



UNIVERSIDAD DE MURCIA

ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO

Digitalización de la toma de decisiones en el sector agrícola a través de un sistema de gestión de información basada en Internet de las Cosas

D. Juan Antonio López Morales

2021



Departamento de Ingeniería de la Información y las Comunicaciones

FACULTAD DE INFORMÁTICA

UNIVERSIDAD DE MURCIA

Digitalización de la toma de decisiones en el sector agrícola a través de un sistema de gestión de información basada en Internet de las Cosas

Tesis Doctoral

Presentada por:

JUAN ANTONIO LÓPEZ MORALES

Supervisada por:

DR. ANTONIO FERNANDO SKARMETA GÓMEZ

DR. JUAN ANTONIO MARTÍNEZ NAVARRO

MURCIA, OCTUBRE 2021

DEDICATORIA Y RECONOCIMIENTOS

Es difícil resumir en unas frases el devenir de este trabajo, dos referencias podrían resumir esta singladura, “El coraje no es tener la fortaleza de seguir adelante; es seguir adelante cuando no tienes la fuerza” de Theodore Roosevelt. El agradecimiento al apoyo recibido se puede ver reflejado en las palabras de John F. Kennedy “Siempre hay que encontrar el tiempo para agradecer a las personas que hacen una diferencia en nuestras vidas”. Por este motivo y aunque esta Tesis Doctoral lleva escrito mi nombre en su portada, nunca habría sido posible completarla sin el apoyo y la ayuda de muchas personas. Pido disculpas de antemano, porque sin duda, me olvidaré de algunos.

En primer lugar, me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a mis valedores, a mis directores de tesis. Al Dr. Antonio F. Skarmeta Gómez, gracias por confiar en mí, por hacerme descubrir la investigación, por dejarme trabajar con tu gran equipo, por soportarme y por tus sabios consejos. Y, al Dr. Juan Antonio Martínez Navarro no hay palabras para expresar mi gratitud, gracias, amigo, sin tu ayuda y confianza esto no hubiese sido posible. A ambos, gracias por su continuo apoyo en mi investigación, por su paciencia, su motivación y por compartir conmigo sus valiosos conocimientos. Su orientación me ayudó durante la investigación y la redacción de esta Tesis Doctoral. No podría haber imaginado tener mejores asesores y mentores para esta experiencia. Y sobre todo por conseguir hacer que lo imposible sea posible.

A continuación, deseo agradecer a las personas que han tenido cambios drásticos en sus vidas y que más se han sacrificado por este Doctorado, a mi esposa Carmen María, que ha sufrido este largo proceso y ha posibilitado la realización de esta Tesis. A mis hijos Adela y Rodrigo por mi falta de dedicación y cambios de humor, perdón. Gracias familia por el apoyo, os quiero.

A mis padres por su cariño, apoyo, oportunidades brindadas y por la confianza que me han dado siempre, habéis estado a mi lado con vuestro amor, atención y apoyo constantes, sin los cuales no me habría convertido en la persona que soy ahora. A mis hermanos por su paciencia y apoyo constante, con especial dedicación a mi hermana Belén por su tesón conmigo. Y a mis traductores particulares mi hermano Miguel Ángel y mi sobrina Laura.

A mis compañeros de la sala de Pleiades, Juan Andrés, Pedro y Manolo por aceptarme, por las numerosas ocasiones en las que me ayudaron a debatir, a corregir errores y a animarme, sois muy grandes y los mejores compañeros que pude tener en esta larga travesía.

A toda la familia de la empresa OdinS por compartir vuestros conocimientos y por la paciencia que habéis tenido.

A Francisco Laguna, de la Comunidad de Regantes de Miraflores (Jumilla), por enseñarme el funcionamiento de una comunidad y hacer que mi trabajo fuese más llevadero.

A mis compañeros del IMIDA del grupo SIGYT y SIAM por soportar mis malos momentos. En especial, a Manuel Erena y Manuel Caro por sus conocimientos agronómicos, su comprensión y por estar cerca cuando los necesite.

A todos vosotros os estoy agradecido y estaré siempre en deuda.

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
Índice de Tablas	v
Índice de Figuras	vi
1 Resumen	1
1.1 Motivación y Objetivos	1
1.1.1 Internet de las Cosas y la agricultura inteligente	2
1.1.2 Análisis de datos en el ámbito agrícola	5
1.2 Resultados	9
1.3 Organización de la Tesis	11
2 Summary	13
2.1 Motivation and Goals	13
2.1.1 Internet of Things and smart agriculture	14
2.1.2 Data analysis in agriculture	17
2.2 Results	20
2.3 Organisation of the Thesis	22
3 Contribuciones de la Tesis	23
3.1 Revisión del Estado del Arte	23
3.1.1 Modelos de Información específicos para agricultura	23
3.1.2 Diseño de arquitecturas basadas en IdC	27
3.1.3 El uso de sistemas basados en IdC mejora el sector agrícola	30
3.1.4 Hacia una agricultura digital aprovechando IdC y SIG	34
3.1.5 Análisis estado del arte	36
3.2 Análisis de Datos para entornos de Agricultura Inteligente	36
3.2.1 Sistemas de apoyo a la toma de decisiones agrícolas. Integración y análisis de datos [R1]	37
3.2.2 Modelo de datos holístico para la gestión de información en las comunidades de regantes [R2]	41

TABLA DE CONTENIDOS

3.2.3	Arquitectura basada en IdC interoperable y flexible [R3]	44
3.2.4	Automatización de modelos preventivos para eficiencia energética de pozos de riego [R4]	50
3.2.5	Adaptabilidad geográfica de frutales de hueso según variabilidad climática [R5]	54
3.3	Lecciones Aprendidas	57
3.4	Conclusiones y Trabajos Futuros	59
4	Publicaciones que componen la Tesis Doctoral	63
4.1	Digital Transformation of Agriculture through the Use of an Interoperable Platform	63
4.2	Improving Energy Efficiency of Irrigation Wells by Using an IoT-Based Platform .	64
4.3	Climate-Aware and IoT-Enabled Selection of the Most Suitable Stone Fruit Tree Variety	66

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	Página
1.1 Relación entre las publicaciones y los objetivos propuestos.	11
2.1 Relationship between publications and proposed objectives.	22
3.1 Datos procedentes de las instalaciones de la comunidad de regantes de Miraflores. . .	38
3.2 Zonas climáticas y datos medios más representativos de la Región de Murcia.	40
3.3 Tiempo medio de respuesta (ms) para cada tipo de operación y modo.	49

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	Página
3.1 Capas que conforman una arquitectura basada en IdC.	28
3.2 Coste energético según periodo de facturación y bombeo.	39
3.3 Modelo de información para la mejora de la toma de decisiones agrícolas.	42
3.4 Representación de una estación climática conforme a NGSI-LD.	45
3.5 Distribución de las capas que definen la arquitectura propuesta.	46
3.6 Definición de reglas para alertar del nivel de eficiencia de cada bombeo.	52
3.7 Eficiencia del bombeo del día anterior y de la media de los últimos siete días.	53
3.8 Esquema para instanciar la arquitectura y determinar idoneidad geográfica.	55
3.9 Niveles de humedad del suelo para monitorizar el estrés hídrico.	56
3.10 Índices NDVI y NDWI para el seguimiento por satélite del estado de los cultivos.	56
3.11 Visor para la recomendación de implantar grupos varietales en una zona determinada y la evolución de las variables climáticas (actuales e históricas) en el área seleccionada.	57

LISTADO DE ACRÓNIMOS

- EEB** Eficiencia Energética del Bombeo
- ETSI** European Telecommunications Standards Institute
- FAO** Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
- IdC** Internet de las Cosas
- JSON** JavaScript Object Notation for Linked Data
- JSON** JavaScript Object Notation
- NDVI** Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
- NGSI** Next Generation Service Interfaces
- NGSI-LD** Next Generation Service Interfaces with Linked Data
- ODS** Objetivos de Desarrollo Sostenible
- OGC** Open Geospatial Consortium
- ONU** Organización de las Naciones Unidas
- SAREF** Smart Appliances REference
- SCADA** Supervisión Control y Adquisición de Datos
- SIG** Sistemas de Información Geográficos
- SWE** Sensor Web Enablement

RESUMEN

En este capítulo se describe el objeto y la justificación de los diferentes apartados que se incluyen en esta Memoria de Tesis Doctoral. Para ello se define el ámbito de actuación, objetivos, así como, un resumen de las principales aportaciones realizadas.

1.1 Motivación y Objetivos

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), los alimentos y la agricultura generan desconfianza en relación al uso y sostenibilidad. Las mayores preocupaciones surgen en relación a factores tales como: crecimiento de la población, avances tecnológicos, mejora de la trazabilidad, escasez de recursos naturales, así como, los efectos que el cambio climático pueda producir en el sector agroalimentario¹.

Estos condicionantes junto con los avances tecnológicos actuales nos permite mejorar la producción y distribución de alimentos y de esta manera, generar mecanismos que ayudan al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)² establecidos en la Agenda 2030 por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), tales como: energía asequible y no contaminante (ODS 7), industria innovación e infraestructuras (ODS 9) o ciudades y comunidades sostenibles (ODS 11).

En base a lo anteriormente expuesto y vinculado al incremento de la población mundial y reducción de recursos alimentarios disponibles, es necesario la optimización de los métodos agrícolas con el objetivo de facilitar la realización de las tareas agrícolas transformando las explotaciones agrarias en sistemas de producción eficientes que garanticen la sostenibilidad con el medioambiente [7]. Con el objetivo de aprovechar los procesos de digitalización del sector agro-

¹<http://www.fao.org/3/I8429EN/i8429en.pdf>

²<https://www.un.org/sustainabledevelopment/>

alimentario la FAO promueve la creación de una Plataforma Internacional para la Alimentación y la Agricultura Digitales³. Su principal objetivo es facilitar el intercambio de conocimientos y experiencias sobre las mejores prácticas y enfoques en materia de políticas agrarias.

A medida que la agricultura se vuelve más intensiva, tener acceso a información precisa adaptada a lugares y condiciones específicas es imprescindible para mejorar la eficiencia de las explotaciones agrícolas. Por ello, el sector tiene que estar preparado para capturar, almacenar y procesar grandes conjuntos de datos de diferentes orígenes y desarrollar aplicaciones capaces de responder de forma eficiente a las necesidades del sector. Las soluciones desarrolladas deben convertir la información en conocimiento y facilitar a los agricultores la toma de decisiones en las explotaciones agrícolas, evolucionando así desde una agricultura intuitiva a una agricultura científica e inteligente.

En este contexto de innovación, la transformación digital de la agricultura forma parte de la denominada *Cuarta Revolución Industrial* que, como principios básicos, abordan aspectos relacionados con la Agricultura 4.0 [8], basada en el uso de tecnologías innovadoras para la producción de más por menos. Más recientemente, el término “Smart Farming” se utiliza, también, desde la perspectiva de un desarrollo que prioriza el uso de las tecnologías de la información y la comunicación en el ciclo de gestión digital de las explotaciones, mediante el uso de nuevas tecnologías como el Internet de las Cosas (IdC), la Computación en la Nube, la Inteligencia Artificial o el uso de Macrodatos.

Esta Memoria de Tesis Doctoral comprende la integración de diferentes tecnologías para la adquisición, tratamiento y análisis de los datos con el objetivo de unificar información aislada y no relacionada entre sí, con el objetivo de facilitar la toma de decisiones de las explotaciones agrícolas y de esta forma manera promover un uso más eficiente de los recursos naturales disponibles.

1.1.1 Internet de las Cosas y la agricultura inteligente

Hoy en día, estamos inmersos en una época donde las tecnologías digitales de nueva generación se han convertido en parte integrante de todas las esferas de la vida humana y en la columna vertebral de cualquier sector productivo. El Análisis masivo de Datos, la Robótica, la Inteligencia Artificial, IdC o la Biotecnología, han dejado de ser novedosas y se han convertido en tecnologías que debemos aprender a gestionar de forma eficaz.

El término IdC describe una vía de desarrollo tecnológico en la que, mediante Internet, cada objeto de nuestra vida cotidiana puede tener la capacidad de adquirir una identidad en el mundo digital; abarcando dispositivos, sensores, actuadores o servicios que conectan simultáneamente el mundo físico con el mundo real. En la base del IdC están los *objetos inteligentes* que se caracterizan por tener autoconciencia, interacción con el entorno y procesamiento de datos, así como la capacidad de conectar y comunicar la información almacenada, recogida o procesada. Los objetos inteligentes están dotados de capacidades de detección e interacción que les permiten

³<http://www.fao.org/3/ne804es/ne804es.pdf>

captar información sobre el mundo real con un elevado nivel de detalle, permitiendo que la información fluya entre los diferentes dispositivos y se convierta en una nueva forma de riqueza, disminuyendo costes y promoviendo un uso eficiente de los recursos disponibles. Cada uno de estos objetos tiene una dirección IP, o una identidad en Internet. La posibilidad de dotar a todos los dispositivos de una identidad digital y con conectividad entre ellos en la red abre un mundo de nuevas oportunidades, despertando un interés creciente por parte de gobiernos, centros de investigación y empresas.

El sector agrícola es, sin duda, uno de los campos donde la aplicación de IdC constituye la piedra angular de una agricultura inteligente que permite el establecimiento de conexiones entre los agricultores, independientemente de sus distancias geográficas. Con la ayuda de estas conexiones, se puede mejorar el conocimiento sobre los patrones de crecimiento de los cultivos o desarrollar técnicas agrícolas novedosas [9]. El IdC puede contribuir a la transformación de la industria agroalimentaria y permitir a los agricultores aumentar la producción y calidad de sus cosechas a costes competitivos. Las técnicas agrícolas basadas en IdC permiten aumentar la productividad de los cultivos y crear economías de escala para los agricultores. La introducción de estas tecnologías es de gran interés, especialmente con los recientes desafíos medioambientales a los que se enfrentan los agricultores tales como el aumento de la escasez de agua en muchas regiones del mundo, la introducción de cultivos y la disminución de disponibilidad de tierras óptimas para el cultivo.

Las soluciones tecnológicas basadas en IdC que pueden resolver los problemas del sector, estarán ligadas al empleo de técnicas de agricultura de precisión. El objetivo de la agricultura de precisión es la obtención de mayores rendimientos económicos, medioambientales y sociales, aumentando la competitividad a través de una mayor eficiencia en las prácticas agrícolas y que supone el manejo diferenciado de los cultivos a partir del conocimiento de la variabilidad existente en una explotación agrícola [10].

La implementación de cualquier tecnología conlleva desafíos. Los principales retos para la adopción de sistemas basados en IdC en la agricultura se resumen en:

- El elevado número de nuevos dispositivos y su uso en entornos inimaginables van a dar origen a un aumento de las fuentes de datos que deben ser procesadas y tratadas. Cuando se integren las diferentes fuentes de datos los agricultores actualizarían la información recopilada, podrán predecir algunos problemas que pueden surgir en el futuro.
- Mejora la eficiencia de los recursos, la productividad, los procesos medioambientales, la salud y el bienestar del sector y proporcionar herramientas para mitigar el cambio climático.
- Diseño metodologías y algoritmos para la organización y análisis de los diferentes conjuntos de datos heterogéneos que permitan el desarrollo de modelos que resuelvan problemas específicos.

- Construcción de plataformas digitales seguras y flexibles que resuelvan los problemas de interoperabilidad entre sistemas.
- Definir mecanismos que faciliten la interpretación significativa y precisa de los resultados mediante el desarrollo de sistemas de apoyo a la toma de decisiones capaces de inferir conocimiento cualificado a los usuarios.

1.1.1.1 Uso de plataformas basadas en IdC

En la actualidad, se están incrementando los sistemas que incluyen dispositivos distribuidos en múltiples ubicaciones que, a su vez, generan un elevado volumen de datos que deben ser recogidos, procesados y analizados para ser expuestos a los usuarios finales. Para este tipo de aplicaciones, resulta necesario integrar los conjuntos de información en una plataforma de gestión y análisis de datos que pueda cumplir con los requisitos de escala y rendimiento.

Una plataforma basada en IdC es una agregación de tecnologías que proporcionan la infraestructura necesaria para conectar de forma segura cualquier tipo de dispositivo o servicio con el objetivo de generar un ecosistema propio que permita la mejora en la toma de decisiones. Su misión principal es conectar los datos provenientes de la red de sensores y proporcionar información útil haciendo uso de interfaces de usuario que mejoran la toma de decisiones. Este tipo de plataformas se caracterizan por ofrecer un conjunto de propiedades que las diferencian de otros sistemas, entre las que destacamos:

- *Interoperabilidad*, deben ser comunicables, operables y programables entre dispositivos, independientemente de la marca, el modelo o el fabricante. El objetivo es que la conectividad entre los diferentes dispositivos o servicios funcione de manera independiente del equipo informático utilizado.
- *Modularidad*, los nuevos componentes implantados deben ser tratados como módulos o subsistemas; siendo viable y sencilla la integración en el conjunto de la plataforma. Los subsistemas implantados deben permitir el incremento de funcionalidades y servicios. De igual forma, deben contemplar el incremento de prestaciones necesarias para poder atender tanto al incremento de servicios como al número de usuarios que accedan a los mismos.
- *Escalabilidad*, a medida que las necesidades crecen, la plataforma debe tener la capacidad de reaccionar y adaptarse a las nuevas necesidades sin perder calidad, sin comprometer la integridad, seguridad, fiabilidad y funcionalidad de la solución propuesta. Para evitar imprecisiones, es clave implantar un sistema que pueda crecer con la organización y adaptarse a los cambios.
- *Seguridad*, deben comprender las posibles amenazas a la seguridad y abordarlas para garantizar que sus datos no se vean comprometidos. Hay que asegurar tanto los datos como

los canales de comunicación, ya que los dispositivos pueden enviar grandes cantidades de datos sensibles y los usuarios finales, también, pueden tener la capacidad de controlar directamente un dispositivo. Además, tienen que ser capaces de gestionar la privacidad de los conjuntos de datos durante todo su ciclo de vida.

- *Fiabilidad*, debe ser estable y fiable desde el punto de vista de los servicios, además, deben ofrecer soluciones de conmutación por error y recuperación de desastres. Es difícil confiar en los datos si las conexiones son irregulares, la plataforma no es fiable o el procesamiento de los datos lleva mucho tiempo.

El uso de plataformas basadas en IdC permite aumentar la productividad y crear un ecosistema digital que relacione personas y *cosas*, generando un flujo de datos seguro entre personas, sistemas y cosas conectadas. Además, el uso de plataformas de IdC nos permite disponer de capacidades analíticas como motores de reglas, procesamiento de flujos de eventos complejos, aprendizaje automático y visualización de datos que ayuda a mejorar la toma de decisiones generando soluciones idóneas para cada problema.

Al capturar los datos de los diferentes dispositivos y permitir la integración con los datos de otras fuentes externas, las plataformas basadas en IdC facilitan las mejoras operativas en áreas como el mantenimiento predictivo y la visibilidad de las explotaciones agrícolas basada en el seguimiento y la localización.

1.1.2 Análisis de datos en el ámbito agrícola

Las tecnologías de digitalización permiten procesar grandes volúmenes de datos que a su vez son la materia prima que alimenta las diversas aplicaciones que ayudan al agricultor en la optimización de la toma de decisiones.

Los datos recogidos por los dispositivos que podemos encontrar en las explotaciones agrícolas vienen caracterizados por: volumen, existe un elevado número de sensores generando información en continuo; variedad, los sensores determinan diferentes parámetros y son de diferentes fabricantes; y velocidad a la que generan los datos, el conocimiento de los mismos nos permite la generación de modelos de datos que permitan un mejor aprovechamiento y difusión de la información procedente de estos dispositivos [11]. En base a lo anterior, surge la necesidad de generar mecanismos de interoperabilidad que permitan la integración de diferentes dispositivos, aplicaciones o plataformas para eliminar los silos de información que muchos sistemas están produciendo [12].

Los datos se analizan y se transforman en información significativa utilizando herramientas de análisis. El análisis de datos ayuda a analizar las condiciones de las explotaciones agrícolas, la gestión de los recursos y el desarrollo de los cultivos. Gracias a la integración-análisis de los datos recogidos y al uso de las innovaciones tecnológicas es posible mejorar la toma de decisiones. El elevado volumen de datos obtenida debe analizarse para identificar patrones y

obtener información sobre el funcionamiento del sistema agrario. Los análisis suelen implicar la aplicación de técnicas estadísticas, debido al gran volumen de datos generado. Sin embargo, el análisis de los datos implica mucho más que poner la información en manos de los técnicos expertos; se trata de mejorar el conocimiento en estrecha colaboración con los productores de los datos y generar beneficios dentro de la cadena de valor de cada sector.

Debido al número y variabilidad de los datos obtenidos en el sector agrícola [13], aún siendo consciente de que todos ellos no se analizan, surgen dificultades para desarrollar mecanismos que generen la mejor decisión posible. Lo importante no es la cantidad de datos que disponemos, sino lo que hacemos con ellos. Los datos deben analizarse para obtener información que permita adoptar las mejores decisiones y obtener así, una ventaja competitiva. En base al gran volumen de datos que el sector agrícola puede tener a su disposición, identificamos desafíos en lo referente a la gestión de los mismos:

- Integración de múltiples fuentes de datos

Los datos necesarios para gestionar una explotación agrícola proceden de diversas fuentes, a menudo con diferentes formatos y calidad, por lo que es necesario integrar y analizar los datos procedentes de dichas fuentes inconexas, la no integración provocará un análisis incompleto o inexacto de la información resultante [14]. Con un sistema completo y centralizado, se tendrá acceso a todo tipo de información en un solo lugar y de esta manera, no solamente se reduce el tiempo dedicado a acceder a las fuentes, sino que se permite realizar comparaciones cruzadas y garantizar una visión global de la explotación.

Por tanto, se hace necesario un sistema que recoja y organice de forma automática la información. Un sistema automatizado permitirá a los técnicos emplear el tiempo que dedican a procesar los datos en actuar sobre ellos. El procesamiento, la integración y la exportación de los datos recogidos de fuentes tan heterogéneas puede realizarse mediante el uso de plataformas de datos abiertos.

- Falta de calidad de los datos

Los datos son esenciales para mejorar la toma de decisiones, por lo que si éstos no son de alta calidad, las decisiones se verán directamente afectadas. No hay nada más perjudicial para el análisis de datos que estos sean inexactos y generen decisiones erróneas. Una de las principales causas de los datos inexactos son los errores manuales cometidos durante la introducción de datos. Esto puede tener consecuencias negativas importantes si el análisis se utiliza para condicionar la toma de decisiones. Otro problema es la asimetría de los datos: cuando la información de un sistema no refleja los cambios realizados en otro sistema, dejándola desfasada.

El uso de sistemas centralizados y la automatización de la limpieza de los mismos debe mejorar la calidad de los datos. Los datos pueden introducirse automáticamente con campos

obligatorios o desplegados con comprobaciones de calidad, lo que limita el error humano. La integración de los sistemas debe garantizar que un cambio en un área se refleje instantáneamente en todo el sistema. Además, mediante el uso de informes y alertas generados de forma continua, los responsables de la toma de decisiones pueden estar seguros de que la solución adoptada está basada en información completa y precisa.

- Adecuación del uso de series temporales

Muchos de los métodos tradicionales de previsión utilizan análisis de series temporales que se basan en datos históricos y modelos estadísticos para generar modelos de previsión. Estos modelos aprenden los patrones históricos de la demanda y utilizan las tendencias pasadas como base para predecir la demanda futura. Sin embargo, estos métodos de previsión plantean dos grandes retos: la suposición de que las tendencias pasadas son estables y el nivel de granularidad requerido de la previsión y su correspondiente precisión.

Una forma de abordar las limitaciones que plantea el análisis convencional de series temporales es la aplicación de algoritmos de aprendizaje automático a los datos agrícolas. Con este enfoque, se pueden descubrir nuevos patrones de comportamiento agrícola, tanto históricamente como en tiempo real, mediante el análisis de patrones multi-producto.

- Diversas representaciones para un mismo dato

Para que el manejo y almacenamiento de los datos sea uniforme es importante proporcionar una estandarización en el formato. Debido a la falta de compatibilidad necesaria para gestionar la gran cantidad de datos que el sector agrícola genera, surge la necesidad de proporcionar a los gestores agrícolas modelos de información unificados que permitan a los agricultores mejorar la toma de decisiones, permitiéndoles aprovechar la información derivada de sus datos y el conocimiento ya adquirido.

Los modelos de información proporcionan un marco para desarrollar e implementar de forma homogénea una base de datos agrícola y compartir información entre técnicos, proporcionando al mismo tiempo una herramienta útil para la comunidad agrícola. Además, las ontologías de dominio permiten representar conceptos específicos asociados a estos dominios y facilitar la gestión de conocimiento especializado como el proporcionado por los dispositivos, garantizando así que los datos sean correctamente asimilados y permitiendo la integración de los mismos. Una alternativa para compartir y reutilizar datos y recursos agrícolas, proporcionando interoperabilidad entre repositorios, enriqueciendo los contenidos y que permite explorar grandes conjuntos de datos es el uso de datos enlazados (Linked Data) y nos posibilita publicar datos estructurados e interconectarlos haciendo uso de un vocabulario único [15].

Es por ello que la analítica de datos desempeña un papel fundamental, pero solo cuando se invierte en una arquitectura de datos que satisfaga las necesidades del sector, permita la

escalabilidad y la colaboración, y permita que la clasificación y la gestión de los datos sean altamente eficientes. No hay que olvidar que la analítica de datos tiene que actuar en el presente, pero siempre pensando en el futuro. Esto conlleva que hay que generar servicios a partir de modelos basados en datos y, al mismo tiempo, crear una estructura de datos eficaz para el futuro.

En resumen, el objetivo de esta Memoria de Tesis Doctoral es situar al agricultor en el centro del proceso de transformación digital del sector, optimizando su toma de decisiones mediante el acercamiento y uso de tecnologías basadas en IdC. Este trabajo integra diferentes conjuntos de datos, perfecciona la analítica de los mismos, con el fin de mejorar la eficiencia de las explotaciones agrícolas, el uso sostenible de los recursos disponibles y la productividad de los cultivos.

Son diversos los obstáculos que el sector agrícola tiene que superar para que el proceso de digitalización se generalice con el objeto de reducir los posibles inconvenientes, por ello, esta Tesis Doctoral tiene dos objetivos claros. Por una parte, dar sentido a la enorme cantidad de datos que genera el sector y a la ausencia de análisis que imposibilita su interpretación para mejorar el rendimiento de sus explotaciones. Y, por otra parte, integrar toda la información en una plataforma abierta e interoperable capaz de mejorar la toma de decisiones basadas en datos agrícolas.

Basándonos en los objetivos generales descritos, anteriormente, definimos los objetivos concretos alcanzados en la elaboración de esta Tesis Doctoral:

- O1. Reconocer y agregar aquellos conjuntos de datos relativos a la gestión de los recursos naturales de las explotaciones agrícolas. Desplegar arquitecturas estandarizadas que sean capaces de gestionarlos.
- O2. Analizar, adaptar y mejorar los modelos de información existentes y, si es necesario, introducir nuevos modelos para el sector agroalimentario que faciliten el intercambio de datos y la interoperabilidad de los mismos.
- O3. Uso de una plataforma abierta siguiendo un modelo de capas para permitir, por un lado, la flexibilidad en su diseño y al tiempo la modularización de sus componentes que posibiliten diferentes tipos de despliegues en función de los escenarios de infraestructuras inteligentes que deseemos abordar.
- O4. Procesado inteligente de datos para la extracción de patrones y modelos del sistema bajo monitorización. Estos modelos servirán para proporcionar valores predictivos, y formarán parte del proceso de optimización del sector.
- O5. Implementar herramientas de ayuda a la toma de decisión sobre los cultivos, gestión del agua para riego y eficiencia energética, junto con la puesta en marcha de servicios asociados con la integración de datos en sus diferentes aspectos técnicos, institucionales, jurídicos y sociales.

1.2 Resultados

La mayor parte del trabajo realizado está basado en la exploración y análisis de los datos generados por los escenarios de IdC para mejorar la gestión de los escasos recursos naturales utilizados por el sector agrícola y mejorar la toma de decisiones. Uno de los principales logros de este trabajo ha sido la identificación de diferentes conjuntos de datos heterogéneos con los que se pueden abordar la toma de decisiones de forma anticipada. Dichos datos por sí solos no sirven de mucho, es la información interpretada mediante el uso de analíticas lo que proporciona al agricultor una herramienta útil en la toma de decisiones. Otros análisis están centrados en la determinación del tipo de arquitecturas basadas en IdC más idóneas para mejorar la toma de decisiones sobre la eficiencia hídrica de las explotaciones agrícolas y la adaptabilidad geográfica de nuevos grupos varietales. A la misma vez, se desarrollaron sistemas de adquisición de datos utilizando dispositivos IdC, incluyendo la monitorización inteligente de la climatología, así como la adquisición de contenido de diferentes fuentes.

El desarrollo de sistemas integrados para la gestión agrícola es una tarea difícil debido a las características específicas del sector (diferentes tipos de explotaciones, ubicaciones remotas o escasas inversiones en software) y a los complejos procesos biofísicos que deben ser controlados por los técnicos responsables. Otro inconveniente a tener en cuenta es el volumen de información a recopilar, junto con la variedad de componentes de diversos proveedores a integrar para poder particularizar las soluciones. Por estos motivos, para la realización de esta Tesis Doctoral se han utilizado varios conjuntos de datos, siendo la fuente principal de información la Comunidad de Regantes de Miraflores (Jumilla)⁴. Los datos recogidos provienen de fuentes diversas: información cartográfica, sistema de control SCADA, sensores planta-suelo, consumos eléctricos o facturación energética. Los datos han sido recogidos durante las dos últimas campañas agrícolas 2019 y 2020. Aunque, para un mejor análisis de los datos de consumo energético se han evaluado datos de los últimos cinco años.

Otra fuente de información ha sido la recopilación de información climatológica de diferentes zonas productoras de frutales de hueso de España, procedente en su mayor parte de la Red de Estaciones Agrometeorológicas (SIAR)⁵ del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente del Gobierno de España. Concretamente, se han utilizado 261 estaciones automáticas que al menos tienen registrados 15 años continuos de datos. Los datos tienen una periodicidad horaria por lo que, en total, se evaluaron cerca de 41 millones de observaciones de las variables temperatura, humedad, precipitación y viento.

Por tanto, el propósito de utilizar estos conjuntos de datos viene dado por la necesidad de construir un sistema basado en IdC que mejore la toma de decisiones del sector agrario. En esta Memoria de Tesis presentamos el proceso para definir una herramienta precisa de monitorización agrícola basada en IdC, utilizando métodos de prototipado extraídos de la experiencia de los

⁴<http://www.crmiraflores.es/>

⁵<https://eportal.mapa.gob.es/websiar/Inicio.aspx>

técnicos especialistas en los procesos agrícolas.

Tras la recopilación de los conjuntos de datos y estudio de las posibles relaciones se definieron modelos de información basados en la Interfaz de Servicio de Nueva Generación para Datos Enlazados NGS-LD ⁶ que permiten mitigar la ausencia de compatibilidad necesaria para gestionar el gran volumen de datos que se producen y generar un vocabulario único. El modelo de datos propuesto se ha desarrollado en dos fases. En la primera, se centró en la gestión de las parcelas de cultivo teniendo en cuenta los cuatro pilares que las sustentan: la propia variedad del cultivo, el tipo de suelo, la climatología y los sensores que permiten monitorizar su evolución. En una fase posterior, se integró la información relativa a la gestión energética de los bombeos de agua, con el objetivo de monitorizar en continuo indicadores de eficiencia, como los utilizados en las auditorías energéticas que se deben realizar en las comunidades de regantes y prevenir posibles mermas de rendimiento en los pozos.

Una vez definido el modelo de información, se define una arquitectura modular que va desde el despliegue de sensores y el seguimiento de técnicas de extracción de datos hasta el procesamiento inteligente de datos para proporcionar información útil que mejore para la acción de los diferentes elementos que forman parte de la finca. Cada una de estas capas se basa en iniciativas abiertas y estándar como la proporcionada por la Comunidad FIWARE ⁷.

El modelo de información y la arquitectura propuesta dieron forma a una plataforma abierta e interoperable basada en IdC que mejora la toma de decisiones del sector agrícola. Además, representa un punto de acceso único para la integración de la información relevante de una explotación agrícola, ya que es capaz de unificar fuentes de datos heterogéneas de diferentes proveedores.

El despliegue principal de la plataforma se llevó a cabo en la Comunidad de Regantes de Miraflores donde se integraron todas las islas de información en un único repositorio enlazado que mejora la gestión de la propia comunidad. También, se diseñó una especie de semáforo que indica la eficiencia de los pozos de riego, dando como resultado que dos de ellos funcionaban de forma deficiente, lo que generaba un mayor consumo de energía para obtener un menor volumen de agua. Se estima que el ahorro energético en la campaña agrícola 2019 fue del 10%, con un ahorro estimado de 43.500 €, gracias a la monitorización y análisis de los indicadores de rendimiento energético.

La plataforma, además, proporciona información a los técnicos sobre la idoneidad climática para la plantación o no de los frutales de hueso en una determinada ubicación, lo que determinará que el cultivo se adapte mejor a la zona y requiera de menos técnicas de cultivo (influencia humana), y obteniendo un cultivo más sostenible. Gracias a la verificación de tendencias climáticas, biofísicas, fenológicas o agronómicas, se determina la evolución agroclimática necesaria para monitorizar un determinado grupo varietal.

⁶https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/CIM/001_099/009/01.01.01_60/gs_CIM009v010101p.pdf

⁷<https://www.fiware.org/developers/catalogue/>

Esta Memoria de Tesis Doctoral ha propuesto herramientas y servicios con el fin de mejorar la transformación digital y superar la brecha digital del sector agrícola, dando como resultado una infraestructura basada en IdC que permite gestionar mejor los recursos de los que disponen los agricultores y tomar las decisiones de forma más eficiente. Los análisis realizados demuestran la viabilidad del uso de plataformas basadas en IdC para mejorar la toma de decisiones en el sector agrícola, tanto en el despliegue en una comunidad de regantes, como para la toma de decisiones sobre la idoneidad climática para la adopción de nuevas variedades en nuevas zonas de cultivo. Gracias al uso del sistema propuesto se ha demostrado que es posible mejorar el mantenimiento preventivo de las instalaciones hídricas de una comunidad de regantes y, por tanto, mejorar la eficiencia de los recursos junto con una reducción de los costes energéticos.

En la Tabla 1.1 se muestran los resultados obtenidos en esta Tesis y la relación con los objetivos propuestos. En el Capítulo 3 se explica en mayor detalle como se consiguieron dichos resultados, y los detalles de la arquitectura abierta e interoperable basada en IdC utilizada para mejorar la toma de decisiones del sector agrícola.

Tabla 1.1: Relación entre las publicaciones y los objetivos propuestos.

Nb	Resultado	Objetivo	Artículos
R1	Reconocer e integrar los conjuntos de datos que tienen relación con la gestión del agua y la eficiencia energética en una comunidad de regantes. Análisis de las propiedades de dichos datos y sus posibles relaciones mediante procesos estadísticos.	O.1	[1, 2] [3, 4]
R2	Comparación de modelos de información y técnicas de representación para intercambio de datos para mejorar la gestión hídrica de las explotaciones agrícolas.	O.2	[1]
R3	Uso de plataforma abierta e interoperable basada en IdC como medio para facilitar la transformación digital del sector. Integrando los diferentes conjuntos de datos necesarios para mejorar la eficiencia de las explotaciones agrícolas y la toma de decisiones.	O.3	[1, 2, 5] [4, 6]
R4	Automatización de las auditorías energéticas realizadas en las comunidades de regantes para mejorar la eficiencia y consumo energético. Adecuación de dichos datos a modelos de información.	O.4	[2]
R5	Desarrollo de una metodología para la mejor adaptabilidad climática de los frutales de hueso mediante el análisis de los parámetros biofísicos de los grupos varietales.	O.5	[5] [3]

1.3 Organización de la Tesis

La elaboración de esta tesis se organiza como un compendio de trabajos previamente publicados. El primer capítulo describe la motivación para la realización de la tesis, así como, los objetivos

propuestos, una breve reseña de los resultados obtenidos y como estos objetivos se ven plasmados en las publicaciones.

El segundo capítulo muestra el trabajo relacionando las publicaciones mediante una introducción, junto con los problemas que pretenden resolver en el ámbito agrícola y los resultados obtenidos. También, se mencionan las conclusiones del trabajo.

Por último, el tercer capítulo está formado por los tres trabajos de investigación publicados en revistas científicas y su relación con los objetivos propuestos en esta tesis. A cada uno de los artículos se le añade una breve reseña con las características más relevantes de la publicación.

SUMMARY

This chapter describes the purpose and justification of the different sections included in this Doctoral Thesis Report. For this purpose, the scope of action, objectives and a summary of the main contributions are defined.

2.1 Motivation and Goals

According to the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), food and agriculture generate mistrust about use and sustainability. The most significant concerns arise concerning factors such as population growth, technological advances, improved traceability, scarcity of natural resources, and the effects that climate change may have on the agri-food sector.¹

These conditioning factors, together with current technological advances, allow us to improve food production and distribution and thus generate mechanisms that help to meet the Sustainable Development Goals (SDGs)² established in the 2030 Agenda by the United Nations (UN), such as affordable and clean energy (SDG 7), industry innovation and infrastructure (SDG 9) or sustainable cities and communities (SDG 11).

Based on those as mentioned above and linked to the increase in the world population and the reduction of available food resources, it is necessary to optimise agricultural methods to facilitate the performance of farming tasks by transforming farms into efficient production systems that guarantee environmental sustainability [7]. In order to take advantage of the digitalisation processes in the agri-food sector, the FAO is promoting the creation of an International Platform

¹<http://www.fao.org/3/I8429EN/i8429en.pdf>

²<https://www.un.org/sustainabledevelopment/>

for Digital Food and Agriculture³. Its main objective is to facilitate the exchange of knowledge and experience on best practices and approaches to agricultural policies.

As agriculture becomes more intensive, having access to timely and accurate information tailored to specific locations and conditions is critical to help farmers improve the efficiency of agricultural production. The sector, therefore, needs to be prepared to capture, store and process large data sets from different sources and develop applications capable of responding efficiently to the sector's needs. The solutions developed must convert information into knowledge and facilitate farmers' on-farm decision-making, thus evolving from intuitive farming to scientific and smart farming.

In this context of innovation, the digital transformation of agriculture is part of the so-called *Fourth Industrial Revolution*, which, as basic principles, addresses aspects related to Agriculture 4.0 [8], based on the use of innovative technologies for the production of more for less. More recently, the term "Smart Farming" is also used from the perspective of a development that prioritises the use of information and communication technologies in the digital management cycle of farms through the use of new technologies such as the Internet of Things (IoT), Cloud Computing, Artificial Intelligence or Big Data.

This Doctoral Thesis includes integrating different technologies for the acquisition, processing and analysis of data to unify isolated and unrelated information to facilitate decision-making on farms and thus promote more efficient use of available natural resources.

2.1.1 Internet of Things and smart agriculture

Today, we are immersed in an era where new-generation digital technologies have become an integral part of all spheres of human life and the backbone of any productive sector. Big Data, Robotics, Artificial Intelligence, IoT, Blockchain and Biotechnology are no longer new and have become technologies that we must learn to manage competently.

The term IoT describes a path of technological development in which, through the Internet, every object in our daily lives can have the ability to acquire an identity in the digital world, encompassing devices, sensors, actuators or services that connect in real-time the physical world with the real world. At the core of the IoT are smart objects characterised by self-aware characteristics, interaction with the environment and data processing, and the ability to connect and communicate stored, collected or processed information. Smart objects are endowed with detection and interaction capabilities that allow them to capture information about the real world at a level of detail, allowing information to flow between different devices and become a new form of wealth, lowering costs and promoting the efficient use of available resources. Each of these objects has an IP address or an identity on the Internet. The possibility of providing all devices with a digital identity and connectivity between them on the network opens up a world of new opportunities, arousing growing interest from governments, research centres and companies.

³<http://www.fao.org/3/ne804es/ne804es.pdf>

The agricultural sector is undoubtedly one of the fields where IoT is the cornerstone of smart agriculture, enabling connections between farmers, regardless of their geographical distances. With the help of these connections, knowledge about crop growth patterns can be improved or novel farming techniques can be developed. IoT is well-positioned to transform the agri-food industry and enable farmers to increase the production and quality of their crops at competitive costs. IoT-based farming techniques can increase crop productivity and create economies of scale for farmers. The introduction of these technologies is of great interest, especially with the recent environmental challenges facing farmers, such as increasing water scarcity in many regions of the world, introducing crops, and decreasing the availability of optimal land for cultivation.

IoT-based technology solutions that can solve problems in the sector will be linked to precision farming techniques. Precision agriculture aims to obtain higher economic, environmental and social yields, increasing competitiveness through greater efficiency in agricultural practices and involving the differentiated management of crops based on knowledge of the variability existing on a farm.

The implementation of any technology involves challenges. The main challenges for the adoption of IoT-based systems in agriculture can be summarised as follows:

- Many new devices and their use in unimaginable environments will increase data sources to be processed and treated. When integrating the different data sources, farmers will be able to update the information collected; they will predict some problems that may arise in the future.
- Improve resource efficiency, productivity, environmental processes, health and welfare of the sector and provide tools to mitigate climate change.
- Design methodologies and algorithms for the organisation and analysis of different heterogeneous datasets to develop models that solve specific problems.
- Building secure and flexible digital platforms that solve interoperability problems between systems.
- Defining mechanisms that facilitate meaningful and accurate interpretation of results by developing decision support systems that can infer qualified knowledge to users.

2.1.1.1 Use of platforms based on IoT

Today, there is an increasing number of systems that include distributed devices in multiple locations that, in turn, generate a high volume of data that must be collected, processed and analysed to be exposed to end-users. For such applications, it is necessary to integrate the information sets into a data management and analytics platform that can meet the scale and performance requirements.

An IoT-based platform is an aggregation of technologies that provide the infrastructure to securely connect any device or service to create an ecosystem of its own to enable improved decision making. Its primary mission is to connect data to the sensor network and provide valuable information using user interfaces that improve decision-making. This type of platform is characterised by offering a set of properties that differentiate it from other systems, among which we highlight:

- *Interoperability* must be interconnected, operable and programmable between devices, regardless of make, model or manufacturer. The aim is for connectivity between different devices or services to work independently of the hardware used.
- *Modularity* the newly implemented components must be treated as modules or subsystems, being feasible and easy to integrate into the platform as a whole. The implemented subsystems must allow the increase of functionalities and services. Likewise, it must contemplate the increase in features necessary to cater to both the increase in services and the number of users accessing them.
- *Scalability* as needs grow, the platform must have the capacity to react and adapt to new needs without losing quality, without compromising the integrity, security, reliability and functionality of the proposed solution. To avoid inaccuracies, it is vital to implement a system that can grow with the organisation and adapt to change.
- *Security* must understand the potential security threats and address them to ensure that data is not compromised. Both data and communication channels need to be secured, as devices can send large amounts of sensitive data and end-users, may also have the ability to control a device directly. In addition, they need to be able to manage the privacy of data sets throughout their lifecycle.
- *Reliability* must be stable and reliable from a services point of view, and it must offer failover and disaster recovery solutions. For example, it is difficult to trust data if connections are irregular, the platform is unreliable, or data processing takes a long time.

IoT-based platforms allow us to increase productivity and create a digital ecosystem that links people and *things*, generating a secure data flow between people, systems, and connected things. In addition, the use of IoT platforms allows us to have analytical capabilities such as rules engines, complex event stream processing, machine learning and data visualisation that help improve decision making by generating ideal solutions for each problem.

IoT-based platforms facilitate operational improvements in areas such as predictive maintenance and track-and-trace-based farm visibility by capturing data from different devices and enabling integration with data from other external sources.

2.1.2 Data analysis in agriculture

Digitisation technologies make it possible to process large volumes of data, which are the raw material that feeds the various applications that help the farmer optimise decision-making.

The data collected by the devices connected to farms is characterised by: volume, there is a large number of sensors generating information continuously; variety, the sensors determine different parameters and are from different manufacturers; and speed at which they generate data, knowledge of which allows us to generate data models that enable better use and dissemination of the information from these devices [11]. Based on the above, the need arises to generate interoperability mechanisms that allow integrating different devices, applications or platforms to eliminate the information silos that many systems produce [12].

Data is analysed and transformed into meaningful information using analytics tools. For example, data analysis helps to analyse weather farm and crop conditions. Data analysis helps to analyse farm conditions, resource management and crop development. Thanks to the integration-analysis of collected data and technological innovations, it is possible to improve decision-making. The large volume of data collected needs to be analysed to identify patterns and obtain information on the functioning of the farming system. Analyses often involve the application of statistical techniques due to the large volume of data generated. However, data analysis involves much more than putting information into the hands of technical experts; it is about improving knowledge in close collaboration with the producers of the data and generating benefits within the value chain of each sector.

Due to the number and variability of the data obtained in the agricultural sector[13], even if we are aware that not all of them are analysed, difficulties arise in developing mechanisms to generate the best possible decision. What is important is not how much data we have but what we do with it. The data must be analysed to obtain information that allows us to make the best decisions and thus gain a competitive advantage. Based on the sheer volume of data that the agricultural sector may have at its disposal, we identify challenges in terms of data management:

- Integration of multiple data sources

The data required to manage a farm comes from various sources, often in different formats and quality, so it is necessary to integrate and analyse data from these diverse sources. Failure to integrate will result in an incomplete or inaccurate analysis of the resulting information [14]. With a complete and centralised system, all types of information will be accessible in one place, thus reducing the time spent accessing sources and allowing for cross-comparisons and ensuring an overall view of the farm.

A system that automatically collects and organises the information is therefore necessary. An automated system will allow technicians to use the time they spend processing the data to act on it. The processing, integration and export of data collected from such heterogeneous sources can be done through open data platforms.

- Lack of data quality

Data is essential to improve decision making, so if data is not of high quality, decisions will be directly affected. There is nothing more detrimental to data analysis than inaccurate data that leads to bad decisions. One of the main causes of inaccurate data is manual errors made during data entry. This can have significant negative consequences if the analysis is used to influence decision-making. Another problem is data asymmetry: when information in one system does not reflect changes in another system, leaving it out of date.

The use of centralised systems and the automation of data cleansing should improve data quality. Data can be entered automatically with mandatory fields or drop-downs with quality checks, limiting human error. Systems integration should ensure that a change in one area is instantly reflected throughout the system. In addition, through continuously generated reports and alerts, decision-makers can be confident that the solution adopted is based on complete and accurate information.

- Adequacy of the use of time series

Many traditional forecasting methods use time-series analyses that rely on historical data and statistical models to generate forecasting models. These models learn historical demand patterns and use past trends as a basis for predicting future demand. However, this forecasting method poses two significant challenges: the assumption that past trends are stable and the required level of granularity of the forecast and its corresponding accuracy.

One way to address the limitations posed by conventional time series analysis is by applying machine learning algorithms to agricultural data. With this approach, new patterns of agricultural behaviour can be discovered, both historically and in real-time, by analysing multi-product patterns.

- Different representations for the same data

For uniform data handling and storage, it is essential to provide standardisation in format. Due to the lack of compatibility needed to manage the large amount of data that the agricultural sector generates, there is a need to provide agricultural managers with unified information models that allow farmers to improve their decision making by enabling them to take advantage of the information derived from their data and the knowledge already acquired.

Information models provide a framework for developing and implementing a homogeneous agricultural database and sharing information between technicians while providing a helpful tool for the agricultural community. In addition, domain ontologies allow the representation of specific concepts associated with these domains and facilitate the management of specialised knowledge such as that provided by devices, thus ensuring that data are correctly assimilated and allowing their integration. An alternative for sharing and reusing

agricultural data and resources, providing interoperability between repositories, enriching content and allowing the exploration of large datasets is the use of Linked Data, enabling us to publish structured data and interconnect them using a single vocabulary [15].

This is why data analytics plays a key role, but only when investing in a data architecture that meets the needs of the industry, enables scalability and collaboration, and allows for highly efficient classification and management of data. It should not be forgotten that data analytics has to act in the present, but always with the future in mind. This means generating services from data-driven models and, at the same time, creating a compelling data structure for the future.

In summary, this PhD thesis aims to place the farmer at the centre of the digital transformation process of the sector, optimising his decision-making by approaching and using IoT-based technologies. This work integrates different datasets and refines data analytics to improve farm efficiency, sustainable use of available resources, and crop productivity.

There are several obstacles that the agricultural sector has to overcome for the digitisation process to become widespread in order to reduce the possible drawbacks; therefore, this Doctoral Thesis has two clear objectives. On the one hand, to make sense of the enormous amount of data generated by the sector and the lack of analysis that makes it impossible to interpret it to improve its farms' performance. Furthermore, on the other hand, integrating all the information in an open and interoperable platform can improve decision-making based on data from the sector.

Based on the general objectives described above, we define the specific objectives achieved in the preparation of this doctoral thesis:

- O1. Recognise and aggregate those datasets related to the management of natural resources on farms. Deploy standardised architectures capable of managing them.
- O2. Analyse, adopt and improve existing information models and, if necessary, introduce new models for the agri-food sector to facilitate data exchange and interoperability.
- O3. Use of an open platform following a layered model to allow flexibility in its design on the one hand, and at the same time the modularisation of its components to enable different types of deployments depending on the intelligent infrastructure scenarios we wish to address.
- O4. Intelligent data processing for the extraction of patterns and models of the system under monitoring. These models will serve to provide predictive values and will form part of the sector optimisation process.
- O5. Implementation of decision support tools for crops, irrigation water management and energy efficiency, and the implementation of services associated with integrating data in its different technical, institutional, legal and social aspects.

2.2 Results

Most of the work carried out is based on the exploration and analysis of the data generated by the IoT scenarios to improve the management of scarce natural resources used by the agricultural sector and improve decision-making. One of the main achievements of this work has been identifying different heterogeneous datasets with which to address decision making in an anticipatory manner. Such data alone is of little use; it is the information interpreted through analytics that provides the farmer with a helpful tool in decision making. Other analyses are focused on determining the type of IoT-based architectures best suited to improve decision-making on-farm water efficiency and the geographical adaptability of new varietal groups. At the same time, data acquisition systems were developed using IoT devices, including intelligent weather monitoring and the acquisition of content from different sources.

The development of integrated systems for farm management is a difficult task due to the specific characteristics of the sector (different types of farms, remote locations or low investments in software) and the complex biophysical processes that need to be controlled by the responsible technicians. Another drawback to being taken into account is the volume of information to be collected, together with the variety of components from different suppliers to be integrated to customise the solutions. For these reasons, several datasets have been used for this Doctoral Thesis, the primary source of information being the Irrigation Community of Miraflores (Jumilla) ⁴. The data collected come from different sources: cartographic information, SCADA control system, plant-soil sensors, electricity consumption or energy billing. The data has been collected during the last two agricultural campaigns, 2019 and 2020. Although, for a better analysis of the energy consumption data, data from the last five years have been evaluated.

Another source of information has been collecting climatological information from different stone fruit tree producing areas in Spain, mainly from the Red de Estaciones Agrometeorológicas (SIAR) ⁵ of the Ministry of Agriculture and Fisheries, Food and Environment of the Government of Spain. Specifically, 261 automatic stations with at least 15 years of continuous data were used. The data have an hourly periodicity so that, in total, about 41 million observations of the variables temperature, humidity, precipitation and wind were evaluated.

Therefore, using these datasets is given by the need to build an IoT-based system to improve decision making in the agricultural sector. In this Thesis Report, we present the process of defining an accurate IoT-based agricultural monitoring tool, using prototyping methods drawn from the experience of technicians specialised in agricultural processes.

After collecting the datasets and studying the possible relationships, information models based on the Next Generation Linked Data Service Interfaces (NGSI-LD) ⁶ were defined to mitigate the lack of compatibility needed to manage the large volume of data produced and

⁴<http://www.crmiraflores.es/>

⁵<https://portal.mapa.gob.es/websiar/Inicio.aspx>

⁶https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/CIM/001_099/009/01.01.01_60/gs_CIM009v01010101p.pdf

generate a single vocabulary. The proposed data model was developed in two phases. The first phase focused on the management of the crop plots, taking into account the four pillars that support them: the crop variety itself, the type of soil, the climatology, and the sensors that monitor their evolution. In a later phase, the information relating to the energy management of water pumping was integrated to continuously monitor efficiency indicators, such as those used in the energy audits that must be carried out in irrigation communities and prevent possible losses in good yields.

Once the information model has been defined, a modular architecture is defined, ranging from the deployment of sensors and the monitoring of data extraction techniques to the intelligent processing of data to provide helpful information to improve the different elements of the farm. Each one of these layers is based on open and standard initiatives such as the one provided by the FIWARE Community ⁷.

The proposed information model and architecture shaped an open and interoperable IoT-based platform that improves decision making in the agricultural sector. Furthermore, it represents a single access point for integrating relevant farm information, as it can unify heterogeneous data sources from different providers.

The central deployment of the platform was carried out at the Miraflores Irrigation Community, where all the islands of information were integrated into a single linked repository that improves the management of the community itself. Also, a kind of traffic light was designed to indicate the efficiency of the irrigation wells, with the result that two of them were working poorly, which generated higher energy consumption to obtain a lower volume of water. Energy savings in the 2019 agricultural campaign were estimated at 10%, with an estimated savings of €43,500, thanks to monitoring and analysing energy performance indicators.

The platform also provides information to technicians on the climatic suitability for planting or not planting stone fruit trees in a given location, which will determine that the crop is better adapted to the area and requires fewer cultivation techniques (human influence), and obtaining a more sustainable crop. Thanks to verifying climatic, biophysical, phenological or agronomic trends, the agro-climatic evolution necessary to monitor a specific varietal group is determined.

This Thesis Report has proposed tools and services to improve the digital transformation and overcome the digital divide in the agricultural sector, resulting in an IoT-based infrastructure that allows to manage the resources available to farmers better and make decisions more efficiently. The analyses conducted demonstrate the feasibility of using IoT-based platforms to improve decision-making in the agricultural sector, both in the deployment in an irrigation community and for making decisions on the climatic suitability of adopting new varieties in new growth areas. Thanks to the use of the proposed system, it has been demonstrated that it is possible to improve the preventive maintenance of the water facilities of an irrigation community and thus improve resource efficiency along with a reduction of energy costs.

⁷<https://www.fiware.org/developers/catalogue/>

Table 2.1: Relationship between publications and proposed objectives.

Nb	Result	Target	Articles
R1	Recognise and integrate data sets that relate to water management and energy efficiency in an irrigation community. Analyse the properties of such data and their possible relationships using statistical processes.	O.1	[1, 2] [3, 4]
R2	Comparison of information models and representation techniques for data exchange to improve farm water management.	O.2	[1]
R3	Use of an open and interoperable platform based on digital data as a means to facilitate the digital transformation of the sector. Integrating the different datasets needed to improve farm efficiency and decision-making.	O.3	[1, 2, 5] [4, 6]
R4	Automation of energy audits carried out in irrigation communities to improve efficiency and energy consumption. Adaptation of this data to information models.	O.4	[2]
R5	Development of a methodology for improved climatic adaptability of stone fruit trees through the analysis of biophysical parameters of varietal groups.	O.5	[5] [3]

Table 2.1 shows the results obtained in this Thesis and the relationship with the proposed objectives. Chapter 3 explains how these results were achieved and the details of the open and interoperable IoT-based architecture used to improve decision making in the agricultural sector.

2.3 Organisation of the Thesis

This thesis is organized as a compendium of previously published works. The first chapter describes the motivation for the thesis and the proposed objectives, a brief review of the results obtained, and how these objectives are reflected in the publications.

The second chapter shows the publications' work through an introduction, together with the problems they aim to solve in the agricultural field and the results obtained. The conclusions of the work are also mentioned.

Finally, the third chapter is formed by the three research papers published in scientific journals and their relationship with the objectives proposed in this thesis. Each of the articles is followed by a brief review with the most relevant characteristics of the publication.

CONTRIBUCIONES DE LA TESIS

Este capítulo está constituido por la reseña de las publicaciones que conforman esta Memoria de Tesis Doctoral. Se expone el estado del arte, los trabajos relacionados, los problemas y las soluciones adoptadas para resolver los objetivos propuestos. Y por último, se indican las conclusiones obtenidas durante la elaboración del trabajo así como las futuras líneas de investigación.

3.1 Revisión del Estado del Arte

Se realizó una búsqueda de las principales referencias bibliográficas así como una descripción detallada de las mismas sobre la base de los objetivos descritos en el capítulo anterior y a las áreas de interés del trabajo.

En primer lugar, detallamos los diferentes modelos de información aplicados al sector agroalimentario, y la unificación de conceptos y tareas en una comunidad de regantes. También, como las soluciones basadas en IdC permiten mejorar y agilizar la toma de decisiones diarias en el ámbito del sector agrícola. Por último, se realiza una revisión del estado del arte de las arquitecturas basadas en IdC para gestión de explotaciones agrícolas, gestión eficiente del consumo energético y de la influencia del cambio climático en grupos varietales, en concreto de frutales de hueso.

3.1.1 Modelos de Información específicos para agricultura

En la base de la transformación digital se encuentran los datos públicos o privados de los dispositivos con los que podemos establecer comunicación. Para hacer uso de este conocimiento, hay que generar mecanismos de interoperabilidad semántica que permitan que diferentes sistemas del sector agroalimentario intercambien información con un significado inequívoco, además,

de proporcionar una visión integrada sobre conjuntos de datos heterogéneos que permitan la ejecución de análisis avanzados.

Se han desarrollado modelos de información que integran de forma eficiente las tareas cotidianas dentro del ámbito agrario. Muchos de ellos contienen información redundante con una insuficiente reutilización de los componentes que forman el modelo, lo que implica que los modelos definidos tengan poca aplicabilidad en la resolución de problemas reales dentro del sector agrícola. Para mejorar esta situación, es necesario vincular o asignar datos brutos a modelos de información, ontologías o vocabularios existentes para proporcionar una representación estructurada común de la información recogida a partir de sensores en tiempo real o de fuentes en tiempo no real de una explotación agrícola.

Actualmente, existen recursos que permiten agilizar el trabajo de modelado de datos en cualquier sector. Concretamente, en el ámbito de la agricultura Drury et al. [16], proponen herramientas que permiten desarrollar un modelado óptimo: vocabularios controlados (conjunto de términos o palabras preseleccionados para un dominio específico), ontologías y estándares para intercambio de información.

Una de las herramientas más utilizadas para promover la interoperabilidad entre diferentes sistemas de información es mediante el uso de ontologías de dominio. Una ontología es una representación formal de un conocimiento específico, que puede ser interpretado por máquinas y que está formado por tipos, propiedades y relaciones entre el conjunto de entidades [17]. En el entorno agrícola, hay ontologías específicas como la promovida por el European Telecommunications Standards Institute (ETSI) que partiendo de su ontología base Smart Appliances REference (SAREF), propone SAREF4AGRI ¹ que aborda el dominio de la agricultura inteligente. Cabe destacar otras ontologías como, AgriOnt [18] para la agricultura de precisión que añade otros ámbitos de conocimiento (geográficos, IdC o Empresariales) y FoodON ² que describe de forma precisa los productos alimentarios a nivel global y la gestión de la seguridad de los mismos. La ontología SSN ³, desarrollada por la W3C, tiene como objetivo describir los sensores y las observaciones realizadas, siendo muy interesante su inclusión por otras ontologías para integrar cualquier dispositivo.

Asimismo, encontramos modelos de información específicos para el sector agrícola cuyo objetivo es facilitar la integración de datos heterogéneos. El modelo RmAgro ⁴ permite caracterizar las diferentes entidades que forman parte del ámbito agrícola. En la misma línea, destaca el modelo de objetos ADAPT [19] que consta de un conjunto de herramientas y un modelo de objetos común en la agricultura. Otros, como los ofrecidos por la directiva INSPIRE ⁵ describen la especificación de los datos para cumplir con la norma INSPIRE, de obligado cumplimiento, para

¹https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/103400_103499/10341006/01.01.01_60/ts_10341006v010101p.pdf

²<https://foodon.org/>

³<https://www.w3.org/2005/Incubator/ssn/ssnx/ssn>

⁴<https://rmagro.org/>

⁵<https://inspire.ec.europa.eu/id/document/tg/af>

la gestión de los datos espaciales de las instalaciones agrícolas y acuícolas.

Una herramienta útil para modelar, nos la proporciona la API SensorThings ⁶ que OGC promueve como un estándar abierto para proporcionar un mecanismo unificado de interconexión entre dispositivos, datos y aplicaciones de IdC a través de la Web. También, existen varios esfuerzos e iniciativas hacia la estandarización en apoyo de la interoperabilidad de datos para ecosistemas de IdC en entornos específicos donde la API NGSI-LD⁷ y los modelos de datos propuestos por FIWARE ⁸ se consideran una solución sólida. Los modelos propuestos por FIWARE están enfocados a varios ámbitos *“inteligentes”*, incluyendo, Ciudades, Agricultura, Medio Ambiente, Sensores, Energía, Agua entre los más destacados. Otra iniciativa a tener en cuenta es Smart Data Models ⁹, promovida por la Fundación FIWARE - TMforum - IUDX y otros organismos públicos para apoyar la adopción de modelos de datos comunes para generar soluciones inteligentes y que, además, permite colaborar en el diseño de los mismos.

A nivel nacional, destacamos un modelo promovido por las administraciones públicas, como el modelo MEGA [20], una iniciativa del Ministerio de Agricultura de España, recogida en la norma ISO 21622. El objetivo de MEGA es establecer un modelo estandarizado que permita la interoperabilidad entre los diferentes sistemas que conviven en una explotación agrícola para realizar una gestión eficiente del uso del agua para regadío. El uso de este modelo mejora la forma de planificar las programaciones de riego y los requerimientos de los sistemas de control, estableciendo una clara separación entre la toma de decisiones y la ejecución.

En la literatura, encontramos varias iniciativas que abordan la integración y el análisis de datos con el objetivo de mejorar la toma de decisiones en el ámbito agrario. Nguyen et al. [21] proponen un esquema de datos que describe con precisión las mediciones de los sensores en la gestión del riego, proponiendo dos nuevas ontologías. Sahin Aydin y Aydin [22] presentan un modelo de adquisición de datos genérico basado en ontologías para crear formularios de adquisición de datos basados en el patrón de diseño modelo-vista-controlador, para su publicación y uso en plataformas abiertas de datos agrícolas. Schuetz et al. [23] han diseñado un almacén de datos semántico activo para apoyar el análisis de datos en la agricultura de precisión, utilizando una base de datos relacional y un almacén de RDF. Incluso, existen propuestas como la de Kalimaris et al. [24] que describe un framework de IdC, Agri-IoT; basado en tecnologías de web semántica y datos enlazados para facilitar la toma de decisiones del agricultor permitiendo una mayor interoperabilidad entre los diferentes elementos que forman parte de las explotaciones agrícolas.

Bazzi et al. [25] proponen una API, a la que se puede acceder desde cualquier otra aplicación que permita la comunicación HTTP con un servidor, pudiendo almacenar, integrar y gestionar los conjuntos de datos utilizados en aplicaciones orientadas a la agricultura. Por otra parte,

⁶<http://docs.opengeospatial.org/is/15-078r6/15-078r6.html>

⁷https://www.etsi.org/images/files/ETSIWhitePapers/etsi_wp_42_NGSI_LD.pdf

⁸<https://github.com/smart-data-models>

⁹<https://smartdatamodels.org/>

Gallinucci et al. [26] utilizan un esquema relacional y explotan la información geográfica para integrar datos agrícolas heterogéneos con diferentes niveles de detalle, orientados al análisis de datos y a la Inteligencia de Negocio.

Sin embargo, las ontologías y los esquemas relacionales no son flexibles cuando se añaden nuevos conjuntos de datos y no son capaces de realizar análisis de datos para mitigar estas barreras. Ngo et al. [27] presentan un almacén de datos de todo el continente que fue diseñado e implementado combinando Hive, MongoDB y Cassandra y el esquema de constelación en conjuntos de datos agrícolas reales. Sin embargo, no describen cómo se ha construido su almacén de datos.

En los últimos años, varios proyectos europeos han abordado la integración de modelos de información para mejorar la gestión agrícola, entre los que destacamos:

- DEMETER ¹⁰: implementa un modelo de datos semánticos denominado *Modelo de Información Agrícola* para apoyar la traducción, gestión e inferencia de datos (cumpliendo con soluciones estandarizadas como NGS-LD, ADAPT y SAREF4AGRI)
- FOODIE ¹¹: ofrece una infraestructura, mediante el desarrollo de un modelo de datos abierto, para la construcción de una red interactiva y colaborativa, para la integración de conjuntos de datos abiertos existentes; publicación de datos y enlace hacia diferentes fuentes de datos externas, proporcionando aplicaciones y servicios específicos de alto valor para el apoyo de los procesos de planificación y toma de decisiones.
- IoF2020 ¹²: tiene como objetivo abordar la interoperabilidad y ofrecer soluciones portátiles basadas en tecnologías basadas en IdC en el marco agroalimentario. Además, define modelos de información para incluir datos gestionados por cooperativas e invernaderos basándose en la temática de cada uno de los pilotos del proyecto.
- SWAMP ¹³: implementación de modelo de información para integrar los sistemas encargados de la distribución del agua en las explotaciones agrícolas y, de esta manera, establecer planes de riego optimizados mediante el uso de métodos innovadores basados en IdC.
- WATERMED ¹⁴: desarrollo de un método integral el estudio del agua mediante la combinación de diferentes conjuntos de datos históricos, de sensores o de imágenes satélite.

Uno de los retos pendientes es encontrar la búsqueda del equilibrio entre la interoperabilidad de las fuentes de datos y la gobernanza de los mismos. Ya que la interoperabilidad es más una cuestión de gestión de datos que de aplicación de los avances tecnológicos. Otro reto está

¹⁰<https://h2020-demeter.eu/>

¹¹<http://www.foodie-project.eu/>

¹²<https://www.iof2020.eu/>

¹³<http://www.swamp-project.org/>

¹⁴<https://www.watermed-project.eu/>

relacionado con la representación de la información, ya que se puede considerar que no existe una forma *adecuada* para representar los datos. Muchos modelos se definen para mejorar procesos productivos y otros para compartir información, por ello definir una estructura común es una tarea compleja y, más, en el sector agrícola.

En general, la modelización de los sistemas agrícolas debe adoptar e integrar rápidamente los datos más avanzados junto con las tecnologías de la información y la comunicación, centrándose en las necesidades de los usuarios finales. Observamos que existen diferentes propuestas, pero pocos modelos de información han sido implementados en una comunidad de regantes, integrando los diferentes conjuntos de datos heterogéneos e incluso proponiendo soluciones en la mejora del consumo energético o el desarrollo de los cultivos.

3.1.2 Diseño de arquitecturas basadas en IdC

El futuro del IdC es, prácticamente, ilimitado debido a los avances tecnológicos y la necesidad de los usuarios de integrar diferentes dispositivos o servicios de cualquier dominio de la sociedad. También, hay que tener en cuenta el amplio espectro de tecnologías utilizadas, que van desde aquellas que están basadas en celulares como GPRS o 5G, hasta las tecnologías LPWAN considerando Sigfox, LoRaWAN, o NB-IoT.

Para integrar todos los elementos que forman parte del ámbito de actuación de IdC estos deben estar integrados en una estructura uniforme rápida, inteligente, sencilla, fiable, escalable y bien organizada que permita interactuar de manera ágil con todos los objetos. Por tanto, toda solución basada en IdC necesita la definición de un marco o arquitectura que integre los componentes físicos junto con su organización, la configuración de la infraestructura de red, los formatos de los datos y los procesos operativos; para poder tener la capacidad de desplegar, automatizar, orquestar y generar soluciones a problemas concretos.

Si bien, cada sistema basado en IdC tiene su propio enfoque, la base de la arquitectura y el procesamiento de los datos, es esencialmente el mismo. No existe una única arquitectura para IdC que sirva de referencia para todas las posibles implementaciones a desarrollar. Aún así, se considera que el modelo más estandarizado está formado por una arquitectura modular comprendida entre tres o cinco capas [28, 29], en la Figura 3.1 se observa una representación de las posibles capas. Las capas que forman parte de una arquitectura modular formada por tres capas [30] se denominan:

- *Percepción*: es la capa física formada por aquellos dispositivos con capacidad de conexión a Internet; encargados de realizar mediciones sobre parámetros físicos del entorno o encontrar otros objetos con los que relacionarse. Posteriormente, los datos son transmitidos a niveles superiores mediante Agentes IdC especializados para poder realizar acciones sobre la base de dichos datos.

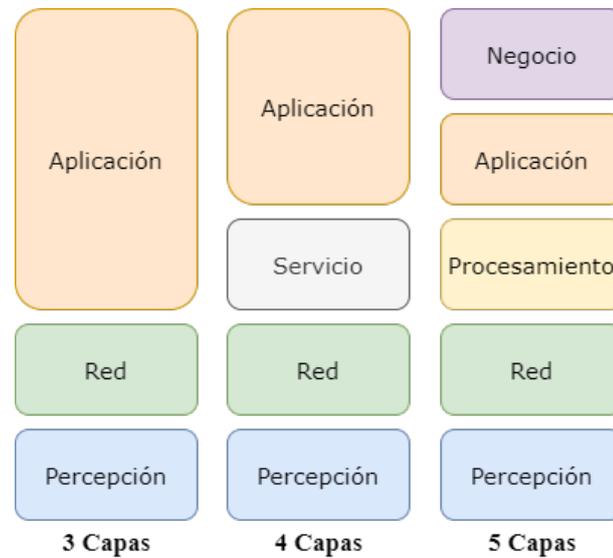


Figura 3.1: Capas que conforman una arquitectura basada en IdC.

- *Red*: se ocupa de las tecnologías de comunicación y de red para transferir los datos de los dispositivos para su procesamiento y enviar los comandos de vuelta a los actuadores. Además, realiza las conexiones necesarias con otros dispositivos o servicios con los que se quiere interactuar. Toda la transferencia de datos se realiza de forma segura manteniendo la confidencialidad de los datos obtenidos.
- *Aplicación*: es la capa que gestiona todos los procesos de aplicación basados en la información obtenida y la encargada de generar información procesable. Además, proporciona una gestión global de las aplicaciones o servicios proporcionados.

La arquitectura de tres capas, en algunos casos, no es suficiente para abordar necesidades más específicas que permitan mejorar la toma de decisiones, por ello surge la necesidad de utilizar otro tipo de arquitecturas. La primera modificación que se propone es utilizar una arquitectura de cuatro capas [31] para dotar de mecanismos de seguridad al sistema y evitar que durante el paso de información desde la capa de red se produzcan ataques contra la seguridad. Las funcionalidades de la nueva capa son:

- *Servicio*: capa encargada de verificar que la información recibida desde los usuarios autenticados este libre de amenazas y permita el envío de la información de forma segura a la capa de aplicación.

También, se propone una arquitectura modular compuesta de cinco capas que se considera una extensión de las arquitecturas anteriores que incluye dos capas adicionales con respecto al modelo básico:

- *Procesamiento*: es el núcleo central del sistema. Almacena la información conforme a modelos de información específicos, analiza y procesa los datos para obtener un patrón definido que puede ser útil para la capa de negocio. También, puede tomar decisiones según los cálculos realizados sobre los diferentes conjuntos de datos obtenidos de los dispositivos o servicios.
- *Negocio*: es la capa responsable de la gestión de todo el sistema de IdC, incluidos los servicios, las aplicaciones y la gestión de la seguridad para posibilitar soluciones que puedan ser aprovechadas por terceros. Debe estar focalizada en el modelo de negocio al que debe proponerle soluciones. Es la responsable de mostrar la información de forma amigable al consumidor.

La inclusión de nuevas capas debe generar una comunicación clara entre los usuarios y los proveedores de servicios y de esta forma ser la base de cualquier arquitectura de red basada en IdC. De hecho, la arquitectura de IdC puede variar significativamente en función de la implementación realizada; tiene que hacer uso de protocolos abiertos para soportar múltiples aplicaciones de red. Los sistemas tienen que ser interoperables, es decir, deben poder mantener la información completa y confiable, independientemente de la heterogeneidad de los dispositivos [32].

En el ámbito de arquitecturas de red, el trabajo presentado por Guimarães et al. [33] propone un marco de trabajo, Future Internet Fusion (FIFu), que unifica las arquitecturas de red actuales y futuras, promoviendo la interoperabilidad entre diferentes arquitecturas de red y fomentando así el despliegue de nuevas arquitecturas de forma incremental y desarticulada.

Existen otro tipo de arquitecturas no convencionales que definen nuevos ámbitos de actuación. Datta et al. [34] nos proponen una arquitectura basada en microservicios en la nube. Debido al uso de microservicios se produce una computación colaborativa donde los componentes del servicio pueden ser desarrollados en paralelo siempre que se defina un formato uniforme de intercambio de datos entre ellos. La arquitectura de control de acceso descentralizada propuesta por Novo [35] para el uso de dispositivos IdC utiliza tecnología Blockchain y permite reducir la sobrecarga en la comunicación entre los nodos.

Una plataforma basada en IdC implementa una arquitectura IdC que proporciona una variedad de módulos que facilitan el desarrollo de aplicaciones inteligentes para mejorar la toma de decisiones. Además, tiene como objetivo recopilar y transformar los datos de los dispositivos heterogéneos en servicios inteligentes que mejoren el trabajo diario; dicha arquitectura está formada por diversos componentes de middleware en las diferentes capas cada uno con una función específica.

Existen diferentes plataformas de IdC disponibles, tanto de código abierto como propietarias [36]. Esta variedad de plataformas generan problemas de interoperabilidad, ya que los desarrolladores deben adaptar sus aplicaciones a cada una de las plataformas haciendo uso de APIs,

modelos de información y protocolos específicos. El uso de plataformas, basadas en interfaces y protocolos estándares y abiertos, permite la integración de diferentes conjuntos de datos, así como la interoperabilidad con soluciones de otros proveedores favoreciendo el intercambio y explotación de datos.

A nivel europeo, existe una iniciativa abierta, FIWARE ¹⁵, promovida por la Unión Europea y compuesta por una serie de habilitadores genéricos que proporcionan diferentes servicios; cuyo objetivo es ofrecer un marco de trabajo, utilizando un conjunto de API REST estándares y abiertas basadas en NGSI o NGSI-LD [37], para definir un conjunto universal de estándares basados en la gestión contextual de los datos. Por lo tanto, ser fiel a los estándares, y dejar de lado el código y las tecnologías propietarias, puede contribuir a mejorar la competitividad de cualquier sector.

Sin una arquitectura robusta y, al mismo tiempo, flexible, no se puede conseguir un IdC operativo. Además, la arquitectura que se adopte para el IdC no debería excluir futuras actualizaciones y cambios. En las implantaciones reales de plataformas basadas en IdC, no se han añadido características de análisis de datos con la capacidad de generar conocimiento sobre la base del dato procesado, la mayoría de las veces estas tareas las realizan entidades externas.

3.1.3 El uso de sistemas basados en IdC mejora el sector agrícola

El sector agrícola es sin duda uno de los campos donde la aplicación de IdC junto con el uso de los nuevos avances tecnológicos, permitirá mejorar la toma de decisiones, optimizar los recursos disponibles, mejorar el intercambio de prácticas agrícolas, realizar una monitorización inteligente de los cultivos y mejorar la trazabilidad de los productos.

El uso de plataformas basadas en IdC puede considerarse la columna vertebral de cualquier sector industrial que quiera dotar a su actividad de una componente inteligente para fomentar su digitalización. En la literatura podemos encontrar varias revisiones sobre la diversidad de plataformas diseñadas para la integración de servicios de IdC y sus características principales, como la aportada por Silva et al. [38], aunque la comparación de resultados es difícil por la falta de estandarización.

Durante los últimos años, se han llevado a cabo diferentes iniciativas en el ámbito de la computación en la nube para fomentar la transformación digital del sector agroalimentario mediante la resolución de los problemas detectados:

- *Mejoras en la productividad:* mediante la sensorización de los cultivos el agricultor puede gestionar el riego, los plaguicidas o los fertilizantes, únicamente, para incorporarlos cuando sean necesarios o cuando se cumplan los criterios establecidos. Por ejemplo, Araby et al. [39] propusieron la integración de técnicas de IdC junto con el aprendizaje automático para predecir enfermedades en las hortícolas antes de su detección, permitiendo al agricultor aplicar los mecanismos de defensa necesarios, mejorando de esta manera la productividad y

¹⁵<https://www.fiware.org/>

reduciendo el uso de pesticidas. Trilles et al. [40] presentaron una plataforma de bajo coste equipada con sensores, SEenviro, dedicada a la monitorización de las plagas detectadas en los viñedos.

- *Detección precoz de problemas*: mediante el uso de imágenes de satélite o de drones, se pueden detectar y cartografiar en los cultivos factores agronómicos nocivos, hasta ahora no tratados, mediante el uso de técnicas de teledetección. Por ejemplo, De Rango et al. [41] monitorizaron los cultivos utilizando las imágenes proporcionadas por un conjunto de drones para detectar la presencia de parásitos y decidir si era necesario la aplicación de un tratamiento posterior, lo que representa una nueva técnica de coordinación y control de la flota de drones en la agricultura de precisión. También, se han realizado estudios que proponen nuevas aplicaciones para el seguimiento de la vegetación mediante el análisis de imágenes de vehículos aéreos no tripulados para el cultivo del arroz [42] y para condiciones de vegetación muy densa [43].
- *Monitorización del comportamiento de las plantas*: empleo de inteligencia artificial para analizar todo el conjunto de datos obtenidos de los cultivos para realizar predicciones futuras. La plataforma PLANTAE [44] es un sistema capaz de gestionar el proceso agrícola y simultáneamente utilizar técnicas de aprendizaje automático para detectar posibles enfermedades en las plantas. Otros trabajos, como el de Choudhury et al. [45], monitorizaron el comportamiento de las plantas para evitar plagas y enfermedades. Mediante el uso de una aplicación móvil, los agricultores informan de eventos que mejoran los modelos de enfermedades utilizados. Franco et al. [46] presentan un sistema de monitorización de la germinación de semillas de *Ocimum basilicum* mediante técnicas de procesamiento de imágenes y lógica difusa; el sistema se basa en las plataformas Cloudino-IoT y FIWARE como alternativa a la monitorización en tiempo real.
- *Gestión hídrica eficiente*: con el objetivo de reducir el estrés hídrico de los cultivos. Riquelme et al. [47] mostraron cómo los servicios en la nube que utilizan FIWARE permiten mejorar la gestión del uso del agua de riego en zonas con déficit hídrico. Otro proyecto a considerar basado en FIWARE, es la plataforma SWAMP [48], cuyo objetivo es desarrollar métodos innovadores basados en IdC para la gestión inteligente del agua de riego, utilizando las características semánticas proporcionadas por un motor de contexto basado en la arquitectura de procesamiento de eventos del protocolo SPARQL. Ambas soluciones se basan en los habilitadores de FIWARE para construir sus arquitecturas. García et al. [49] revisan los trabajos que permiten una gestión sostenible del riego de acuerdo con los parámetros característicos del riego (clima, agua y suelo).
- *Mejora en la gestión de los invernaderos*: mediante la monitorización de sus diferentes componentes. Zamora-Izquierdo et al. [50] propusieron una plataforma flexible capaz de satisfacer las necesidades de los cultivos hidropónicos en un invernadero con recirculación

completa. Para ello, se utilizó un despliegue basado en FIWARE haciendo uso de NGSI como medio para representar la información. Somov et al. [51] construyeron un sistema para monitorizar tanto las condiciones establecidas en un invernadero como el comportamiento de las plantas para predecir la tasa de crecimiento de los tomates mediante la simulación de diferentes ambientes.

También, encontramos diferentes propuestas que abordan el tema de la interoperabilidad y la integración de datos en el ámbito de la agricultura para la resolución de problemas concretos.

Eficiencia en el bombeo de agua para regadío

Una de los recursos más críticos en la agricultura es la gestión de las aguas subterráneas, sobre todo en climas áridos y semiáridos, y el consumo de energía necesario para su extracción. En consecuencia, la energía consumida en el proceso de extracción y distribución del agua en una explotación agrícola representa una parte importante de la factura energética que los agricultores deben afrontar. La optimización de esta operación garantizará la sostenibilidad económica de las comunidades de regantes [52].

La aplicación de mecanismos de eficiencia energética mediante el uso de indicadores reduce significativamente los costes de funcionamiento de las bombas que se encargan de bombear el agua subterránea en las balsas de riego [53]. El consumo de energía puede reducirse disminuyendo el caudal que circula por la bomba, reduciendo la caída de presión en el sistema de tuberías o consiguiendo que la bomba funcione cerca del rango óptimo de su curva de rendimiento. También, hay que conseguir que las bombas funcionen la mayor parte del tiempo en las horas "valle" de la tarificación eléctrica, con lo que se produciría un ahorro económico.

En las fuentes bibliográficas consultadas encontramos diferentes trabajos que abordan como mejorar la gestión del bombeo hídrico. Dong y Yang [54] proponen un modelo basado en datos para optimizar la programación de las estaciones de bombeo y drenaje en aguas urbanas en base a restricciones hidrometeorológicas; obteniendo una mejora del rendimiento económico. Predescu et al. [55] presenta una solución para automatizar el bombeo y la distribución de agua de manera eficaz minimizando las pérdidas y la vida útil de los equipos. Ullah et al. [56] nos presenta un sistema para gestión de piscifactorías que mantiene el nivel de agua deseado con un consumo mínimo de energía gracias a la elección del flujo de bombeo óptimo.

El mantenimiento predictivo permite identificar problemas en los sistemas antes de que se produzca un fallo o baje su rendimiento. Moleda et al. [57] nos presentan un sistema basado en IdC que detecta desviaciones del estado normal de funcionamiento mediante un modelo de regresión que permite detectar desviaciones, anomalías y valores atípicos en el funcionamiento del sistema.

Las auditorías energéticas agrícolas muestran el potencial de ahorro que se puede obtener de una explotación concreta. Dentro de esta línea y con el objeto de promover proyectos innovadores y demostrativos en materia de ahorro y eficiencia energética en el sector, destacamos el trabajo

de Tarjuelo et al. [58]. También existen trabajos como el de Mardani et al. [59] que realizan una revisión bibliográfica de los diferentes modelos de análisis de datos aplicados al desarrollo de problemas de eficiencia energética.

Observamos que existen diversas soluciones que abordan como mejorar la eficiencia energética de los bombeos desde varios puntos de vistas: hidráulico, económico o industrial. Pero sin embargo no hemos encontrado sistemas que integren las auditorías energéticas agrícolas si no en toda su extensión en parte de ellas, debido a que suele ser un proceso laborioso y poco automatizado. Creemos que sería necesario que los gestores agrícolas dispusiesen de una plataforma integradora que permita generar indicadores obtenidos de las auditorías habituales, junto con un análisis real del proceso de facturación energética, lo que permitiría una gestión más sostenible de las explotaciones agrícolas.

Adaptabilidad climática de grupos varietales

Hoy en día, es posible establecer la implantación de nuevos cultivos en lugares donde no se había desarrollado con anterioridad. Para determinar estas nuevas ubicaciones es necesario basarse en estudios climatológicos en la zona, así como, en los requerimientos climáticos de cada grupo varietal, de esta manera se conseguirá un equilibrio adecuado entre los costes de explotación y el rendimiento de los cultivos.

Las consecuencias de los nuevos escenarios climáticos sobre la producción agrícola hace necesario definir mecanismos que determinen la influencia de la variabilidad climática en los daños de los cultivos. El uso de técnicas basadas en Inteligencia Artificial, junto con IdC, permiten mejorar la predicción de variables, como en el caso propuesto por Ponce y Gutiérrez [60]. El sistema utiliza aprendizaje supervisado para predecir la temperatura; el resultado se compara con un servicio web, obteniendo un error de aproximadamente 2,1 °C; el modelo utilizado obtiene excelentes resultados, pero para determinar las necesidades de bajas temperaturas de los cultivos, el error debería ser menor. En una línea similar, el trabajo propuesto por Gutiérrez y Ponce [61] proponen un método de aprendizaje supervisado denominado *Artificial Hydrocarbon Networks* (AHN) para predecir la temperatura en un lugar remoto junto con la detección e identificación inteligente de posibles fallos en los sensores; el comportamiento del modelo propuesto debe ser verificado mediante la información obtenida de una red de estaciones agrometeorológicas.

Otros trabajos se centran en el desarrollo de sistemas de decisión basado en modelos difusos de predicción de heladas para informar y alertar, como el propuesto por Cadenas et al. [62]. Este trabajo cita una técnica de regresión basada en *k-nearest neighbors* que admite conjuntos de datos con valores aproximados.

De igual manera que ocurre con la eficiencia de los bombeos nos encontramos que la variabilidad climática actual junto con las necesidades bioclimáticas de los cultivos no ha sido relacionada, conjuntamente, para determinar la idoneidad geográfica de implantar o no un cultivo en una determinada ubicación.

3.1.4 Hacia una agricultura digital aprovechando IdC y SIG

Los datos agronómicos y su uso para mejorar la toma de decisiones y la innovación son parte fundamental de la transformación digital del sector agroalimentario. La consecución de este logro debe estar sustentado por la generación de servicios que doten de inteligencia a las diferentes fases de la cadena agroalimentaria mediante el uso y desarrollo de tecnologías vanguardistas.

Hoy en día, casi toda la información se nos representa de forma georeferenciada, por lo que se acentúa la importancia de la información geográfica para la toma de decisiones, donde el conocimiento de la ubicación espacial y su relación con el resto de elementos se considera fundamental. Por ello, los Sistemas de Información Geográficos (SIG) se constituyen como una herramienta transversal para la gestión agrícola, que permiten mejorar la toma de decisiones, debido a las posibilidades de integrar y relacionar la información disponible con su componente espacial [63].

En la actualidad, el uso de datos espaciales ayuda a la predicción de variables como el rendimiento o la fecha óptima de cosecha, por lo que es urgente integrarlos y vincularlos con el resto de datos generados por las explotaciones. Incluso ya se propone un nuevo concepto IdC Espacial [64]. Las tecnologías geoespaciales abarcan todo el proceso productivo de la agricultura, en relación con la labor que desempeña destacamos tres campos:

- Mejora de la predicción mediante el uso de indicadores agrícolas. Falanga et al. [65] utiliza las imágenes del satélite, Sentinel- 2, para obtener el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Área Foliar para su posterior uso junto con técnicas de aprendizaje automático. Madigan et al. [66], ha demostrado que los datos procedentes del satélite Sentinel-2 son útiles para la identificación del cultivo de arroz e, incluso válido para la identificación de otras variedades.
- Extracción de la información mediante la transformación de los datos mediante el uso de técnicas espaciales. Bordogna et al. [67] propone una arquitectura de gestión de una infraestructura de datos espaciales para crear, gestionar y analizar conjuntos de datos geoespaciales heterogéneos procedentes de múltiples fuentes y series temporales en la web.
- Mejora de la gestión de los cultivos utilizando la información adquirida como apoyo a la toma de decisiones. Jiang et al. [68] demuestra que existen varias posibilidades de integrar técnicas de modelización estadística y datos espacio-temporales para la gestión de cultivos en zonas geográficas concretas.

Debido al elevado número de dispositivos con capacidad de localización surge la necesidad de definir estándares que nos permitan que, tanto, los sensores como los datos estén disponibles y nos permitan obtener nuevo conocimiento desde una perspectiva espacial [69]. Este es el motivo que llevo a los miembros del Open Geospatial Consortium¹⁶ (OGC), consorcio industrial fundado en

¹⁶<https://www.ogc.org/>

1994, a desarrollar estándares para la habilitación de redes de sensores. En concreto, mediante la especificación Sensor Web Enablement (SWE), basado en el concepto de sensor web para desarrollar estándares que permitan el procesamiento de los datos generados por los sensores.

Teniendo en cuenta que el valor de las decisiones es importante; ayudar a los responsables agrícolas a mejorar la toma de decisiones en función de los datos que recogen debe ser una prioridad, considerando que muchas veces no tienen a su disposición toda la información que necesitan. Por ello, se deben proporcionar a los técnicos de sistemas de apoyo a la toma de decisiones para ayudar a analizar mejor las alternativas posibles [70] que les permita elegir la opción más conveniente o eficaz en cada momento.

La digitalización del ecosistema agrícola mediante la generación de servicios geolocalizados basados en IdC mejora la visibilidad de los activos, el control óptimo de los recursos naturales, fomenta la sostenibilidad ambiental y permite generar ahorros económicos. Los sistemas de apoyo a la toma de decisiones agrícolas utilizan los conocimientos de expertos para definir patrones agronómicos y poder emular las actividades humanas en la toma de decisiones. Además, mientras los nuevos servicios son utilizadas mantienen un proceso de aprendizaje continuo, permitiendo adaptar sus decisiones a los cambios que se produzcan.

Podemos encontrar una variedad de trabajos que abordan como los sistemas de ayuda a la decisión generan nuevos servicios que favorecen la digitalización del sector agrícola, mejorando aspectos como:

- **Gobernanza de los datos:** las condiciones de diseño de los sistemas deben incluir la interoperabilidad entre las diferentes tecnologías y favorecer que los datos generados dentro y fuera de las explotaciones sean: localizables, accesibles, interoperables y reutilizables [71]. Uno de los mecanismos que mejora la confianza de los usuarios para mejorar el intercambio de datos agrícolas es el Código de Conducta Europeo [72].
- **Gestión agronómica:** se diseñan sistemas como el propuesto por Viani et al. [73] pero diseñados y calibrados según las indicaciones de los agricultores para imitar la experiencia humana y comprender adecuadamente el estado del cultivo. Goldstein et al. [74] propone utilizar técnicas de Inteligencia Artificial no únicamente para optimizar la gestión del riego, sino para predecir modelos de crecimiento de los cultivos.
- **Eficiencia hídrica:** hay trabajos que mediante el uso de sistemas basados en IdC permiten monitorizar en tiempo real servicios como la gestión del agua para riego basado en un sistema de control multi inteligente como el propuesto por Hadipour et al. [75] lo que permite mejorar la gestión hídrica de las explotaciones. Además, la toma de decisiones de múltiples partes permite mejorar la gestión del agua y la protección de las aguas subterráneas en los sistemas agrícolas de zonas concretas, como el trabajo propuesto por Pluchinotta et al. [76].

Consideramos que es necesario diseñar plataformas que integren de forma eficaz la información de dispositivos inteligentes junto con un SIG, implementando mecanismos para intercambio de información espacial para ofrecer servicios adaptados a los diferentes perfiles de usuarios que participen en la toma de decisiones agrícolas.

3.1.5 Análisis estado del arte

Cada una de las secciones de este apartado concluye con una reflexión sobre las carencias detectadas en la revisión de los trabajos descritos. Un impedimento importante en el proceso de digitalización de la agricultura es la falta de capacidad de los sistemas actuales para interoperar entre sí. Estos sistemas o “islas de información” impiden la creación de servicios entre diferentes dominios, debido a su falta de interoperabilidad. La mayoría de los conjuntos de datos detectados en las explotaciones agrícolas, procedentes de varios proveedores, no se aprovechan en toda su extensión, lo que impide que alcancen todo su potencial. Consideramos necesario la inclusión de modelos de información específicos para gestionar el sector agrario y brindar a sus gestores la capacidad de controlar la información agronómica y mejorar la toma de decisiones diaria.

Las tecnologías empleadas para diseñar las arquitecturas, no proporcionan una conectividad fluida sobre los dispositivos debido a las elevadas solicitudes de servicio y al incremento de las tasas en el intercambio de datos. Teniendo en cuenta las plataformas basadas en IdC, no hay ninguna plataforma específica que aborde la gestión de la eficiencia energética de los bombeos ni la idoneidad geográfica de los cultivos con base en el clima y, que a su vez, ofrezca soporte para el análisis de datos específicos. Además, la falta de integración de los datos de las plataformas en modelos de información especializados no permite la homogeneización de los resultados en un formato estándar y dificulta el intercambio de información entre diferentes sistemas.

Una vez que el acceso a la información mediante redes de datos se realiza de forma habitual por los diferentes usuarios, la capacidad de los sistemas de información geográfica para interrelacionar información almacenada en distintos sistemas y/o procedente de fuentes heterogéneas se ha convertido en un requerimiento imprescindible. De esta manera, consideramos que existen pocos servicios aplicados que demuestren cómo el uso de los SIG junto con IdC ayudan a transformar un sector primario como el de la agricultura. Por este motivo, consideramos necesario la realización de los estudios de esta Memoria de Tesis Doctoral que promueven nuevos servicios que gestionen de forma conjunta fuentes espaciales para proporcionar sistemas de ayuda a la toma de decisiones que contribuyan a la digitalización de un sector primario tan importante como es la agricultura.

3.2 Análisis de Datos para entornos de Agricultura Inteligente

El núcleo de la transformación digital del sector agroalimentario reside en la creciente capacidad de producir, recoger, transferir y analizar un mayor volumen de datos que antes no eran

técnicamente posibles [77]. En las explotaciones agrícolas, los datos deben ser analizados para generar información y conocimientos prácticos que apoyen la toma de decisiones de los técnicos responsables y les ayuden a mejorar la gestión de las explotaciones agrícolas mediante un uso eficiente de los recursos. En la mayoría de los casos, los datos son obtenidos de sistemas remotos, como los satélites, y de sistemas de sensores “in situ” y los equipos de agricultura de precisión; así como, datos agregados y procesados procedentes de fuentes abiertas, y de la recopilación de otros datos específicos, como los consumos energéticos. Estos conjuntos de datos agrícolas más amplios y dispersos van a permitir la generación de nuevos servicios que generaran beneficios en las diferentes etapas del sistema productivo agroalimentario. Por lo tanto, es fundamental adoptar sistemas capaces de maximizar el rendimiento de los recursos y ayudar a los agricultores en su toma de decisiones para transformar la gestión de sus explotaciones de forma digital para mejorar sus sistemas de explotación [78].

Cada una de las subsecciones que se muestran a continuación, hacen mención a los resultados que se presentan en la Tabla 1.1 del capítulo anterior, donde, podemos ver la relación de las publicaciones con los resultados obtenidos.

3.2.1 Sistemas de apoyo a la toma de decisiones agrícolas. Integración y análisis de datos [R1]

El uso de tecnologías basadas en datos está avanzando rápidamente con los desarrollos en el marco del IdC, convirtiéndose en una parte esencial del futuro del sector agrícola, ya que mejora la eficiencia y la producción en el sector agroalimentario [79]. Como consecuencia, para respaldar los servicios que mejoren las decisiones, es deseable que un sistema de ayuda a la decisión considere la integración de la mayor cantidad posible de información [80].

La toma de decisiones agrícolas se basa en la relación entre la experiencia del conocimiento experto y la información obtenida de fuentes de información diversas procedentes de sensores, datos abiertos, auditorías externas, aplicaciones propietarias o, incluso, de información geoespacial.

Para crear servicios que ayuden al sector en el proceso de digitalización de las explotaciones agrícolas, en la eficiencia energética y en la adaptabilidad climática de nuevas variedades de cultivo, es vital comprender la relación entre los conjuntos de datos heterogéneos, utilizados para el diseño de dichos servicios.

Un primer bloque de datos procede de la Comunidad de Regantes de **Miraflores** situada en el municipio de Jumilla (Murcia), con una superficie cercana a las 1.330 hectáreas y de la que forman parte 967 comuneros. Es un municipio caracterizado por la ausencia de agua al haber quedado excluido de los suministros de agua del Acueducto Tajo-Segura. Debido a esta falta de agua, el agua para el riego proviene de pozos, y por concesiones de agua regenerada de una planta de tratamiento local, con una cifra total de 4.000 m^3 /ha/año. La comunidad esta formada por seis sectores de riego, cada uno de los cuales tiene una estación de bombeo y una red hidráulica con presión. De dicha comunidad se han monitorizado y recopilado datos de sus instalaciones

más representativas, así como, de estaciones meteorológicas y sensores de humedad del suelo; los atributos más representativos se muestran en la Tabla 3.1. Para poder caracterizar mejor las infraestructuras de la comunidad se utilizaron servicios cartográficos externos procedentes de la Confederación Hidrográfica del Segura ¹⁷ que han permitido geoposicionar las parcelas de riego con respecto a las instalaciones.

Tabla 3.1: Datos procedentes de las instalaciones de la comunidad de regantes de Miraflores.

Tipo de instalación	Cantidad	Atributos
Balsas de Riego	7	nivel, pH, turbidez, presión entrada-salida
Pozos	8	nivel, temperatura agua-motor, presión, flujo
Filtrados	7	presión entrada-salida, flujo de limpieza y salida
Hidrantes	1469	tiempo de apertura-cierre, volumen de agua
Estaciones climáticas	2	temperatura, humedad, precipitación, radiación, viento
Sensores de suelo	6	temperatura, humedad de suelo a 30-60-90 cm.

Los valores erróneos o perdidos por fallo en la comunicación son sustituidos por otros valores calculados mediante técnicas de regresión lineal o por las anotaciones realizadas, manualmente, por los celadores responsables de las instalaciones de la comunidad de regantes. Para los datos de los bombeos se genera información detallada sobre la evolución diaria del rendimiento de los pozos de riego, a partir de la caracterización de cada pozo, el consumo energético y el caudal medio obtenido en cada bombeo. Con estos datos, se calcula la eficiencia energética del bombeo (EEB) y se predice el valor que puede tener para el día siguiente, a partir de la programación de cada pozo y del histórico acumulado. También, se definen los umbrales de eficiencia óptima de los pozos, así como, las medidas a adoptar y la periodicidad de la generación de las alertas. Al mismo tiempo, se verifica qué día y a qué hora comenzará cada bombeo para determinar que se ha elegido el tramo tarifario más económico. Si no es así, se recomienda tramo con una tarifa eléctrica más reducida.

Para completar este primer conjunto de datos se ha recopilado la facturación energética mensual de los años agrícolas 2016 al 2019. Además, desde la empresa gestora de la gestión de la electricidad OMIE ¹⁸ se ha accedido a los precios establecidos para las siguientes 24 horas para predecir las horas óptimas de puesta en marcha de los bombeos. De esta manera, se ha podido obtener el consumo en KWh, las extracciones totales de agua realizadas, caudales promedio y el consumo de cada bombeo para cada uno de los períodos de facturación asociados a cada pozo, de lo que se ha podido calcular el coste económico de los bombeos por m³. En la Figura 3.2 podemos observar el consumo medio anual, en KWh, que se ha producido para cada uno de los períodos de facturación que tiene asignado cada uno de los bombeos y el precio medio del KW. Analizando la gráfica, observamos que los periodos más económicos son el P4, P5 y P6, por lo que hay margen

¹⁷<https://www.chsegura.es/es/cuenca/cartografia/servicios-web-de-mapas/directorio-de-servicios-web-de-mapas/>

¹⁸<https://www.omie.es/es/file-access-list?parents=>

de mejora para reducir el consumo energético, debido a que, todavía, se consume en los periodos P2 y P3 una cantidad equivalente a P6.

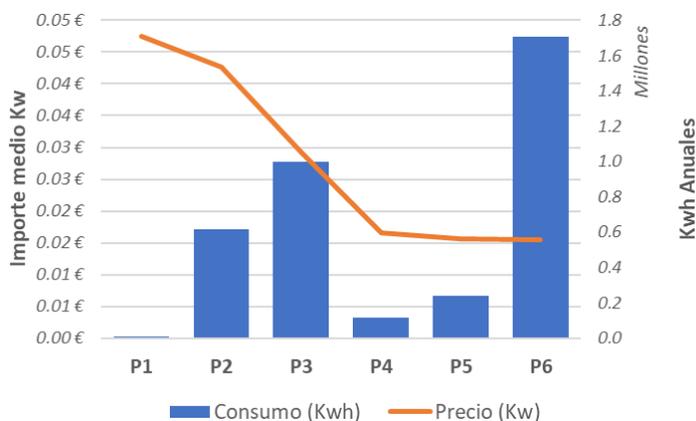


Figura 3.2: Coste energético según periodo de facturación y bombeo.

El segundo conjunto de datos es de naturaleza climatológica y está formado por datos recogidos de 261 estaciones automáticas agrometeorológicas ubicadas en las zonas regables de varios municipios españoles. Se han procesado cerca de 40 millones de observaciones procedentes de las variables: temperatura ($^{\circ}C$), humedad (%), precipitación (mm), velocidad del viento (m/s^2), dirección del viento ($^{\circ}$) y radiación (w/m^2), obtenidos cada hora desde el 01-01-2000 hasta el 31-03-2020. La procedencia de los datos ha sido, principalmente, del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación del Gobierno de España ¹⁹ junto con los servicios meteorológicos de Cataluña ²⁰ y La Rioja ²¹. Para la Región de Murcia, se han utilizado los datos proporcionados por el Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Medioambiental (IMIDA) a través de su Sistema de Información Agraria de la Región de Murcia (SIAM) ²². Para definir mejor las diferentes zonas climáticas asociadas a los frutales de hueso solo se han utilizado los registros comprendidos entre octubre y marzo, debido a que es cuando los cultivos están en el periodo más crítico de su desarrollo, siendo la temperatura la variable más influyente en dicho período.

Tras la recogida de los datos, estos son analizados para verificar que las variables están dentro de los umbrales óptimos y son consistentes. Mediante estos filtros se verifica si una observación está dentro de un rango predeterminado que puede ser fijo o dinámico. Los fijos pueden ser físicos (por ejemplo, la humedad no puede ser superior al 100%) o instrumentales (derivados de las especificaciones del sensor). Los dinámicos vienen dados por los registros meteorológicos extremos de cada zona, lo que se conoce como efemérides meteorológicas. Además, se desarrolla un módulo para eliminar los valores atípicos que pueden generar las mediciones de los sensores

¹⁹<http://www.siar.es>

²⁰<https://en.meteocat.gencat.cat>

²¹<https://www.larioja.org/agricultura/es/informacion-agroclimatica/red-estaciones-agroclimaticas-siar>

²²<http://siam.imida.es>

en bruto o en tiempo real, siendo estos valores el principal problema para asegurar la calidad de los datos climáticos. Para la validación de los datos se definen seis niveles de validación, según la norma UNE 500540:2004, Redes de estaciones meteorológicas automáticas: Directrices para la validación de los registros meteorológicos de las redes de estaciones automáticas. Validación en tiempo real", indicando que nivel de validación alcanza cada registro.

Una vez procesados los datos de las estaciones se realiza una clasificación termo-pluviométrica, según Köppen–Geiger, a nivel de España y mediante el uso de herramientas SIG se realiza un proceso geoestadístico que determina la zona productora de frutales de hueso, determinando que está formada por 5 zonas climáticas. Para la Región de Murcia se obtienen 4 zonas climáticas al ser una región más cálida; las características de cada una de las zonas se muestran en la Tabla 3.2. Además, de los datos obtenidos para la Región de Murcia podemos interpretar que al oscilar la temperatura media entre los 11,58 °C y 23,07 °C es una zona cálida para el desarrollo de nuevas variedades de frutales de hueso, con la salvedad de que se deben ubicar en zonas de regadío, ya que la pluviometría media anual de la Región ronda los 290 mm.

Tabla 3.2: Zonas climáticas y datos medios más representativos de la Región de Murcia.

Zona	Temperatura Media	Precipitación acumulada Media
Zona B (Clima mediterráneo continental)	9,12 °C	185 mm
Zona C (Clima mediterráneo litoral)	11,21 °C	165 mm
Zona D (Clima mediterráneo litoral)	13,02 °C	170 mm
Zona E (Clima mediterráneo semiárido)	14,59 °C	155 mm

Además, se han monitorizado los valores proporcionados por sensores de humedad del suelo para estimar la evolución de la demanda hídrica de los cultivos y comprobar que su adaptación es idónea. Los sensores están instalados en 28 de las 50 estaciones de la red de estaciones del SIAM y consiste en observaciones realizadas cada hora a diferentes niveles de profundidad (30, 60 y 90 cm.) e instalados a una distancia de 30 y 60 cm. del emisor de riego.

Por último, también se ha monitorizado la información referente a los cuadernos de explotaciones agrícolas, ya que permiten planificar, organizar y registrar todos los datos agrícolas relevantes, como aplicaciones de fertilizantes, nutrientes suministrados a los cultivos, tratamientos fitosanitarios realizados, seguimiento de la humedad o registro de eventos climáticos anómalos. Estos datos han sido obtenidos del Fondo Español de Garantía Agraria (FEGA) ²³ en estrecha colaboración con la Consejería de Agricultura y Agua de la Región de Murcia.

²³<https://www.fega.es/es>

3.2.2 Modelo de datos holístico para la gestión de información en las comunidades de regantes [R2]

Para apoyar la gestión y planificación de decisiones equilibradas, se necesitan mecanismos capaces de organizar la información relevante [81]. Debido a la falta de compatibilidad necesaria para gestionar la gran cantidad de datos que genera el sector agrícola y, concretamente, una comunidad de regantes. Surge la necesidad de proporcionar a los gestores agrícolas modelos de información estandarizados que permitan tomar las mejores decisiones posibles, permitiéndoles aprovechar todo el valor de los datos procedentes de sus instalaciones, cultivos o de fuentes externas.

Debido a la existencia de diversas plataformas y sistemas desplegados en el sector de la agricultura inteligente, se alimenta la complejidad de diseñar un sistema maestro que incorpore estos y otros sistemas tales como los sistemas meteorológicos o las imágenes de satélites. La creación de dicho sistema es difícil debido a la escala, las variaciones, la complejidad, los requisitos de gobernanza y la heterogeneidad del sector agro-tecnológico existente. Para contrarrestar esto, hay que fomentar la interoperabilidad, principalmente, en relación a los datos, e incluir características para la escalabilidad y la gobernanza de la propiedad de los mismos.

Uno de los primeros pasos debería ser definir un modelo de datos común para el sector agrario compatible con el modelo de información NGSi-LD comúnmente aceptado en el ecosistema FIWARE, que facilite la interconexión con otros modelos, servicios y usuarios. El modelo propuesto sigue un enfoque de entidad-atributo en el que las entidades representan elementos de interés reales o virtuales para la gestión de las parcelas de riego, monitorización de las instalaciones y uso eficiente del consumo energético en los bombeos. El modelo de información cubre los conceptos más significativos, las entidades y las relaciones que proporcionan el modelo fundamental para mejorar la toma de decisiones de una explotación agrícola. Esta modelización tiene el propósito de permitir que el resto de usuarios tenga un acceso estandarizado a la información procedente o generada por el sector agrícola.

Conceptualmente, el modelo se basa en el modelo de datos *AgriFood*, propuesto por FIWARE Harmonized Data Models ²⁴, focalizado en los requerimientos para el riego y el control de las parcelas de cultivos. Además, a la hora de definir las entidades o propiedades de nuestro modelo de información hemos combinado aspectos del núcleo de la ontología Smart Applications REFERENCE (SAREF), cuyo objetivo es permitir la interoperabilidad entre soluciones de diferentes proveedores y entre varios sectores de actividad dentro del marco de IdC, contribuyendo de esta manera al desarrollo del mercado digital global; concretamente, se han utilizado conceptos de dos de sus extensiones para los dominios energéticos SAREF4ENER ²⁵ y agrícolas SAREF4AGRI, por la falta de modelos que sean capaces de integrar todas las necesidades de una explotación agrícola. El modelo nace como una herramienta ágil para responder a los requerimientos dinámicos de las

²⁴<https://fiware-datamodels.readthedocs.io/en/latest/index.html>

²⁵https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/103400_103499/10341001/01.01.02_60/ts_10341001v010102p.pdf

comunidades de regantes, incluso, para ser funcionales en ecosistemas agrícolas más amplios. El modelo de información, Figura 3.3, está centrado en cuatro conjuntos de datos que abordan diferentes tareas dentro de la gestión de una comunidad de regantes:

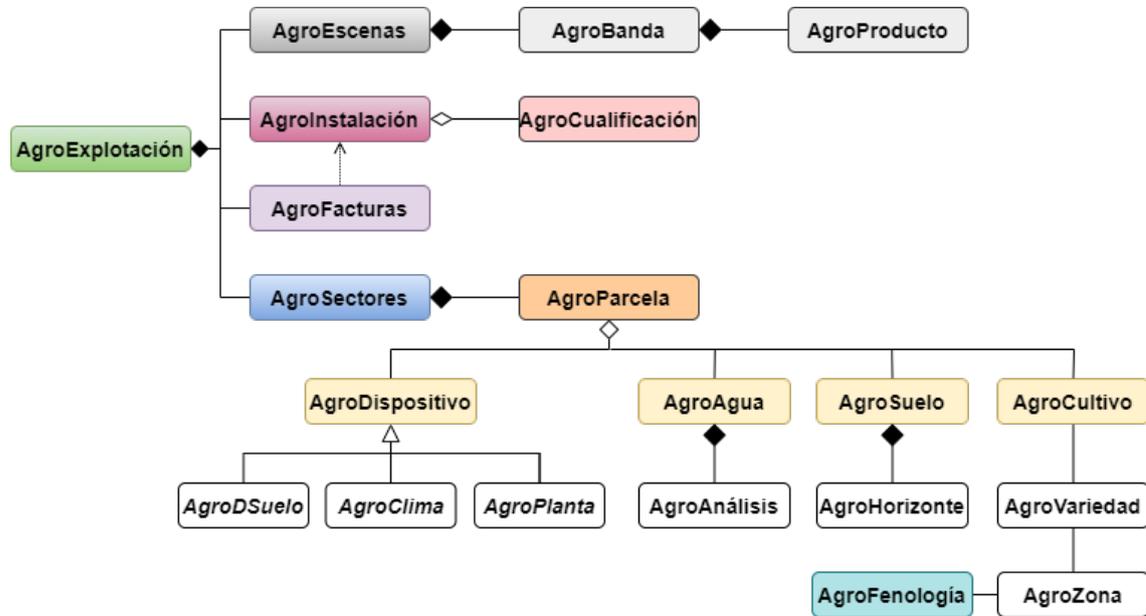


Figura 3.3: Modelo de información para la mejora de la toma de decisiones agrícolas.

1. **Instalaciones:** información actualizada de todas los tipos de instalaciones que conforman una comunidad de regantes (balsas de riego, filtrados, hidrantes, estaciones de bombeo, estructuras hidráulicas) y aquellas características necesarias para la gestión eficiente de las parcelas de riego.
2. **Parcelas de Riego:** datos referentes a todos aquellos atributos que son necesarios para la correcta monitorización y gestión de las parcelas cultivos de cada usuario, como los dispositivos asociados a las parcelas o cultivos, el tipo de suelo, el uso del agua, la humedad del suelo o el desarrollo vegetativo del propio cultivo.
3. **Facturación:** informes de los consumos y facturación energética generada y que son necesarios para mejorar la eficiencia de instalaciones, tan críticas como los bombeos agrícolas.
4. **Imágenes Aéreas:** imágenes satelitales de alta resolución o las producidas por pequeños sistemas aéreos no tripulados para procesar la información de los cultivos (falta de nitrógeno, estrés hídrico, desarrollo vegetativo) o el calculo de los índices de vegetación necesarios para el seguimiento del cultivo.

El modelo de información se centra en la gestión de una explotación agrícola representada por la entidad *AgroExplotación* encargada de agrupar los atributos de gestión necesarios para

administrar dicha explotación, así como, su dotación de agua asignada. Esta entidad es el vínculo de unión con el resto de conjuntos de datos a modelizar. Todas las entidades incluyen todos los datos obtenidos previamente en la sección anterior junto con algunos que se obtienen tras procesar la información recopilada, además, incluyen su geolocalización e información referente a la fuente de donde fueron obtenidos.

Para poder modelizar las imágenes aéreas utilizadas por los gestores agrícolas se define la entidad *AgroEscenas*, que incluye imágenes o escenas de cualquier satélite o vehículo no tripulado; estas escenas están compuestas por bandas, *AgroBanda*, de diferentes longitudes de onda. A su vez, estas bandas pueden generar productos derivados, *AgroProducto*, después de su procesamiento, como mosaicos (agregando dos o más escenas adyacentes) o índices de vegetación o agua, útiles para detectar y prevenir problemas en las parcelas de cultivo.

Otro elemento importante a caracterizar son las instalaciones que forman parte de una explotación agrícola, representada por la entidad *AgroInstalación*, donde se proporciona el tipo de instalación que define junto con sus atributos más representativos. Algunas instalaciones, como los pozos o bombeos, pueden tener una cualificación o indicador energético que se evalúa para generar la eficiencia energética de una explotación o instalación y que rango de mejora puede obtenerse, esta cualificación queda representada en el modelo con la entidad *AgroCualificación*.

La entidad *AgroFacturas* permite representar la facturación energética proporcionada por el proveedor de energía y su relación con algunas instalaciones que tienen una tarificación específica en función de los kW consumidos y que se divide en 3 o 6 periodos de tarificación en función de la potencia contratada. Debe mostrar el precio medio, tanto fijo como variable, de cada una de las bandas tarifarias asociadas a una instalación, así como el consumo generado en kW.

Sin lugar a dudas, la parte más importante de la modelización es la basada en las parcelas, representada por la entidad *AgroParcela*, que forman parte de una explotación agrícola y, a su vez, esta integrada en uno de los sectores de riego, entidad *Sectores*, en los que se divide la explotación agrícola para optimizar la distribución del agua. La definición de una parcela esta formada por cuatro pilares que permiten definirla de manera única:

- **Dispositivos**, representados por *AgroDispositivos*, son los dispositivos que proporcionan información a la parcela y se clasifican en función de los parámetros que observan: *AgroD-Suelo*, los que obtienen valores del suelo (sondas de humedad del suelo, temperatura o disolución del suelo); *AgroPlanta*, los que miden la evolución del cultivo (diámetro hoja o tronco, potencial hídrico del tallo o dendrómetros) y *AgroClima*, que son los dispositivos que registran las condiciones atmosféricas (temperatura, humedad, radiación o viento velocidad). Estos datos se utilizan para optimizar las decisiones agrícolas a tomar sobre el estado del cultivo o parcela.
- **Agua**, representado por *AgroAgua*, indica el tipo de agua utilizada y los parámetros que afectan el riego. *AgroAnálisis* gestiona los análisis de agua realizados en diferentes puntos

de la red de distribución hídrica y que suelen ser validados por una entidad certificadora. Estos análisis suelen ser necesarios para la fertilización y el riego, ya que describen la calidad y cantidad de nutrientes transportados por el agua.

- **Suelo**, representado por *AgroSuelo*, indica el tipo de suelo presente en la parcela. Esta entidad puede ser más detallada si se obtienen informes que indiquen las diferentes características de las capas (horizontes) que definen el suelo, entidad *AgroHorizonte*.
- **Cultivo**, representado por *AgroCultivo*, define el cultivo y la variedad, *AgroVariedad*, con la que se asocia la parcela. El cultivo está determinado por las diferentes fases fenológicas que determinan su crecimiento; *Agrofenología* proporciona los coeficientes de cultivo y su duración en el tiempo junto con otros parámetros necesarios para el correcto desarrollo del cultivo, como las horas frío que debe acumular para cambiar de estado vegetativo. La fenología está determinada por la variedad del cultivo y la zona climática, *AgroZona* ya que la zona influye en las condiciones climáticas óptimas para el desarrollo de los cultivos.

La principal característica de los mecanismos de interoperabilidad basados en IdC es la posibilidad de intercambiar información de forma homogénea en diferentes sistemas o aplicaciones. Uno de los elementos que posibilita este intercambio continuo de información es el uso de modelos de información. Para adquirir un valor más significativo, se debe unificar el vocabulario específico del sector utilizado, que viene definido por el conjunto de atributos que componen las entidades y sus relaciones [82]. Debido a que NGS-LD nos permite vincular datos de vocabularios u ontologías para generar una nomenclatura única nos va a permitir agregar un nivel de interoperabilidad adicional al modelo propuesto. En la Figura 3.4 muestra como se representa una entidad del modelo de información *AgroDispositivo*, concretamente, una estación climática, cumpliendo con la norma NGS-LD.

3.2.3 Arquitectura basada en IdC interoperable y flexible [R3]

Con la finalidad de ofrecer servicios útiles al agricultor, es necesario habilitar estructuras que integren los diferentes conjuntos de datos, automaticen los procesos generados y visualicen los resultados en un entorno amigable. Por este motivo, es necesario adoptar arquitecturas basadas en IdC, sobre interfaces y protocolos normalizados y abiertos que permitan la integración de fuentes de información heterogéneas, así como, la interacción con otras soluciones de terceros para intercambiar y explotar dicha información [83]. En un mundo donde todo está conectado, los sistemas aislados no tienen cabida; por tanto, la interoperabilidad es la característica fundamental que adopta nuestra propuesta para contribuir a un entorno más productivo en el que se intercambie información para un bien mayor.

Para mejorar la interoperabilidad de la información del sector agrario se diseña una plataforma formada por módulos específicos para la integración de dispositivos IdC, la explotación

```

{
  @context": [
    "https://uri.etsi.org/ngsi-ld/v1/ngsi-ld-core-context.jsonld",
    {
      "temperature": "http://purl.obolibrary.org/obo/IDOMAL_0000568",
      "relativeHumidity": "http://purl.obolibrary.org/obo/IDOMAL_0000419",
      "rain": "http://aims.fao.org/aos/agrovoc/c_6435",
      "solarRadiation": "http://aims.fao.org/aos/agrovoc/c_14415",
      "atmosphericPressure": "http://aims.fao.org/aos/agrovoc/c_693",
      "dew": "http://aims.fao.org/aos/agrovoc/c_2231",
      "windSpeed": "http://aims.fao.org/aos/agrovoc/c_29582",
      "windDirection": "http://aims.fao.org/aos/agrovoc/c_29583",
      "evapotranspiration": "http://aims.fao.org/aos/agrovoc/c_2741"
    }
  ],
  "id": "urn:ngsi-ld:WeatherObserved:weather001",
  "type": "AgroClima",
  "dateCreated": {
    "type": "Property",
    "value": "2020-10-01T10:00:00.00Z" },
  "description": {
    "type": "Property",
    "value": "Weather observed by automatic station" },
  "location": {
    "type": "GeoProperty",
    "value": { "type": "Point",
      "coordinates": [-1.1088954, 38.9036926] } },
  "device": {
    "type": "Relationship",
    "object": "urn:ngsi-ld:WeatherStation:weatherStation003" },
  "dateObserved": {
    "type": "Property",
    "value": "2020-10-01T10:00:00.00Z" },
  "temperature": {
    "type": "Property",
    "value": 10.8 },
  "relativeHumidity": {
    "type": "Property",
    "value": 68.30 },
  "rain": {
    "type": "Property",
    "value": 0 },
  "solarRadiation": {
    "type": "Property",
    "value": 114.83 },
  "atmosphericPressure": {
    "type": "Property",
    "value": 720 },
  "dew": {
    "type": "Property",
    "value": 0.63 },
  "windSpeed": {
    "type": "Property",
    "value": 0.6 },
  "windDirection": {
    "type": "Property",
    "value": "WE" },
  "evapotranspiration": {
    "type": "Property",
    "value": 2.02 }
}

```

Figura 3.4: Representación de una estación climática conforme a NGSI-LD.

de series históricas, con una interfaz basada en mapas y un módulo para mejorar la toma de decisiones agrícola. La arquitectura propuesta tiene una forma modular por capas, representada en Figura 3.5 que va desde el despliegue de sensores y el seguimiento de las técnicas de extracción de datos hasta el procesamiento inteligente de la información con el objetivo de mejorar la toma de decisiones agrícolas. Estas capas se basan en iniciativas abiertas y estándares como la que ofrece la Comunidad FIWARE [84] basada en la API NGSI-LD desarrollada por ETSI. Una de las características más significativas es su interoperabilidad, por lo que es posible integrar la información proporcionada por los sensores y otros servicios que utilizan la interfaz NGSI-LD. A continuación, se detallan las características principales que posee la arquitectura:

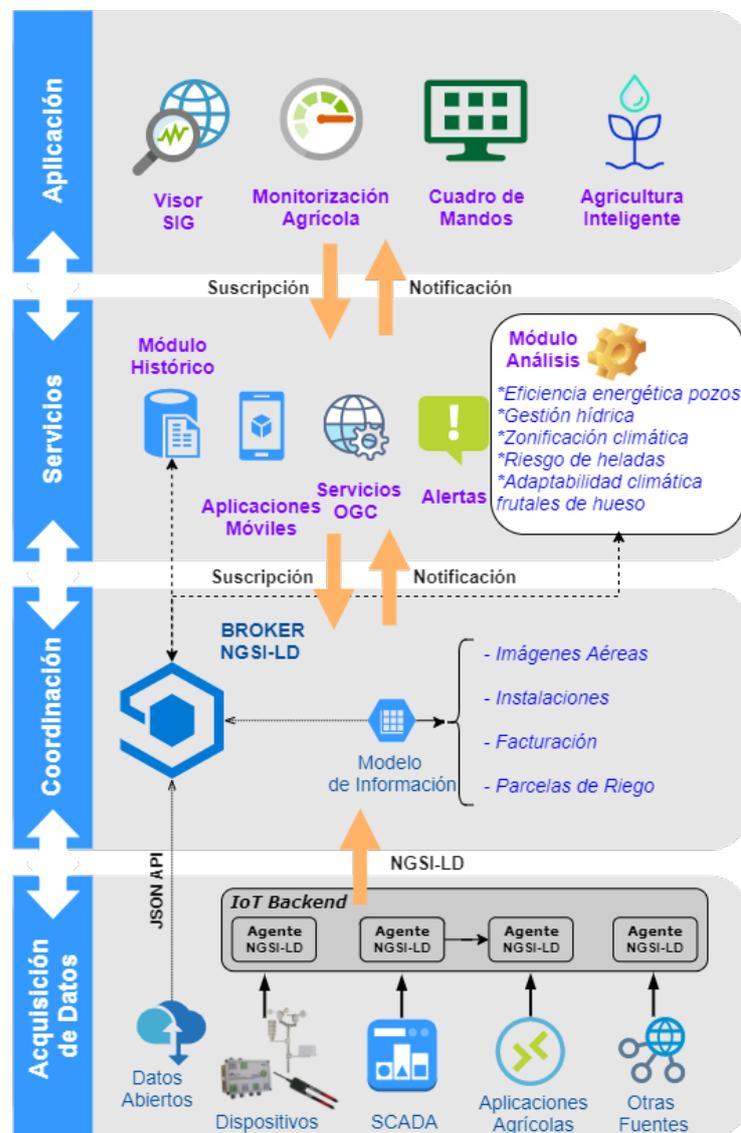


Figura 3.5: Distribución de las capas que definen la arquitectura propuesta.

1. **Escalable y flexible:** en lugar de estar centrada en un único proveedor, se actualiza con protocolos, tecnologías y características que fluctúan rápidamente. Es independiente de la red y puede integrarse con todos los sistemas tecnológicos vitales de una explotación agrícola. La escalabilidad es clave, ya que el sistema aumenta al incrementar las necesidades de la organización.
2. **Interoperable:** ofrece una amplia gama de agentes que facilitan la conexión con dispositivos utilizando protocolos IdC estandarizados, como Lightweight Machine to Machine (LWM2M) sobre Constrained Application Protocol (CoAP), JavaScript Object Notation (JSON), o UltraLight sobre HTTP/MQTT [38]. Asimismo, permite la utilización de agentes parametrizados para integrar cualquier otro tipo de futuros protocolos. Además, a nivel de aplicación, está abierta a la integración con otros sistemas utilizando tanto la API como los modelos de información basados en NGSI-LD.
3. **Eficiente y competitiva:** permite tomar decisiones precisas y oportunas en términos de gestión y procesos agrícolas. La capacidad de documentar automáticamente el estado de salud del cultivo o de los recursos naturales proporciona un diagnóstico eficiente y eficaz a los gestores.

La primera capa, *Adquisición de Datos*, está formada por las diferentes fuentes de información que conforman el sistema; estas incluyen sensores, sistemas de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA), información abierta disponible en Internet, aplicaciones agrícolas u otro tipo de información que ayude a mejorar la toma de decisiones. Estos conjuntos de datos emplean diferentes tecnologías de comunicación para transmitir la información a un módulo *IoT Backend* que está formado por Agentes IdC. Se requiere un módulo específico debido a las restricciones que imponen los módulos a la capacidad de procesamiento, la memoria e incluso la energía disponible para los dispositivos. Estas restricciones suelen impedir el uso de protocolos pesados a nivel de aplicación, por lo que se utilizan protocolos ligeros como el Constrained Application Protocol (CoAP), Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) o el Lightweight M2M. También, se integran otras soluciones como LoRa y Sigfox para realizar las comunicaciones con los diferentes dispositivos a través de Ethernet o redes móviles (por ejemplo, GPRS/3G/4G/NB-IoT/5G). Estos agentes se encargan de transformar la información de las diferentes fuentes y enviarla al *Broker* a través de NGSI-LD, en ambos sentidos hacia y desde el *Broker*.

La segunda capa, *Coordinación*, es el núcleo central de la arquitectura, transforma y prepara los datos en bruto en modelos de información NGSI-LD, permitiendo que los datos sean homogeneizados y procesados por la capa superior. El núcleo de esta plataforma es el *Broker NGSI-LD*. Se trata de un broker de información que expone una API REST HTTP basada en NGSI-LD tanto para el registro como para la consulta, así como, un enfoque de suscripción/notificación para enviar actualizaciones de datos y recibir notificaciones sobre los cambios. El primer paso es configurar los datos recibidos en el Broker; los Agentes IdC debe entonces proporcionarle

los datos a través de una entidad NGSI-LD en el Broker. Todos estos cambios se almacenan en una base de datos no relacional basada en objetos JSON o JSON, ya que deben proporcionar un acceso ágil y flexible; la información almacenada de cada entidad se sobrescribe, manteniéndose únicamente el estado actual. En este punto, estos datos pueden ser transmitidos para que los consumidores puedan suscribirse a esta información. La interfaz NGSI-LD se utiliza para enviar actualizaciones de datos y recibir notificaciones sobre cambios en los dispositivos. El Broker nos permite comunicar todos los datos de cualquier entidad que gestione la plataforma y realice actualizaciones de la misma.

La tercera capa, *Servicios*, facilita el almacenamiento, análisis y procesamiento. Esta capa incorpora el módulo de históricos para integrar datos de series históricas ampliando la funcionalidad del Broker, se adhiere al mismo modelo de información, por lo que no requiere ningún otro proceso de armonización de datos. Incorpora una API ad hoc para recuperar los datos históricos junto con funciones de agregación sencillas (suma, media, mínimo o máximo en un periodo determinado) sobre los datos. La analítica de datos es uno de los componentes críticos de cualquier solución basada en IdC; entendiendo como análisis la capacidad de encontrar información valiosa a partir de sus datos. El análisis puede ser tan simple como la agregación y visualización de datos o puede ser tan elaborado como el uso de aprendizaje automático o inteligencia artificial. El módulo de analíticas se encarga de validar y generar información que ayuda a mejorar la toma de decisiones, en cuanto a: eficiencia energética de los bombeos agrícolas, planificación del riego, zonificación climática, riesgo de heladas o adaptabilidad climática para los frutales de hueso; una vez realizado el proceso de análisis se habilitan reglas basándose en los indicadores generados recibiendo las notificaciones en los teléfonos móviles en función de su nivel de acceso. Además, el sistema genera servicios para facilitar el intercambio de información a través de una aplicación móvil o mediante servicios WMS.

La última capa, *Aplicación*, se basa en la comunicación y está diseñada para facilitar la toma de decisiones. Los datos recopilados y la información generada se muestran a los usuarios de forma sencilla, lo que les permite rastrear los parámetros relacionados con el activo que se desea monitorizar. La información se puede mostrar en forma de números, gráficos, alertas o tablas; permitiendo al usuario obtener información útil y tomar decisiones inteligentes. Consta de módulos específicos para la monitorización de los servicios generados, la extracción de datos esenciales y una interfaz basada en mapas. El intercambio de información en ambas direcciones (desde y hacia) plataformas de terceros, también, es posible gracias a la API basada en NGSI-LD. Los usuarios potenciales del sistema son los gestores o técnicos de las explotaciones, los productores agrícolas, las empresas de mantenimiento de las instalaciones y, en menor medida, las compañías de seguros agrarios por la evolución de las heladas en las zonas climáticamente no adaptadas. En función del tipo usuario, la plataforma ofrece servicios personalizados para que cada usuario reciba la información acorde a sus necesidades. Algunos de los servicios prestados para mejorar la toma de decisiones agrícolas:

- Se proporcionan informes y gráficos fáciles de utilizar de los datos necesarios para la gestión del riego en tiempo real.
- Generar visualizaciones y gráficos apilados que permitan un control predictivo de los pozos de riego, junto con la definición de estrategias inteligentes para el uso de las tarifas eléctricas.
- Permite establecer reglas personalizadas por tipo de usuario para activar notificaciones y acciones basadas en las mediciones proporcionadas por los sensores o las estaciones meteorológicas.
- Un motor de recomendación proporciona información personalizada en función de la zona geográfica, los indicadores bioclimáticos y la idoneidad de los grupos varietales mediante un visor geográfico.

Para comprobar el comportamiento de la arquitectura a partir de la característica de distribución de información que ha adquirido el *Broker NGSII-LD*, se analiza el tiempo de respuesta obtenido tras la realización de múltiples operaciones en los diferentes modos de funcionamiento del *Broker NGSII-LD*; en la Tabla 3.3 se muestran los valores más significativos obtenidos en las pruebas, obteniendo las siguientes conclusiones:

Tabla 3.3: Tiempo medio de respuesta (ms) para cada tipo de operación y modo.

Modo de operación	Crear	Modificar	Buscar	Consultar	Borrar
Entidad					
<i>Valor medio</i>	17,76	37,31	30,72	-	36,56
<i>Intervalo de confianza</i>	1,46	2,99	2,63	-	2,56
Suscripción					
<i>Valor medio</i>	257,95	-	-	18,57	16,18
<i>Intervalo de confianza</i>	2,23	-	-	1,54	1,56
Proveedor de contexto					
<i>Valor medio</i>	510,28	-	27,51	-	262,45
<i>Intervalo de confianza</i>	5,25	-	1,37	-	6,39

- El modelo de publicación/suscripción permite reducir el número de consultas, ya que no es necesario realizar consultas periódicas para recibir actualizaciones de los datos almacenados en la plataforma. El tiempo de creación es mayor, ya que hay que ajustarse al modelo de datos propuesto a la hora de añadir los datos.
- La gestión de proveedores de contexto externos es un proceso que agiliza el acceso a la información, haciendo el proceso más transparente para el cliente final. La misión del Broker es actuar como intermediario entre el cliente y el proveedor de contexto. Por ello,

los tiempos de búsqueda y consulta son más cortos en comparación con el resto de las operaciones.

3.2.4 Automatización de modelos preventivos para eficiencia energética de pozos de riego [R4]

Uno de los mayores problemas a los que se enfrenta las explotaciones agrícolas es el uso no eficiente de la gestión energética en el bombeo del agua para regadío. Los técnicos encargados de su gestión siguen utilizando técnicas tradicionales, manuales o empíricas, lo que genera un mayor consumo de energía y coste económico. El consumo de agua y energía necesario para distribuir el agua puede minimizarse mediante una planificación cuidadosa y la aplicación de medidas de eficiencia en el riego. Hay varios factores determinantes en el potencial de ahorro; algunos son fáciles de visualizar, como la potencia, las horas anuales de funcionamiento o el estado de las instalaciones, pero otros no son tan evidentes como la eficiencia o el rendimiento de las bombas. En consecuencia, la energía consumida en el proceso de extracción y distribución del agua por la explotación representa una parte importante de la factura energética que los agricultores deben afrontar. La optimización de esta operación garantizará la sostenibilidad económica de las comunidades de regantes [85].

Los indicadores energéticos son una herramienta esencial en las auditorías energéticas de las instalaciones de riego. Estos indicadores relacionan el consumo energético y la actividad económica o productiva. Gracias al uso de estos indicadores, es posible evaluar y visualizar la evolución de diferentes aspectos de la instalación. Para aplicar los indicadores, se pueden seguir las indicaciones propuestas por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía para la auditoría de comunidades de regantes [86].

Considerando que una instalación de riego está formada por una red de estaciones de bombeo. El indicador EEB se determina relacionando la potencia absorbida que representa la potencia activa media obtenida con el analizador de redes durante el periodo de medición y la potencia suministrada que representa la potencia teórica media que suministra el bombeo en cada momento.

El modelo de información y la arquitectura mostrada en las secciones anteriores se ha aplicado en una comunidad de regantes para estimar la eficiencia energética de la red de bombeo en la instalación de riego, mediante la integración de conjuntos de datos heterogéneos y la definición de indicadores de eficiencia. El sistema permitirá a los gestores de las explotaciones agrícolas tomar sus propias decisiones para mejorar el rendimiento de los pozos y, al mismo tiempo, obtener una reducción de la factura energética, lo que permitirá una producción agrícola sostenible.

La monitorización de este indicador ayudará al gestor de la instalación y a la empresa encargada del mantenimiento de las bombas a realizar un mantenimiento predictivo para prevenir futuras ineficiencias y determinar las acciones a realizar para mejorar el bombeo de forma remota.

El uso de indicadores, como el propuesto, junto con la ayuda de los datos extraídos de las instalaciones y de las tarifas eléctricas permiten adoptar medidas correctoras que pueden o no requerir costes de inversión, tales como;

- Desplazamiento del consumo a horas de menor coste económico (acción que no ahorra energía, pero sí reduce costes) gracias a la integración de las tarifas eléctricas en el sistema.
- La regulación de las válvulas para adaptar el punto de funcionamiento de una bomba al régimen de máximo rendimiento gracias a la monitorización del indicador EEB y de los variables que definen el comportamiento de los pozos.
- La sectorización del parcelario o modificación del mismo cuando la red de distribución de agua ya está monitorizada.
- Instalación de nuevos equipos, tales como convertidores de frecuencia, debido a un rendimiento no adecuado de las bombas.
- Sustitución o modificación de los bombeos existentes por haber perdido eficacia.

Una vez los datos han sido organizados, se toman decisiones sobre los datos que a utilizar mediante el uso de criterios relacionados con el cumplimiento de los objetivos establecidos, la calidad de los datos o las limitaciones técnicas para “elevar“ el nivel de calidad de los datos exigidos. Esta fase incluye la inserción de valores por defecto adecuados o el uso de modelos para estimar los valores que faltan. Para llevar a cabo esta tarea, hay que definir los umbrales de cada variable por los técnicos responsables de la comunidad de regantes. Debido a que los datos de los pozos se procesan cada 30 minutos, y para evitar valores incorrectos, se define un protocolo para evitar la generación de datos anómalos; de donde los datos del día actual no se tendrán en cuenta a la hora de realizar el mantenimiento, si hay un 30% de fallo en las lecturas de ese día, pero si se está en periodo de riego, solo se descarta si supera el 10% de las horas de funcionamiento del pozo. Al disponer de las características técnicas de los pozos, junto con el resto de los datos, permiten una aproximación de forma ajustada del consumo específico de energía en tiempo real. Con estos datos se define el indicador EEB para analizar y ver la evolución de los flujos de eficiencia de los pozos y, por tanto, su rendimiento energético.

Una vez integrados los conjuntos de datos, se definen los umbrales óptimos de trabajo de los pozos (con la colaboración de los técnicos responsables), en función del indicador EEB calculado: *Óptimo* (superior al 70%), *Normal* (entre 60% y 70%) y *Fuera de rango* (por debajo del 60%). Tras el establecimiento de los umbrales de eficiencia, se definen reglas que indican de un rendimiento anormal. Si un pozo cae por debajo del 45% durante el día, se genera un aviso y la bomba se detiene. La Figura 3.6, muestra cómo se generan estas alertas; en este caso, se activa cuando el indicador de eficiencia de bombeo está por debajo del 65%, durante 60 minutos (para que los técnicos sean alertados con tiempo suficiente para tomar medidas preventivas).

Figura 3.6: Definición de reglas para alertar del nivel de eficiencia de cada bombeo.

Los resultados obtenidos parten de la necesidad, por parte de la comunidad de regantes, de crear un sistema que fuera capaz de determinar la eficiencia de cada bombeo, y evitar el cierre del pozo y determinar así los posibles fallos en el rendimiento. Un dato a tener en cuenta en el rendimiento de los pozos es la altura, ya que a mayor diferencia de altura de bombeo, menor será el caudal debido al aumento de metros de columna de agua que debe superar la bomba. Por el contrario, cuanto más parecidos sean en altura los puntos de aspiración y expulsión, mayor será el caudal obtenido.

Una de las funcionalidades mejor valoradas por los técnicos ha sido la visualización de forma directa de la eficiencia del bombeo del día anterior y de la media de los últimos siete días, como se puede ver en la Figura 3.7, lo que les hace determinar la evolución del comportamiento de cada pozo.

Durante la última campaña agrícola, y gracias a los datos procesados, observamos que el coste medio del bombeo de agua es de 0,87 €/m³/mes. Este valor es elevado debido al sobrecoste producido en dos de los pozos con un coste estimado de 1,17 €/m³/mes y 1,03 €/m³/mes. Este coste medio se estima que puede reducirse en torno a un 23 % gracias al uso del indicador de eficiencia. Durante los meses de mayor consumo de agua, se toman medidas correctoras una vez que se alerta de los valores críticos generados por la monitorización e integración de los diferentes inputs que definen la eficiencia del bombeo.

Debido al elevado coste de la extracción de agua y la pérdida de eficiencia del bombeo con



Figura 3.7: Eficiencia del bombeo del día anterior y de la media de los últimos siete días.

el paso del tiempo, y basándose en los resultados obtenidos, la comunidad adopta dos medidas correctivas: sustitución del equipo de bombeo en uno de los pozos e instalación de un variador de frecuencia en otro, o variación de la altura de trabajo del bombeo. Se estima que gracias a las medidas generadas por la monitorización de los bombeos, se ha conseguido un ahorro cercano a los 45.000 euros en la facturación energética anual. Las herramientas aplicadas que han permitido que se produzcan estas mejoras han sido:

- * Utilización de datos heterogéneos procedentes de sensores, sistemas de control y tarifas eléctricas, e integración en un único modelo de datos. Toda la información está integrada en una única plataforma, lo que evita consultar la información en múltiples aplicaciones.
- * Análisis de datos que generan alertas y predicen la eficiencia energética de bombeo.
- * Cálculo diario del indicador EEB para monitorizar el rendimiento del bombeo, lo que, junto con la monitorización de otras variables (presiones, temperatura del motor o caudales), permite anticipar a la disminución del rendimiento.
- * Acceso a los precios a 24 h vista para determinar franja horaria óptima para activar el pozo.
- * Acceso del rendimiento de los pozos a las empresas encargadas de su mantenimiento, para mejorar las revisiones previstas y evitar visitas innecesarias. Con esta medida, la comunidad puede establecer con las empresas un sistema para reducir el coste anual del

mantenimiento o mejorar los servicios ofrecidos ya que pueden minimizar la visitas a las instalaciones.

3.2.5 Adaptabilidad geográfica de frutales de hueso según variabilidad climática [R5]

Los cambios en las temperaturas y precipitaciones anómalas, junto con el aumento de las efemérides más extremas a medio y largo plazo, ya están afectando al rendimiento de los cultivos en Europa. Para adaptar la agricultura a los fenómenos meteorológicos extremos, es fundamental proporcionar información meteorológica de utilidad para que los agricultores eviten las pérdidas debidas a estos fenómenos. Además, dicha información permitirá elegir las variedades de cultivos que se adaptan mejor a la variabilidad climática, ya que los fenómenos extremos durante la floración afectan al desarrollo del cultivo [87]. Cada variedad de cultivo necesita una combinación específica de condiciones climáticas para poder alcanzar su mayor potencial; sus ciclos están estrechamente ligados a eventos particulares que ocurren en determinados momentos [88]. El aumento de las temperaturas hace que los frutales florezcan antes y se desarrollen más rápido, lo que provoca que en el mercado aparezcan variedades tempranas con menor necesidad de frío [89]. Para recomendar qué grupo varietal es el más adecuado en una zona determinada, necesitamos obtener dos tipos de datos: climáticos y fisiológicos. Gracias a las series históricas, podemos clasificar el tipo de clima de la zona elegida. A partir de los datos climáticos en tiempo real y de los datos de los sensores situados en la planta, podemos determinar si el crecimiento del cultivo es óptimo y las prácticas agrícolas han sido las adecuadas. A partir de los datos fisiológicos del cultivo, obtenemos las características mínimas necesarias para que un cultivo genere los mayores rendimientos (kg por hectárea) en una zona determinada. Los sensores nos proporcionan información de la planta para determinar si la fisiología del cultivo se está desarrollando correctamente y si la fertirrigación está siguiendo los patrones indicados para dicha variedad. Gracias a la integración de los diferentes conjuntos de datos, podemos recomendar la idoneidad geográfica de un determinado grupo varietal en función de la temperatura.

Para poder generar este servicio hemos realizado la implantación de la arquitectura propuesta, en la Sección 3.1.2, con el objetivo de determinar la idoneidad geográfica de los frutales de hueso conforme a la información bioclimática. La Figura 3.8 muestra el esquema seguido para realizar dicha instanciación.

Una vez recogidos los datos climáticos, es necesario comprobar los efectos de las variedades, las necesidades ecológicas y la respuesta fisiológica al estrés ambiental en las diferentes fases fenológicas. Para determinar este proceso, es necesario disponer de la información proporcionada por los cuadernos de campo, junto con el apoyo de sensores planta que permitan validar la evolución del cultivo. Los cuadernos de campo o de explotación ayudan a planificar, organizar y registrar todos los datos relevantes de la explotación, como las aplicaciones de fertilizantes, los nutrientes suministrados a los cultivos, los tratamientos fitosanitarios, los controles de humedad

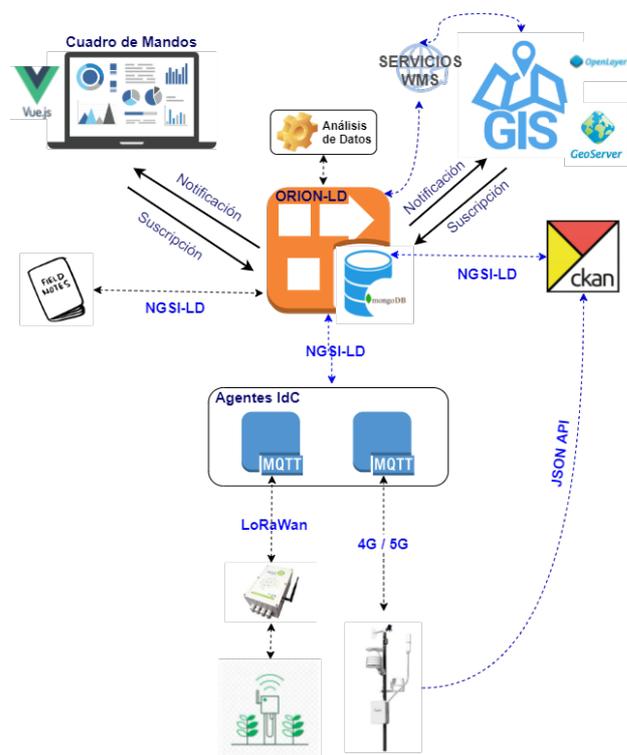


Figura 3.8: Esquema para instanciar la arquitectura y determinar idoneidad geográfica.

o los eventos climáticos anómalos [90].

Los frutales de hueso necesitan acumular una cantidad determinada de frío durante el invierno para superar la etapa de latencia y luego experimentar temperaturas cálidas para florecer [91]. Este proceso condiciona la adaptación de los grupos varietales en cada zona, siendo el mayor inconveniente para introducir estos cultivos en latitudes más cálidas. Por lo tanto, la obtención de información sobre los requerimientos de bajas temperaturas de cada grupo varietal permitirá a los productores utilizar esta información para anticipar el rendimiento futuro de sus explotaciones y la incorporación de nuevas variedades en otras regiones.

Para controlar el volumen de agua en el suelo y comprobar que las prácticas agrícolas se han llevado a cabo correctamente, se instalan sondas de humedad del suelo a distintos niveles. Además, se definieron umbrales de riego óptimos para cada cultivo y se generaron notificaciones de filtrado que, en determinadas condiciones, permiten actuar sobre los hidrantes de riego, para permitir un uso eficiente del agua. Los sensores o sondas se instalan en zonas similares de la parcela. Estos sensores determinan el contenido de agua del suelo en un momento determinado; los valores se expresan en % o mm de agua por cada 100 mm de profundidad del suelo (separación entre cada uno de los niveles). Además, nos permiten monitorizar la planta para evitar momentos de estrés hídrico o episodios de percolación. En la Figura 3.9, se muestra un gráfico con la evolución de las lecturas realizadas por uno de los sensores de humedad de suelo instalados.

También, utilizamos imágenes de satélite, en nuestro caso Sentinel-2, para ampliar el se-

CAPÍTULO 3. CONTRIBUCIONES DE LA TESIS

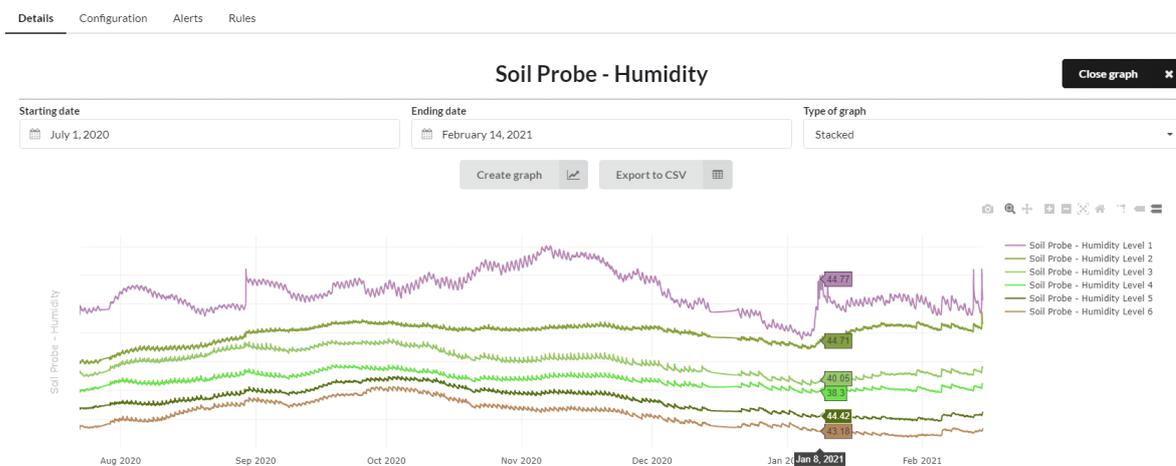


Figura 3.9: Niveles de humedad del suelo para monitorizar el estrés hídrico.

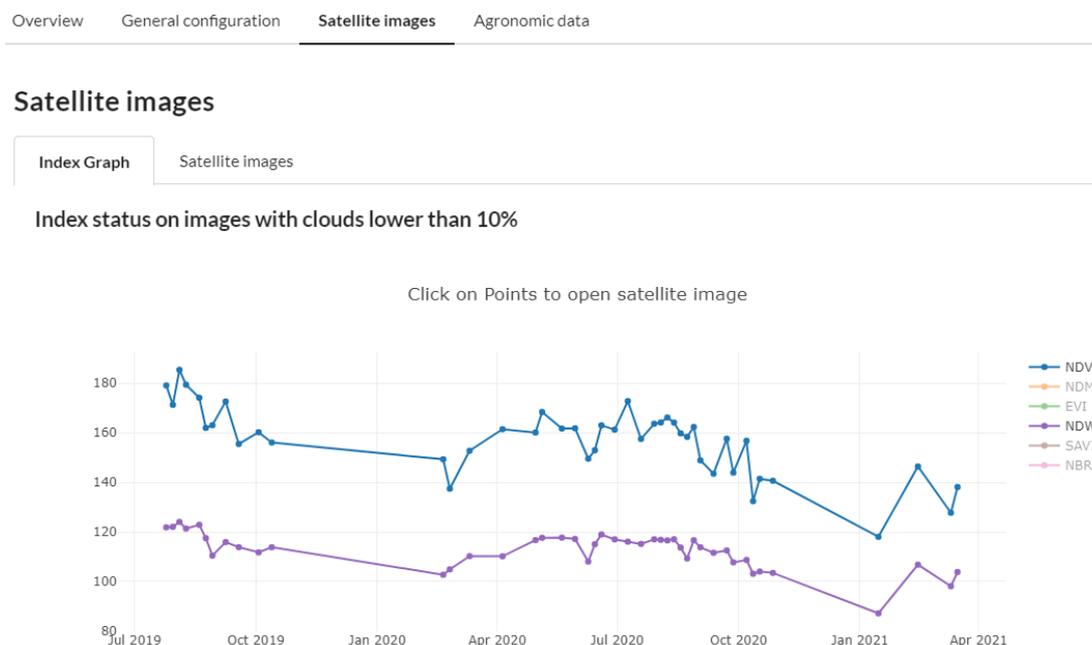


Figura 3.10: Índices NDVI y NDWI para el seguimiento por satélite del estado de los cultivos.

guimiento del desarrollo vegetativo de las explotaciones y comprobar que el cultivo se está desarrollando según la información recogida en los cuadernos de campo. Para ello, utilizamos el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Del mismo modo, al utilizar el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI), estudiamos la distribución espacial del contenido de humedad superficial en toda la parcela de estudio, a diferencia de los sensores de humedad del suelo que lo hacen en un solo punto. En la Figura 3.10 se muestran los valores de NDVI y NDWI, junto con la posibilidad de acceder a las imágenes de satélite de la propia parcela.

Una vez procesados todos los datos, el siguiente paso es la recogida, adquisición, digitalización,

georeferenciación y codificación de los mismos dentro de un marco SIG. Para ello, se desarrolla un visor que dispone de los datos actuales (mapas, imágenes, ortofotos y tablas) de forma ordenada y compatible para generar información complementaria que ayude en la toma de decisiones.

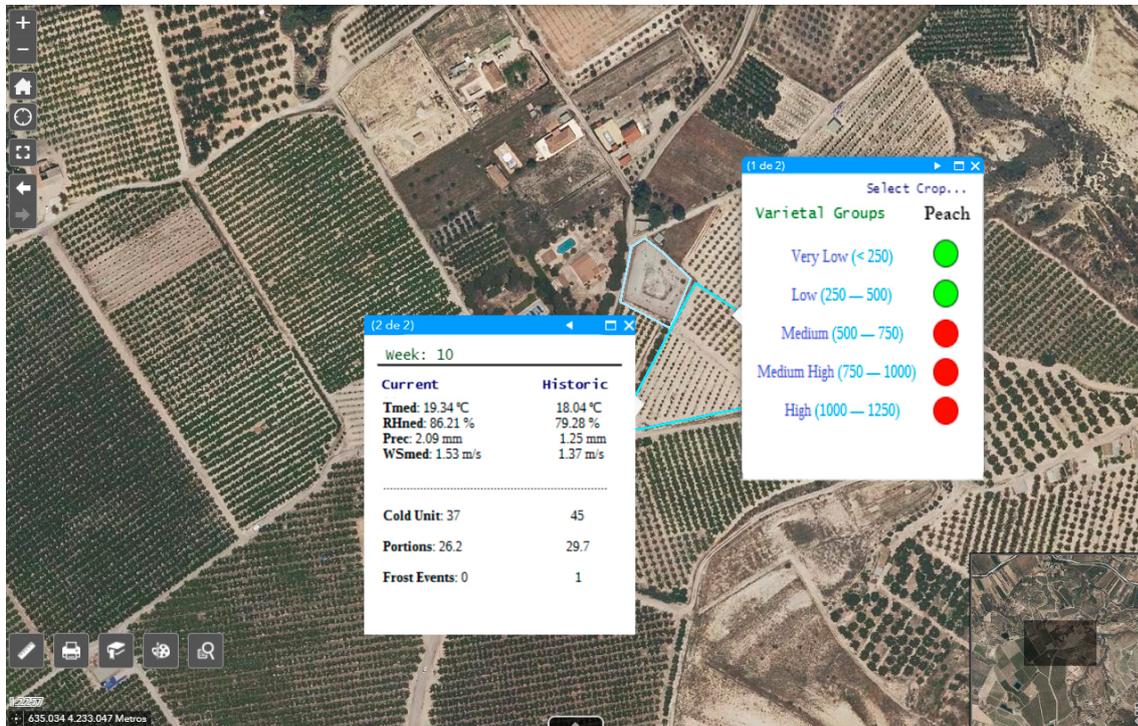


Figura 3.11: Visor para la recomendación de implantar grupos varietales en una zona determinada y la evolución de las variables climáticas (actuales e históricas) en el área seleccionada.

Para determinar la recomendación de la elección del mejor grupo varietal en una zona concreta, se ha añadido en el visor la idoneidad de implantar o no una determinada variedad en el lugar seleccionado, en función de las necesidades de frío de cada cultivo. En la Figura 3.11 el visor geográfico nos muestra, en la ventana de la derecha, una especie de semáforo que nos indica la idoneidad de implantar dicho cultivo. También, se muestra, ventana de la izquierda, la evolución climatológica histórica durante la semana actual, junto con los datos de necesidades de frío; también, se incluye la probabilidad de ocurrencia de heladas o eventos anómalos, lo que permite mejorar la productividad y evitar pérdidas económicas por no cumplir con los requerimientos de frío de la variedad seleccionada en dicha zona.

3.3 Lecciones Aprendidas

El principal catalizador de este trabajo son los datos reales utilizados en el sector agrícola. Los datos procedentes de sensores y dispositivos basados en IdC modelizan la dinámica real del entorno y se ha demostrado que su análisis puede proporcionar la mejora de los servicios

y la creación de otros nuevos. En esta Tesis se han desarrollado soluciones que mejoran la toma de decisiones de las explotaciones agrícolas mediante la integración y análisis de datos heterogéneos desarrollando nuevos servicios que aborden la eficiencia energética de los bombeos y la adaptabilidad climática de los frutales de hueso en nuevas zonas.

La capacidad de expresar en un modelo de información los conceptos y relaciones de los datos de una explotación agrícola resulta importante para que los técnicos responsables puedan manifestar de forma clara cuáles son las acciones permitidas y prohibidas para evitar un mal uso de la gestión de la información. No solo es útil para los técnicos agrícolas, sino para los proveedores de servicios u otras empresas agrícolas ya que les permite conocer con precisión qué recursos pueden obtener y reutilizar para evitar duplicidad de datos y generar mecanismos que permitan mejorar la interoperabilidad del sector agrícola. Por estos motivos, el uso de modelos de información se considera beneficioso para permitir la integración de cualquier servicio, dispositivo o elemento característico dentro del sector agroalimentario.

La arquitectura basada en IdC nos posibilita el despliegue de sistemas que permiten la fusión de datos y la integración de procedimientos de análisis de datos, con el objetivo de mejorar la digitalización de la agricultura mediante la creación de nuevos servicios que mejoren la toma de decisiones. Una arquitectura basada en IdC permite la integración de dispositivos de diferentes proveedores, instrumentar normas e interfaces abiertas y modelos de información para mejorar la toma de decisiones del sector agrícola que se han mapeado al modelo de datos basado en NGSi-LD. Adicionalmente, explota la información almacenada para analizar los factores asociados al proceso productivo, la evolución de los cultivos y el uso óptimo del agua de riego en las explotaciones agrícolas. El paso dado al adoptar NGSi-LD contribuye, activamente, al crecimiento de los modelos para la agricultura representando un paso importante para materializar la oportunidad de generar un mercado global de soluciones que dote de inteligencia al sector agroalimentario. Al hacer esto, las técnicas aplicables al sector agrícola pueden mejorar significativamente y permitir obtener rendimientos sociales, económicos y ambientales sostenibles más elevados. Además, la gama de servicios que puede llegar a ofrecer la arquitectura se puede ampliar, como resultado del nivel de interoperabilidad logrado.

Por otra parte, se ha comprobado que gracias a la integración de datos dispares mediante la arquitectura propuesta se han desarrollado servicios que permiten mejorar la realización de las tareas agrícolas diarias. Dado que uno de los principales consumidores de energía de las explotaciones agrícolas son los pozos de riego, se monitoriza el bombeo agrícola. Por ello, se han integrado indicadores energéticos que previenen el consumo en periodos de tarificación elevados y mejoran el mantenimiento de las instalaciones; teniendo en cuenta los cambios que se van a producir en la facturación eléctrica agrícola, estos mecanismos de monitorización avanzados van a permitir abaratar los gastos de las explotaciones agrícolas. Otro elemento a tener en cuenta viene marcado por la variabilidad climática en la que nos encontramos y que nos obliga a calcular las condiciones actuales que determinan el comportamiento de las variedades de cultivo en zonas

geográficamente distintas. El diseño de un sistema que determine estas condiciones mejora la toma de decisiones sobre el grado de adaptación climática de las variedades a cada zona; lo que conlleva un aumento de la productividad de los árboles y anticipa escenarios para la alerta temprana sobre la conveniencia de ubicar variedades en zonas en función de sus requerimientos de frío y del riesgo de heladas.

Todos estos mecanismos son pasos que la agricultura está dando hacia una transformación digital inteligente basada en conceptos de IdC. Esta Memoria de Tesis contribuye no solo a la gestión eficiente de las explotaciones agrícolas sino, también, a la gestión diaria realizada por los técnicos, ya que permite la toma de decisiones basada en evidencias. Combinando la analítica de datos con los avances tecnológicos y el uso de plataformas basadas en IdC, nuestro objetivo es definir servicios que permitan utilizar los recursos disponibles de manera eficiente y sostenible, especialmente, el agua.

3.4 Conclusiones y Trabajos Futuros

El trabajo de esta Tesis propone la utilización de una plataforma basada en IdC para la integración de diferentes fuentes de datos procedentes de sensores, servicios agronómicos, SCADA y series históricas, y cómo estas fuentes pueden ser gestionadas conjuntamente para proporcionar un sistema de apoyo a la toma de decisiones agrícolas. El plan de trabajo de esta Memoria de Tesis Doctoral está conectado a varias investigaciones sobre la IdC y los sensores. Siendo una de las piezas clave la integración de datos de los sensores de las explotaciones agrícolas, estaciones meteorológicas y otros sensores, gracias al uso de una arquitectura basada en IdC extensible y flexible.

Este trabajo de investigación está centrado en el desarrollo de un modelo de información común basado en estándares que permiten modelar la información agrícola en el campo de IdC mediante el uso de NGSI-LD con el fin de explotar y generar nuevas decisiones de conocimiento basadas en la agricultura inteligente. Se ha planteado el desarrollo de una arquitectura para la solución "*Smart*" conocida y aplicada a otros sectores, dicha arquitectura está basada en la estratificación de los diferentes servicios, desde los datos hasta el conocimiento, sobre la base de los diferentes mecanismos de procesamiento que demuestran la potencia de las plataformas basadas en IdC.

Por un lado, desde el punto de vista técnico, se ha logrado la homogeneización del funcionamiento de los sistemas de explotación agrícola, mediante el uso de protocolos de comunicación y transmisión de datos, la integración de fuentes de datos heterogéneas y el uso de modelos de información para armonizar datos que no tenían ningún vínculo previo. Gracias, al uso de un modelo de información se ha creado una base de conocimiento para compartir/exponer datos de manera confiable entre los técnicos agrícolas, así como, para la obtención de indicadores de desempeño y la generación de servicios inteligentes que permitan optimizar la producción agrícola,

minimizar el coste y ayudar a los sectores involucrados en la agricultura a tomar decisiones en beneficio del crecimiento sostenible.

Desde el punto de vista agrícola, se han generado servicios que inciden en la eficiencia de la producción. Por un lado, debido a las cambiantes condiciones climáticas agrícolas se ha puesto en marcha un servicio personalizado que permite adaptarse a estos cambios; proporcionando información al responsable técnico sobre la idoneidad climática para situar los cultivos en la zona con las mejores condiciones climáticas, lo que hará que la planta se adapte mejor a la zona y requiera menores técnicas de cultivo y, por tanto, conseguir un cultivo más sostenible. Desde el punto de vista funcional el sistema desarrollado responde a dos preguntas:

1. ¿Qué características agroclimáticas se dan en un lugar concreto? Gracias a la comprobación de las tendencias agroclimáticas, biofísicas, fenológicas o agronómicas, permite determinar la evolución agroclimática necesaria para el seguimiento de un determinado grupo varietal.
2. - ¿Es aconsejable producir un grupo varietal específico en esta zona? Se proporciona una lista de variedades adecuadas para un determinado período en función de los requerimientos de frío necesarios de cada grupo varietal; además, se estima la probabilidad de heladas que pueden producirse en la zona.

Por otro lado, debido a que la extracción y el bombeo de aguas subterráneas para el riego generan un elevado consumo energético, se hace necesario el análisis de los parámetros de funcionamiento de estas instalaciones y su monitorización para determinar niveles óptimos de rendimiento y eficiencia energética. Por ello, se ha establecido un sistema de alerta preventiva para determinar el rendimiento de cada una de las bombas: óptimo, mejorable o fuera de rango, lo que permite la estimación del consumo energético en función de las horas de trabajo. La posibilidad de consultar las tarifas eléctricas antes de planificar la puesta en marcha de los bombeos ha permitido evitar un elevado consumo energético, mediante la generación de alertas. Como resultado de la supervisión y control de la eficiencia del bombeo durante el periodo correspondiente a la campaña 2019, el ahorro estimado ha alcanzado los 43.500 euros en la facturación energética, ahorrando cerca de un 10% respecto a la campaña anterior. Gracias al sistema de alertas relativas al mantenimiento de las infraestructuras, las empresas encargadas del mantenimiento de las bombas tienen acceso al instante al rendimiento de cada pozo. De esta manera, pueden evaluar la eficiencia como si estuvieran “in situ“, mejorar el mantenimiento predictivo y anticiparse a posibles pérdidas de eficiencia, lo que supondría un ahorro económico para la comunidad de regantes.

A continuación, se exponen algunas líneas futuras de investigación que podrían desarrollarse utilizando los resultados obtenidos en esta Tesis Doctoral, tanto en la integración de datos beneficiosos para el sector agrícola como en la generación de servicios que mejoren la toma de decisiones diarias:

- A nivel de modelización del sector agroalimentario sería necesario continuar la integración del conocimiento agrícola en un único modelo de información u ontología.

Debido a que las ontologías definidas hasta el momento no contemplan la modelización de los precios del mercado, sería necesario diseñar estrategias que evalúen el rendimiento cara a la plantación de nuevas variedades en zonas geográficas no habituales. Ya que, el rendimiento económico depende de los canales comerciales de cada productor y de los riesgos que quiera asumir al introducir variedades en zonas climáticamente inadecuadas, ya sea por falta de frío o por heladas.

- Integrar técnicas de Teledetección en plataformas basadas en IdC para mapear el estado fisiológico de los grupos varietales de forma global y con resolución local.

Son tiempos en los que se está produciendo una revolución en la agricultura, marcada por el uso de nuevos instrumentos y técnicas. Las herramientas de Teledetección han adquirido gran importancia, así como los métodos relacionados con ellas. La posibilidad de incluir sensores ópticos, así como su resolución espacial y su periodo de revisita, permiten al sector agrícola recoger datos esenciales para el seguimiento de las explotaciones. Las imágenes de satélite Sentinel-2 pueden aplicarse directamente a la agricultura, ya que proporcionan datos cruciales con una resolución espacial de 10 m cada cinco días. Por otro lado, la progresión del aprendizaje predictivo está permitiendo el desarrollo de nuevas aplicaciones en Teledetección.

- Incorporar técnicas de Aprendizaje Profundo (Deep Learning) para predecir el comportamiento diario de variables como la evapotranspiración de referencia o crear nuevos modelos de riesgo para eventos extremos.

El objetivo sería generar un modelo inteligente para la predicción de variables agronómicas, como la evapotranspiración de referencia. Aprovechando los datos de teledetección y del terreno y estableciendo, al mismo tiempo, las relaciones entre la humedad del suelo y los factores de variabilidad climática de cada zona geográfica. De esta manera, se darían recomendaciones más ajustadas para cada zona y grupo varietal.

- Evaluación de la arquitectura a mayor escala.

Validar la arquitectura para ofrecer interoperabilidad semántica, sintáctica y técnica a comunidades de regantes más amplias y complejas para generar un mayor conjunto de modelos de información, protocolos, servicios, aplicaciones, plataformas y sistemas existentes. Además, esta arquitectura se apoyará en características adicionales, como los servicios que ayuden a la toma de decisiones personalizadas y los sistemas de recomendaciones adaptados a las necesidades propuestas por los agricultores.

Con el desarrollo de estas líneas de investigación futuras se demostrará que el impacto de las innovaciones digitales en el sector agroalimentario va a generar mejores resultados en las

explotaciones agrícolas con el consiguiente aumento de la productividad y la eficiencia en su funcionamiento interno, implementar una gestión corporativa inteligente de los datos y optimizar el uso de los recursos naturales.

PUBLICACIONES QUE COMPONEN LA TESIS DOCTORAL

4.1 Digital Transformation of Agriculture through the Use of an Interoperable Platform

Resumen

La continua evolución del sector agrícola justifica la incorporación y adaptación de las últimas tecnologías. Hoy en día, ya es posible gestionar los cultivos a través de las tecnologías basadas en Internet de las Cosas. Su aplicación permite la explotación de la información y el desarrollo de aplicaciones aisladas que, aunque potentes, dificultan la obtención de predicciones escalables a lo largo de la vida útil de las explotaciones. Para conseguir este objetivo se ha definido un modelo de datos que permita mejorar la gestión de las parcelas de cultivo en las comunidades de regantes y, al mismo tiempo, monitorizar el desarrollo de los cultivos. El objetivo de este trabajo de investigación es presentar una plataforma abierta e interoperable, basada en interfaces y protocolos estándares. Esto permitirá la integración de fuentes de información heterogéneas, y la interoperabilidad con otras soluciones de terceros para el intercambio y explotación de dicha información. El uso de las interfaces y protocolos constituyen la base de la plataforma, unificando así toda la información en un único modelo de datos que permite un mejor uso y difusión de la información. El rendimiento del sistema se analizó en una prueba de campo realizada en una comunidad de regantes de Murcia (sureste de España). Se mejoró la eficiencia de las parcelas de regadío gracias a la monitorización constante del riego y a la definición de umbrales óptimos para cada cultivo. La plataforma ofrece un rendimiento óptimo, pero es necesario mejorar los tiempos de respuesta al utilizar el modelo de datos.

Título	Digital Transformation of Agriculture through the Use of an Interoperable Platform
Autores	Juan Antonio López-Morales, Juan Antonio Martínez y Antonio F. Skarmeta
Tipo	Revista
Revista	Sensors
Factor de Impacto (2020)	3.576
Rango	Q1
Editorial	MDPI
Volumen	20
Número	4
Año	2020
Mes	Febrero
ISSN	1424-8220
DOI	https://doi.org/10.3390/s20041153
URL	https://www.mdpi.com/1424-8220/20/4/1153
Estado	Publicado
Contribución del autor	El estudiante de doctorado, Juan Antonio López-Morales, es el autor principal del trabajo

4.2 Improving Energy Efficiency of Irrigation Wells by Using an IoT-Based Platform

Resumen

El sector del regadío ha experimentado una notable transformación en las últimas décadas debido a la aplicación de tecnologías de distribución de agua a presión, mejorando la gestión de los limitados recursos hídricos. Debido a esta transformación, el riego se ha convertido, junto con la maquinaria agrícola, en el principal consumidor de energía dentro del sector agroalimentario. Además, el coste energético del funcionamiento de los equipos de bombeo durante una campaña agrícola representa entre el 30 y el 40% del coste total del cultivo. Por ello, uno de los retos más interesantes en este ámbito es el de mejorar la eficiencia energética y reducir los costes económicos para que las labores productivas sean cada vez más competitivas. Una auditoría energética permite determinar la eficiencia de las instalaciones y determina protocolos de ahorro energético (requerimientos), por lo que el objetivo de este artículo es realizarlos mediante el uso de sistemas basados en Internet de las Cosas. El sistema propuesto mejora la toma de decisiones en la gestión del bombeo agrícola clasificando la eficiencia de los pozos e integrando los conjuntos de datos que determinan su eficiencia en un único modelo de información. El sistema monitoriza la eficiencia energética en función de parámetros como: el consumo energético, la altura manométrica o el tipo de instalación, permitiendo mejorar las decisiones de cada pozo. Esta solución se ha desplegado en una comunidad de regantes del sureste español. Los resultados han alertado de la falta de eficiencia en dos de sus pozos: en uno de ellos se propone su sustitución,

4.2. IMPROVING ENERGY EFFICIENCY OF IRRIGATION WELLS BY USING AN IOT-BASED PLATFORM

debido al elevado coste del bombeo de agua, y en el otro se implementan mecanismos hidráulicos para mejorar el binomio agua-energía.

Título	Improving Energy Efficiency of Irrigation Wells by Using an IoT-Based Platform
Autores	Juan A. López-Morales, Juan A. Martínez y Antonio F. Skarmeta
Tipo	Revista
Revista	Electronics
Factor de impacto (2019)	2.412
Rango	Q2
Editorial	MDPI
Volumen	10
Número	3
Año	2021
Mes	Enero
ISSN	2079-9292
DOI	https://doi.org/10.3390/electronics10030250
URL	https://www.mdpi.com/2079-9292/10/3/250
Estado	Publicado
Contribución del autor	El estudiante de doctorado, Juan A. López-Morales, es el autor principal del trabajo

4.3 Climate-Aware and IoT-Enabled Selection of the Most Suitable Stone Fruit Tree Variety

Resumen

La aplicación de nuevas tecnologías como Internet de las Cosas ofrece la oportunidad de mejorar el desarrollo agrícola actual, facilitar las tareas diarias y convertir las explotaciones en sistemas de producción eficientes y sostenibles. El uso de estas nuevas tecnologías permite el proceso de transformación digital que demanda el sector y proporciona a las comunidades agrarias herramientas de análisis y predicción más optimizadas. Debido al cambio climático, uno de los problemas a los que se enfrenta la industria agrícola es el avance o retroceso del ciclo de los frutales de hueso. El objetivo es recomendar si una zona concreta cumple los requisitos climáticos mínimos para el cultivo de determinados frutales de hueso a partir de datos climáticos e indicadores bioclimáticos. La metodología utilizada implementa una gran cantidad de datos meteorológicos para generar información sobre las condiciones climáticas específicas y las interacciones sobre los cultivos. En este trabajo se ha realizado un estudio piloto en la Región de Murcia utilizando una plataforma basada en Internet de las Cosas. Se simulan escenarios para el desarrollo de variedades de fruta de hueso que mejor se adapten al entorno. Basada en interfaces y protocolos estándar y abiertos, la plataforma integra fuentes de información heterogéneas y permite la interoperabilidad con otras soluciones de terceros para intercambiar y explotar la información generada.

Título	Climate-Aware and IoT-Enabled Selection of the Most Suitable Stone Fruit Tree Variety
Autores	Juan A. López-Morales, Juan A. Martínez, Manuel Caro, Manuel Erena y Antonio F. Skarmeta
Tipo	Revista
Revista	Sensors
Factor de impacto (2020)	3.576
Rango	Q1
Editorial	MDPI
Volumen	21
Número	11
Año	2021
Mes	Junio
ISSN	1424-8220
DOI	https://doi.org/10.3390/s21113867
URL	https://www.mdpi.com/1424-8220/21/11/3867
Estado	Publicado
Contribución del autor	El estudiante de doctorado, Juan A. López-Morales, es el autor principal del trabajo

Publicaciones

- [1] Juan Antonio López-Morales, Juan Antonio Martínez, and Antonio F Skarmeta. Digital transformation of agriculture through the use of an interoperable platform. *Sensors*, 20(4):1153, 2020.
 - [2] Juan A López-Morales, Juan A Martínez, and Antonio F Skarmeta. Improving energy efficiency of irrigation wells by using an iot-based platform. *Electronics*, 10(3):250, 2021.
 - [3] Francisco Javier López-Andreu, Manuel Erena, Jose Antonio Dominguez-Gómez, and Juan Antonio López-Morales. Sentinel-2 images and machine learning as tool for monitoring of the common agricultural policy: Calasparra rice as a case study. *Agronomy*, 11(4):621, 2021.
 - [4] Juan Antonio Lopez-Morales, Antonio F Skarmeta, and Juan Antonio Martinez. An interoperable platform for the digital transformation of the agricultural sector. In *2019 Global IoT Summit (GIoTS)*, pages 1–6. IEEE, 2019.
 - [5] Juan A López-Morales, Juan A Martínez, Manuel Caro, Manuel Erena, and Antonio F Skarmeta. Climate-aware and iot-enabled selection of the most suitable stone fruit tree variety. *Sensors*, 21(11), 2021.
 - [6] Juan Antonio Lopez-Morales, Antonio F Skarmeta, and Juan Antonio Martinez. Agri-food research centres as drivers of digital transformation for smart agriculture. In *2020 Global Internet of Things Summit (GIoTS)*, pages 1–5. IEEE, 2020.
-

Referencias

- [7] Mark Shepherd, James A Turner, Bruce Small, and David Wheeler. Priorities for science to overcome hurdles thwarting the full promise of the ‘digital agriculture’ revolution. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(14):5083–5092, 2020.

- [8] David Christian Rose and Jason Chilvers. Agriculture 4.0: Broadening responsible innovation in an era of smart farming. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2:87, 2018.
- [9] Manlio Bacco, Paolo Barsocchi, Erina Ferro, Alberto Gotta, and Massimiliano Ruggeri. The digitisation of agriculture: a survey of research activities on smart farming. *Array*, 3:100009, 2019.
- [10] John V Stafford. Implementing precision agriculture in the 21st century. *Journal of agricultural engineering research*, 76(3):267–275, 2000.
- [11] D Laney. 3d data management: Controlling data volume, velocity, and variety. *appl. deliv. strateg.*(2001), 2020.
- [12] Jorge Lanza, Luis Sanchez, David Gomez, Tarek Elsaleh, Ronald Steinke, and Flavio Cirillo. A proof-of-concept for semantically interoperable federation of IoT experimentation facilities. *Sensors (Switzerland)*, 16(7), 2016.
- [13] Sjaak Wolfert, Lan Ge, Cor Verdouw, and Marc-Jeroen Bogaardt. Big data in smart farming—a review. *Agricultural systems*, 153:69–80, 2017.
- [14] S Himesh, EVS Prakasa Rao, KC Gouda, KV Ramesh, V Rakesh, GN Mohapatra, et al. Digital revolution and big data: a new revolution in agriculture. *CAB Rev*, 13(21):1–7, 2018.
- [15] Junzhi Jia. From data to knowledge: the relationships between vocabularies, linked data and knowledge graphs. *Journal of Documentation*, 2020.
- [16] Brett Drury, Robson Fernandes, Maria-Fernanda Moura, and Alneu de Andrade Lopes. A survey of semantic web technology for agriculture. *Information Processing in Agriculture*, 6(4):487–501, 2019.
- [17] Nicola Guarino, Daniel Oberle, and Steffen Staab. What is an ontology? In *Handbook on ontologies*, pages 1–17. Springer, 2009.
- [18] Quoc Hung Ngo, Nhien-An Le-Khac, and Tahar Kechadi. Ontology based approach for precision agriculture. In *International Conference on Multi-disciplinary Trends in Artificial Intelligence*, pages 175–186. Springer, 2018.
- [19] B Craker, DD Danford, RA Ferreyra, K Nelson, ST Rhea, MW Stelford, and JA Wilson. Adapt: A rosetta stone for agricultural data. In *Proceeding of the 14th International Conference on Precision Agriculture. Accessed May*, volume 13, page 2020, 2018.
- [20] Tomás Robles, Ramón Alcarria, Diego Martín de Andrés, Mariano Navarro de la Cruz, Rodrigo Calero, Sofía Iglesias, and Manuel Lopez. An iot based reference architecture for smart water management processes. *J. Wirel. Mob. Networks Ubiquitous Comput. Dependable Appl.*, 6(1):4–23, 2015.

- [21] Quang-Duy Nguyen, Catherine Roussey, María Poveda-Villalón, Christophe de Vault, and Jean-Pierre Chanet. Development experience of a context-aware system for smart irrigation using caso and irrig ontologies. *Applied Sciences*, 10(5):1803, 2020.
- [22] Sahin Aydin and Mehmet N Aydin. Ontology-based data acquisition model development for agricultural open data platforms and implementation of owl2mvc tool. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175:105589, 2020.
- [23] Christoph G Schuetz, Simon Schausberger, and Michael Schrefl. Building an active semantic data warehouse for precision dairy farming. *Journal of Organizational Computing and Electronic Commerce*, 28(2):122–141, 2018.
- [24] Andreas Kamilaris, Feng Gao, Francesc X. Prenafeta-Boldu, and Muhammad Intizar Ali. Agri-IoT:A semantic framework for Internet of Things-enabled smart farming applications. In *2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things, WF-IoT 2016*, 2017.
- [25] Claudio Leones Bazzi, Erminio Pita Jasse, Paulo S Graziano Magalhães, Gabriela Karoline Michelon, Eduardo Godoy de Souza, Kelyn Schenatto, and Ricardo Sobjak. Agdatabox api–integration of data and software in precision agriculture. *SoftwareX*, 10:100327, 2019.
- [26] Enrico Gallinucci, Matteo Golfarelli, and Stefano Rizzi. A hybrid architecture for tactical and strategic precision agriculture. In *International Conference on Big Data Analytics and Knowledge Discovery*, pages 13–23. Springer, 2019.
- [27] Vuong M Ngo, Nhien-An Le-Khac, and M-Tahar Kechadi. Designing and implementing data warehouse for agricultural big data. In *International Conference on Big Data*, pages 1–17. Springer, 2019.
- [28] Miao Wu, Ting-Jie Lu, Fei-Yang Ling, Jing Sun, and Hui-Ying Du. Research on the architecture of internet of things. In *2010 3rd international conference on advanced computer theory and engineering (ICACTE)*, volume 5, pages V5–484. IEEE, 2010.
- [29] Pallavi Sethi and Smruti R Sarangi. Internet of things: architectures, protocols, and applications. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2017, 2017.
- [30] Miao Yun and Bu Yuxin. Research on the architecture and key technology of internet of things (iot) applied on smart grid. In *2010 International Conference on Advances in Energy Engineering*, pages 69–72. IEEE, 2010.
- [31] Dina Darwish. Improved layered architecture for internet of things. *Int. J. Comput. Acad. Res.(IJCAR)*, 4:214–223, 2015.
- [32] Mahda Noura, Mohammed Atiquzzaman, and Martin Gaedke. Interoperability in internet of things: Taxonomies and open challenges. *Mobile Networks and Applications*, 24(3):796–809, 2019.

- [33] Carlos Guimarães, José Quevedo, Rui Ferreira, Daniel Corujo, and Rui L Aguiar. Exploring interoperability assessment for future internet architectures roll out. *Journal of Network and Computer Applications*, 136:38–56, 2019.
- [34] Soumya Kanti Datta and Christian Bonnet. Next-generation, data centric and end-to-end iot architecture based on microservices. In *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Asia (ICCE-Asia)*, pages 206–212. IEEE, 2018.
- [35] Oscar Novo. Blockchain meets iot: An architecture for scalable access management in iot. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(2):1184–1195, 2018.
- [36] Hamdan Hejazi, Husam Rajab, Tibor Cinkler, and László Lengyel. Survey of platforms for massive iot. In *2018 IEEE International Conference on Future IoT Technologies (Future IoT)*, pages 1–8. IEEE, 2018.
- [37] ETSI. Context Information Management (CIM); NGSI-LD API. Available online https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/CIM/001_099/009/01.01.01_60/gs_CIM009v010101p.pdf (accessed on 28 September 2020).
- [38] Jonathan De C. Silva, Joel J.P.C. Rodrigues, Jalal Al-Muhtadi, Ricardo A.L. Rabêlo, and Vasco Furtado. Management platforms and protocols for internet of things: A survey. *Sensors (Switzerland)*, 19(3):1–40, 2019.
- [39] Alaa Adel Araby, Mai Mohamed Abd Elhameed, Nada Mohamed Magdy, Nada Abdelaal, Yomna Tarek Abd Allah, M Saeed Darweesh, Mohamed Ali Fahim, Hassan Mostafa, et al. Smart iot monitoring system for agriculture with predictive analysis. In *2019 8th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST)*, pages 1–4. IEEE, 2019.
- [40] Sergio Trilles, Joaquín Torres-Sospedra, Óscar Belmonte, F Javier Zarazaga-Soria, Alberto González-Pérez, and Joaquín Huerta. Development of an open sensorized platform in a smart agriculture context: A vineyard support system for monitoring mildew disease. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 28:100309, 2020.
- [41] Floriano De Rango, Giuseppe Potrino, Mauro Tropea, Amilcare Francesco Santamaria, and Nunzia Palmieri. Simulation, modeling and technologies for drones coordination techniques in precision agriculture. In *International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*, pages 77–101. Springer, 2017.
- [42] Kuniaki Uto, Haruyuki Seki, Genya Saito, and Yukio Kosugi. Characterization of rice paddies by a uav-mounted miniature hyperspectral sensor system. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(2):851–860, 2013.

- [43] Naoyuki Hashimoto, Yuki Saito, Masayasu Maki, and Koki Homma. Simulation of reflectance and vegetation indices for unmanned aerial vehicle (uav) monitoring of paddy fields. *Remote Sensing*, 11(18):2119, 2019.
- [44] Mohamed Hossam, Mohamed Kamal, Mostafa Moawad, Mohamed Maher, Mohamed Salah, Youssef Abady, Amr Hesham, and Ahmed Khattab. PLANTAE: An IoT-Based Predictive Platform for Precision Agriculture. *2018 Proceedings of the Japan-Africa Conference on Electronics, Communications, and Computations, JAC-ECC 2018*, pages 87–90, 2019.
- [45] Swagatam Bose Choudhury, Prachin Jain, Sujal Kallamkuth, Saranya Ramanath, Prakruti V. Bhatt, Sanat Sarangi, and P. Srinivasu. Precision crop monitoring with affordable iot: Experiences with Okra. *Global IoT Summit, GIoTS 2019 - Proceedings*, pages 1–6, 2019.
- [46] J Diego Franco, Tania A Ramirez-delReal, Daniel Villanueva, Araceli Gárate-García, and Dagoberto Armenta-Medina. Monitoring of ocimum basilicum seeds growth with image processing and fuzzy logic techniques based on cloudino-iot and fiware platforms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 173:105389, 2020.
- [47] J. A. López-Riquelme, N. Pavón-Pulido, H. Navarro-Hellín, F. Soto-Valles, and R. Torres-Sánchez. A software architecture based on FIWARE cloud for Precision Agriculture. *Agricultural Water Management*, 183:123–135, 2017.
- [48] Carlos Kamienski, Juha-Pekka Soinen, Markus Taumberger, Ramide Dantas, Attilio Toscano, Tullio Salmon Cinotti, Rodrigo Filev Maia, and André Torre Neto. Smart water management platform: Iot-based precision irrigation for agriculture. *Sensors*, 19(2):276, 2019.
- [49] Laura García, Lorena Parra, Jose M Jimenez, Jaime Lloret, and Pascal Lorenz. Iot-based smart irrigation systems: An overview on the recent trends on sensors and iot systems for irrigation in precision agriculture. *Sensors*, 20(4):1042, 2020.
- [50] Miguel A. Zamora-Izquierdo, José Santa, Juan A. Martínez, Vicente Martínez, and Antonio F. Skarmeta. Smart farming IoT platform based on edge and cloud computing. *Biosystems Engineering*, 177:4–17, jan 2019.
- [51] Andrey Somov, Dmitry Shadrin, Ilia Fastovets, Artyom Nikitin, Sergey Matveev, Oleksii Hrinchuk, et al. Pervasive agriculture: Iot-enabled greenhouse for plant growth control. *IEEE Pervasive Computing*, 17(4):65–75, 2018.
- [52] Vítor João Pereira Domingues Martinho. Energy consumption across european union farms: Efficiency in terms of farming output and utilized agricultural area. *Energy*, 103:543–556, 2016.

- [53] T Pelli and HU Hitz. Energy indicators and savings in water supply. *Journal-American Water Works Association*, 92(6):55–62, 2000.
- [54] Wei Dong and Qiang Yang. Data-driven solution for optimal pumping units scheduling of smart water conservancy. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(3):1919–1926, 2019.
- [55] Alexandru Predescu, Mariana Mocanu, and Ciprian Lupu. Real time implementation of iot structure for pumping stations in a water distribution system. In *2017 21st International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, pages 529–534. IEEE, 2017.
- [56] Israr Ullah and DoHyeun Kim. An optimization scheme for water pump control in smart fish farm with efficient energy consumption. *Processes*, 6(6):65, 2018.
- [57] Marek Moleda, Alina Momot, and Dariusz Mrozek. Predictive maintenance of boiler feed water pumps using scada data. *Sensors*, 20(2):571, 2020.
- [58] José M Tarjuelo, Juan A Rodríguez-Díaz, Ricardo Abadía, Emilio Camacho, Carmen Rocamora, and Miguel A Moreno. Efficient water and energy use in irrigation modernization: Lessons from spanish case studies. *Agricultural Water Management*, 162:67–77, 2015.
- [59] Abbas Mardani, Edmundas Kazimieras Zavadskas, Dalia Streimikiene, Ahmad Jusoh, and Masoumeh Khoshnoudi. A comprehensive review of data envelopment analysis (dea) approach in energy efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70:1298–1322, 2017.
- [60] Hiram Ponce and Sebastián Gutiérrez. An indoor predicting climate conditions approach using internet-of-things and artificial hydrocarbon networks. *Measurement*, 135:170–179, 2019.
- [61] Sebastián Gutiérrez and Hiram Ponce. An intelligent failure detection on a wireless sensor network for indoor climate conditions. *Sensors*, 19(4):854, 2019.
- [62] JM Cadenas, MC Garrido, R Martínez-España, and MA Guillén-Navarro. Making decisions for frost prediction in agricultural crops in a soft computing framework. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175:105587, 2020.
- [63] Kunal Sood, Sharda Singh, Ranbir Singh Rana, Aditya Rana, Vaibhav Kalia, and Arun Kaushal. Application of gis in precision agriculture. In *Paper presented as lead lecture in national seminar on “Precision farming technologies for high Himalayas*, pages 04–05, 2015.
- [64] Khalid A Eldrandaly, Mohamed Abdel-Basset, and Laila A Shawky. Internet of spatial things: A new reference model with insight analysis. *IEEE Access*, 7:19653–19669, 2019.

- [65] Salvatore Falanga Bolognesi, Edoardo Pasolli, Oscar Rosario Belfiore, Carlo De Michele, and Guido D'Urso. Harmonized landsat 8 and sentinel-2 time series data to detect irrigated areas: An application in southern italy. *Remote Sensing*, 12(8):1275, 2020.
- [66] E. Madigan, Y. Guo, M. Pickering, A. Held, and X. Jia. Quantitative monitoring of complete rice growing seasons using sentinel 2 time series images. In *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pages 7699–7702, 2018.
- [67] Gloria Bordogna, Tomáš Kliment, Luca Frigerio, Pietro Alessandro Brivio, Alberto Crema, Daniela Stroppiana, Mirco Boschetti, and Simone Sterlacchini. A spatial data infrastructure integrating multisource heterogeneous geospatial data and time series: A study case in agriculture. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(5):73, 2016.
- [68] Guopeng Jiang, Miles Grafton, Diane Pearson, Mike Bretherton, and Allister Holmes. Integration of precision farming data and spatial statistical modelling to interpret field-scale maize productivity. *Agriculture*, 9(11):237, 2019.
- [69] Erik van der Zee and Henk Scholten. Spatial dimensions of big data: Application of geographical concepts and spatial technology to the internet of things. In *Big Data and Internet of Things: A Roadmap for Smart Environments*, pages 137–168. Springer, 2014.
- [70] KB Matthews, Gerald Schwarz, K Buchan, Mike Rivington, and Dave Miller. Wither agricultural dss? *Computers and electronics in agriculture*, 61(2):149–159, 2008.
- [71] Marie-Agnes Jouanjean, Francesca Casalini, Leanne Wiseman, and Emily Gray. Issues around data governance in the digital transformation of agriculture: The farmers' perspective. *OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers*, 2020.
- [72] Simone van der Burg, Leanne Wiseman, and Jovana Krkeljas. Trust in farm data sharing: reflections on the eu code of conduct for agricultural data sharing. *Ethics and Information Technology*, pages 1–14, 2020.
- [73] Federico Viani, Michael Bertolli, Marco Salucci, and Alessandro Polo. Low-cost wireless monitoring and decision support for water saving in agriculture. *IEEE sensors journal*, 17(13):4299–4309, 2017.
- [74] Anat Goldstein, Lior Fink, Amit Meitin, Shiran Bohadana, Oscar Lutenberg, and Gilad Ravid. Applying machine learning on sensor data for irrigation recommendations: revealing the agronomist's tacit knowledge. *Precision agriculture*, 19(3):421–444, 2018.
- [75] Morteza Hadipour, Javad Farrokhi Derakhshandeh, and Mohsen Aghazadeh Shiran. An experimental setup of multi-intelligent control system (mics) of water management using the internet of things (iot). *ISA transactions*, 96:309–326, 2020.

- [76] Irene Pluchinotta, Alessandro Pagano, Raffaele Giordano, and Alexis Tsoukiàs. A system dynamics model for supporting decision-makers in irrigation water management. *Journal of environmental management*, 223:815–824, 2018.
- [77] Emma Jakku, Bruce Taylor, Aysha Fleming, Claire Mason, Simon Fielke, Chris Sounness, and Peter Thorburn. “if they don’t tell us what they do with it, why would we trust them?” trust, transparency and benefit-sharing in smart farming. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 90:100285, 2019.
- [78] Katarzyna Kosior. Digital transformation in the agri-food sector—opportunities and challenges. *Roczniki (Annals)*, 2018(1230-2019-3703), 2018.
- [79] Christopher Brewster, Ioanna Roussaki, Nikos Kalatzis, Kevin Doolin, and Keith Ellis. Iot in agriculture: Designing a europe-wide large-scale pilot. *IEEE communications magazine*, 55(9):26–33, 2017.
- [80] Michael Stonebraker and Ihab F Ilyas. Data integration: The current status and the way forward. *IEEE Data Eng. Bull.*, 41(2):3–9, 2018.
- [81] Spyros Fountas, Dvoralai Wulfsohn, B Simon Blackmore, HL Jacobsen, and Søren Marcus Pedersen. A model of decision-making and information flows for information-intensive agriculture. *Agricultural Systems*, 87(2):192–210, 2006.
- [82] Ceri Binding and Douglas Tudhope. Improving interoperability using vocabulary linked data. *International Journal on Digital Libraries*, 17(1):5–21, 2016.
- [83] Federico Montori, Luca Bedogni, and Luciano Bononi. On the integration of heterogeneous data sources for the collaborative internet of things. In *2016 IEEE 2nd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry Leveraging a better tomorrow (RTSI)*, pages 1–6. IEEE, 2016.
- [84] Pedro Corista, Diogo Ferreira, João Gião, João Sarraipa, and Ricardo Jardim Gonçalves. An iot agriculture system using fiware. In *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, pages 1–6. IEEE, 2018.
- [85] Richard Connor. *The United Nations world water development report 2015: water for a sustainable world*, volume 1. UNESCO publishing, 2015.
- [86] R Abadía, C Rocamora, and A Ruiz. Protocolo de auditoría energética en comunidades de regantes. instituto para diversificación y ahorro de la energía, idae. *Serie Divulgación Ahorro y Eficiencia Energética en Agricultura*, 10, 2008.
- [87] Thomas O Perry. Dormancy of trees in winter. *Science*, 171(3966):29–36, 1971.

4.3. CLIMATE-AWARE AND IOT-ENABLED SELECTION OF THE MOST SUITABLE STONE FRUIT TREE VARIETY

- [88] E Fadón and J Rodrigo. Unveiling winter dormancy through empirical experiments. *Environmental and Experimental Botany*, 152:28–36, 2018.
- [89] Christopher J Atkinson, Rex M Brennan, and Helen G Jones. Declining chilling and its impact on temperate perennial crops. *Environmental and Experimental Botany*, 91:48–62, 2013.
- [90] Spyros Fountas, Giacomo Carli, Claus Grøn Sørensen, Zisis Tsiropoulos, Christos Cavalaris, Anna Vatsanidou, B Liakos, Maurizio Canavari, Jens Wiebensohn, and B Tisserye. Farm management information systems: Current situation and future perspectives. *Computers and Electronics in Agriculture*, 115:40–50, 2015.
- [91] Liang Guo, Junhu Dai, Sailesh Ranjitkar, Haiying Yu, Jianchu Xu, and Eike Luedeling. Chilling and heat requirements for flowering in temperate fruit trees. *International journal of biometeorology*, 58(6):1195–1206, 2014.