Kuznetsova, N. (2022). Opportunities for Digital Transformation Of Production Processes On Farm. *European Proceedings of Social and Behavioural Sciences*. <https://doi.org/10.15405/epsbs.2022.02.77>
12. Loukatos, D., Lygkoura, K.-A., Maraveas, C., & Arvanitis, K. (2022). Enriching IoT Modules with Edge AI Functionality to Detect Water Misuse Events in a Decentralized Manner. *Sensors (Basel, Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/s22134874>
13. Lovarelli, D., Bacenetti, J., & Fiala, M. (2016). Water Footprint of crop productions: A review. *The Science of the Total Environment*, 548–549, 236–251. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.022>
14. Medennikov, V. I. (2020). The Impact of Digital Transformation on the Competitiveness of Small and Medium Agro-Industrial Enterprises. *Proceedings of the International Conference on Policies and Economics Measures for Agricultural Development (AgroDevEco 2020)*. <https://doi.org/10.2991/aebmr.k.200729.047>
15. Muñoz, M., Gil, J. D., Roca, L., Rodríguez, F., & Berenguel, M. (2020). An IoT Architecture for Water Resource Management in Agroindustrial Environments: A Case Study in Almería (Spain). *Sensors (Basel, Switzerland)*, 20. <https://doi.org/10.3390/s20030596>
16. Musina, D., Yangirov, A., & Kharitonov, S. (2022). Improvement of business processes of subjects of the agro-industrial complex through a digital platform. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 949. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/949/1/012023>

17. Reardon, T., & Barrett, C. (2000). Agroindustrialization, globalization, and international development an overview of issues, patterns, and determinants. *Agricultural Economics*, 23, 195–205. [https://doi.org/10.1016/S0169-5150\(00\)00092-X](https://doi.org/10.1016/S0169-5150(00)00092-X)
18. Ridoutt, B., Eady, S., Sellahewa, J., Simons, L., & Bektash, R. (2009). Water footprinting at the product brand level: case study and future challenges. *Journal of Cleaner Production*, 17, 1228–1235. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2009.03.002>
19. Ronzhin, A., & Savel'ev, A. I. (2022). Artificial Intelligence Systems for Solving Problems of Agro-Industrial Complex Digitalization and Robotization. *Agricultural Machinery and Technologies*. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-2-22-29>
20. Rossi, G. (2015). Achieving ethical responsibilities in water management: A challenge. *Agricultural Water Management*. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2014.07.030>
21. Vakulenko, D., & Kravets, A. (2021). REENGINEERING OF BUSINESS PROCESSES OF AGROINDUSTRIAL ENTERPRISES IN CONDITIONS OF THROUGH DIGITAL TRANSFORMATION. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2021-3-115-125>
22. Van Leeuwen, C., Frijns, J., Wezel, A., & Van Dijk, F. (2012). City Blueprints: 24 Indicators to Assess the Sustainability of the Urban Water Cycle. *Water Resources Management*. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0009-1>
23. Walsh, B. P., Cusack, D. O., & O'Sullivan, D. (2016). An industrial water management value system framework development. *Sustainable Production and Consumption*. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2015.11.004>
24. Zghurska, O., Korchynska, O., Rubel, K., Kubiv, S., Tarasiuk, A., & Holovchenko, O. (2022). DIGITALIZATION OF THE NATIONAL AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX: NEW CHALLENGES, REALITIES AND PROSPECTS. *Financial and Credit Activity Problems of Theory and Practice*. <https://doi.org/10.55643/fcaptp.6.47.2022.3929>
25. Zhai, Y., Xianfeng, T., Ma, X., Maoguo, A., Zhao, Q., Shen, X., & Hong, J. (2019). Water footprint analysis of wheat production. *Ecological Indicators*. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2019.02.036>

© 2024 por el autor. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).