



Técnicas Avanzadas de Producción Sostenible para Agricultura de Precisión en Cooperativas

Autor: Héctor José Pérez Iglesias

Institución: Instituto Tecnológico de Galicia

Otros autores: Lucía López González (Instituto Tecnológico de Galicia); Carlos Giraldo Rodríguez (Instituto Tecnológico de Galicia); Santiago Sousa Lema (Os Irmandiños SCG)

Resumen

El uso abusivo e irracional de los recursos naturales en la agricultura española ha conducido a que un tercio de la superficie cultivable se encuentre con niveles graves de degradación. Además, el sector agrícola arrastra en los últimos años la problemática del progresivo envejecimiento y emigración de la población activa hacia otros sectores. En Galicia se suman problemas derivados de sus inadecuadas estructuras productivas: parcelación, minifundismo, atomización métodos trabajo y tecnologías. El reto está claro: es preciso potenciar la producción agrícola, pero empleando nuevas tecnologías respetuosas con el medio ambiente.

En este sentido, en el proyecto SmartCROPS se plantea el diseño y desarrollo de una solución de telemetría basada en sensores sin cables embebidos en cultivos (tecnología WSN, Wireless Sensor Networks), como herramienta facilitadora de técnicas de agricultura de precisión (AP), que permita predecir la evolución de los cultivos y actuar en las fases sensibles para mejorar el rendimiento y racionalizar el uso de insumos bioquímicos, contribuyendo así al desarrollo de una agricultura sostenible con un doble beneficio: económico y medioambiental.

El proyecto surge como evolución natural del proyecto SWAP 'Redes de Sensores sin Cables para Agricultura de Precisión en Regiones Minifundistas', presentado en CONAMA 2010: ISBN 978-84-614-6112-7, donde se llevó a cabo el desarrollo de una arquitectura de red de sensores sin cables para regiones minifundistas como herramienta de soporte a la agricultura de precisión. En SmartCROPS se incorporan los últimos avances tecnológicos en cuanto a sensorización embebida, conectividad IP/Internet a nivel nodo y tecnologías Web y GIS, para dotar al sistema de una mayor flexibilidad y robustez, que garanticen la escalabilidad de la solución. Además se emplean técnicas de minería de datos para el desarrollo de modelos predictivos de cultivos a partir de la información recogida.

El alcance del proyecto comprende la validación del desarrollo en cultivos de la Cooperativa Os Irmandiños, adaptando la tecnología a las características particulares de las explotaciones gallegas en cuanto a tipología de cultivos, variabilidad del terreno y clima.

Palabras claves: agricultura sostenible; redes de sensores; Internet a nivel de nodo sensor; tecnologías Web y GIS; modelado predictivo

1. Introducción

La superficie agraria útil en España, aproximadamente 25 millones de ha, un 15 % de la superficie total de España, presenta niveles graves de degradación en un tercio de la misma. Esta situación es fruto de un uso desmesurado e irresponsable de los recursos naturales disponibles, y el exceso en la utilización de insumos bioquímicos motivado fundamentalmente en la detección tardía de plagas en los cultivos por desconocimiento o carencia de medios. Además, el sector agrícola arrastra en los últimos años la problemática del progresivo envejecimiento y emigración de la población activa hacia otros sectores y agravado por la recesión económica actual.

Además, la dimensión media de las explotaciones agrarias españolas se establece en 2009 en torno a 24,56 ha (Superficie Agraria Útil) lo que la sitúa por encima de la media de la Unión Europea que es de 14,5 ha. Sin embargo, en Galicia el SAU es de 8,15 ha, que la determina con un carácter minifundista, esto se suma a problemas derivados de sus inadecuadas estructuras productivas: parcelación atomización, métodos trabajo y tecnologías.

El reto está claro: es preciso potenciar la producción agrícola mediante nuevas tecnologías respetuosas con el medio ambiente y que además, permitan solventar o paliar en la mayor medida posible los inconvenientes presentados.

Con este objetivo, en el proyecto **SmartCROPS** se plantea el diseño y desarrollo de una solución de telemetría basada en sensores sin cables embebidos en cultivos empleando **tecnología WSN (Wireless Sensor Networks)** [1], como herramienta facilitadora de técnicas de **AP (Agricultura de Precisión)** [2, 3]. Esto permite, mediante una plataforma web, monitorizar de forma remota diferentes parámetros de los cultivos, lo que permite reducir el coste en términos de desplazamientos para realizar la supervisión y proporciona un mayor grado de detalle en resolución temporal. Como consecuencia directa, es posible adelantarse a la aparición de plagas, y realizar una actuación en las fases sensibles para **mejorar el rendimiento, y de este modo, racionalizar el uso de insumos bioquímicos**, contribuyendo así al desarrollo de una **agricultura sostenible** con un doble beneficio: económico y medioambiental.

El proyecto surge como evolución natural del proyecto SWAP “Redes de Sensores sin Cables para Agricultura de Precisión en Regiones Minifundistas”, presentado en CONAMA 2010: ISBN 978-84-614-6112-7 [4], donde se llevó a cabo el desarrollo de una arquitectura de red de sensores sin cables para regiones minifundistas como herramienta de soporte a la agricultura de precisión. En SmartCROPS se incorporan los últimos avances tecnológicos en cuanto a sensorización embebida en una plataforma WSN con conectividad IP/Internet a nivel nodo y tecnologías Web y GIS (Geographic Information System) [5], para dotar al sistema de una mayor flexibilidad y robustez, que garanticen la escalabilidad de la solución. Además se incorpora la ejecución de modelos matemáticos que hacen uso de los datos crudos recogidos de los sensores, para generar nuevos datos agregados que permitan alertar sobre la posibilidad de aparición de plagas en los cultivos.

El alcance del proyecto comprende la validación del desarrollo en cultivos de la Cooperativa Os Irmandiños, adaptando la tecnología a las características particulares de las explotaciones gallegas en cuanto a tipología de cultivos, variabilidad del terreno y clima.

2. Estado del Arte

La amplia gama de variables a considerar por un productor en el momento de tomar una decisión es sumamente extensa: tipo de suelo, clima, orografía, incluso estado actual de la planta afectada por todos los demás factores. Muchas veces los productores deben afrontar fuertes pérdidas económicas (plagas, baja calidad del producto...) debido a la falta de información o al retraso con que les llega la misma (no es en tiempo real). La monitorización remota de variables está dando muy buenos resultados (grandes beneficios económicos y medioambientales) en explotaciones de gran tamaño (latifundios).

Las redes inalámbricas de sensores, WSN, hacen posible la AGRICULTURA DE PRECISIÓN [6, 7], donde la irrigación, la aplicación de fertilizantes, pesticidas, y otros se puede hacer de forma localizada **teniendo en cuenta la variabilidad espacial del terreno**, optimizando los recursos disponibles y causando menos impacto negativo al ambiente. La red de sensores puede incluso automatizar algunos de los procesos necesarios, por medio de actuadores de ventilación, iluminación, irrigación, etc. Este tipo de redes proveen la flexibilidad necesaria para disminuir tiempos de instalación, recolección de datos y mantenimiento, si se les compara con recolectores de datos (data loggers) o sistemas SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) tradicionales; además, permiten muestrear las variables de interés con mayores resoluciones espaciales y temporales a lo alcanzable con métodos tradicionales. Como resumen las principales ventajas de las redes WSN en la agricultura de precisión son:

- Monitorización remota y en tiempo real
- Información de diversos puntos y parámetros a la vez
- Bajo coste y consumo energético
- Facilidad de instalación y despliegue
- Mínimo mantenimiento e impacto medioambiental

Los cultivos, sean protegidos o en campo abierto, interaccionan con cuatro factores que determinarán su rendimiento y resistencia: clima, biota, fisiología y suelo. En general, en cultivos protegidos algunos de estos factores pueden ser controlados mejor que en el caso de cultivos en campo. Las redes de sensores permiten entonces capturar un conjunto de variables de modo que sea posible establecer modelos de las interrelaciones entre estas variables.

2.1. Problemática en España/Europa – Pequeñas Explotaciones

En regiones con explotaciones pequeñas (i.e. minifundios) existen grandes dificultades de implementación de técnicas y modelos de negocio, debido fundamentalmente a que la inversión inicial se percibe elevada para el tamaño de la explotación.

El uso abusivo e irracional de los recursos naturales en la agricultura ha conducido a que una parte importante de la superficie cultivable se encuentra con niveles graves de degradación. Esto se debe a una ineficiente utilización de insumos agrícolas (en especial fertilizantes y plaguicidas), y la sobreexplotación del suelo y de los recursos hídricos. La reforma de la PAC (Política Agrícola Común) tiene entre sus objetivos principales frenar esta situación y conseguir un desarrollo sostenible, que satisfaga las necesidades del presente sin comprometer los recursos naturales a las generaciones futuras.

La agricultura en España (también en Europa) viene caracterizada por unas **diferencias regionales notables**, debidas principalmente al medio físico (distintos tipos de suelos y condiciones climatológicas dispares), a los cultivos predominantes y a la importancia de las estructuras productivas comerciales. Tal como se ha comentado, el sector en regiones en las que predomina el minifundismo (como Galicia) adolece de problemas comunes a otras regiones, tales como el progresivo envejecimiento unido a una progresiva inmigración a otros sectores económicos, pero además tiene otras características, complejidad orográfica, dispersión, el reducido rendimiento por hectárea, escasa implantación del cooperativismo y limitados canales de comercialización, y formación deficiente de los agricultores de cara a optimizar los rendimientos de sus explotaciones. En Galicia, p.ej., la SAU (Superficie Agraria Útil) media por explotación

oscila en torno a las 4-6 hectáreas, y las empresas menores de 20 hectáreas representan más del 95 % del número total; la productividad del trabajo es inferior en un 54 % e incluso en un 83 % a la media comunitaria y el valor añadido bruto por explotación está comprendido entre los 5.075 y los 7.179 ecus (lo que significa que es un 65-51 % menor a la media europea). Esto hace necesaria la aplicación del concepto de innovación de manera diferenciada en las diferentes áreas geográficas de la península.

Las nuevas tecnologías de la información, y en concreto la telemetría mediante redes de sensores sin cables, pueden contribuir a mejorar esta situación, así será posible que, independientemente del tamaño de la explotación, los datos de evolución de parámetros críticos estén accesible por el gestor del cultivo en todo momento (tiempo real), lugar (remotamente a través de Internet) y a través de cualquier dispositivo (PDA, móvil, PC...), todo ello con un mínimo impacto, bajo consumo y bajo coste (en comparación con otras tecnologías sin cables como el GPRS).

2.2. Punto de Partida

Cabe destacar que el proyecto surge como evolución natural del anterior proyecto SWAP “Redes de Sensores sin Cables para Agricultura de Precisión en Regiones Minifundistas”, presentado en CONAMA 2010: ISBN 978-84-614-6112-7, en el que participo ITG y donde se llevó a cabo el desarrollo de una arquitectura de red de sensores sin cables para regiones minifundistas como herramienta de soporte a la agricultura de precisión.

En SmartCROPS se incorporan los últimos avances tecnológicos en cuanto a sensorización embebida, conectividad IP/Internet a nivel nodo y tecnologías Web y GIS, para dotar al sistema de una mayor flexibilidad y robustez, que garanticen la escalabilidad de la solución. Además se emplean técnicas de minería de datos para el desarrollo de modelos predictivos de cultivos a partir de la información recogida.

3. Plataforma WSN

En este apartado se aporta una descripción de la plataforma WSN desarrollada en el marco del proyecto SMARTCROPS. El plataforma prototipo se compone de los siguientes subsistemas: captación y comunicaciones con conectividad IP a nivel de nodo sensor, monitorización en tiempo real a través de una herramienta SW de Gestión GIS-WEB y soporte a la decisión mediante modelos predictivos de evolución del cultivo y plagas.

A nivel SW, la arquitectura de integración entre los diferentes sistemas (Captación y Comunicaciones, Modelos Predictivos de Cultivos y Sistema de Gestión Remoto en Tiempo Real) está basada en Servicios Web, debido a su flexibilidad e independencia entre la aplicación que utiliza el Servicio Web y el propio servicio, añadiendo una capa de abstracción entre cómo se almacene internamente la información y cómo se consulten o inserten los datos.

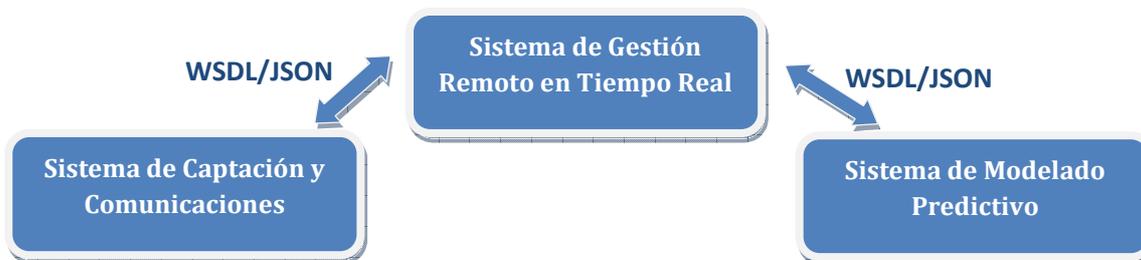


Figura 1. Arquitectura de Integración entre Aplicaciones basada en Servicios Web

En la Figura 1, se representa la interacción entre aplicaciones. El *SGRTR* (Sistema de Gestión Remoto en Tiempo Real) es el encargado de proveer los servicios (entidad Service Provider), mientras que los otros sistemas, son los clientes o solicitantes (entidad Service Requester). En los siguientes apartados se describen brevemente las particularidades de estos subsistemas.

3.1. Sistema de Captación y Comunicaciones

El sistema de Captación y Comunicaciones es una evolución del que se llevó a cabo en el proyecto SWAP “Redes de Sensores sin Cables para Agricultura de Precisión en Regiones Minifundistas”, presentado en CONAMA 2010: ISBN 978-84-614-6112-7. En

SmartCROPS se incorporan los últimos avances tecnológicos en cuanto a sensorización embebida y conectividad IP/Internet a nivel nodo. La arquitectura empleada se resume en la Figura 2.

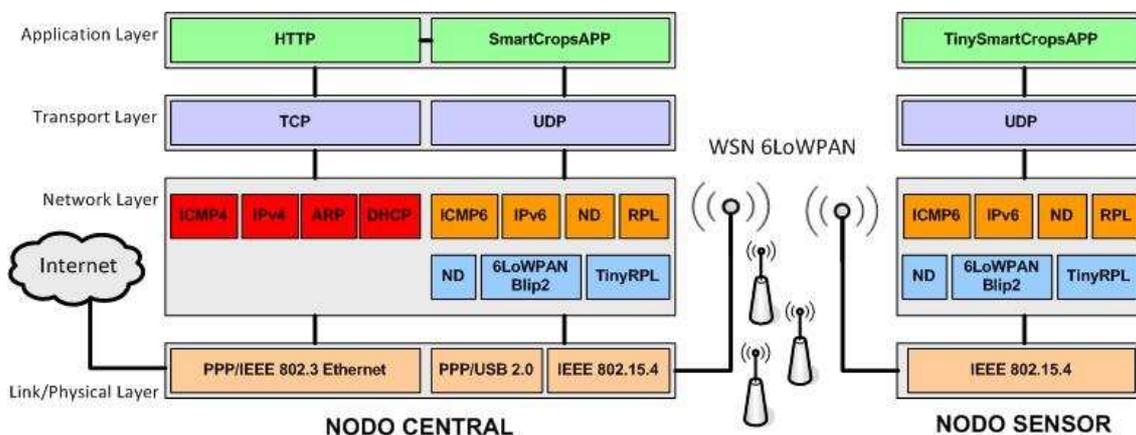


Figura 2. Arquitectura de Captación y Comunicaciones

Cabe destacar que, al ser por ahora pequeña la implantación de IPv6 por parte de los operadores de telecomunicaciones, se utiliza un Gateway o pasarela en la red WSN que se comunica con los sensores usando IPv6/6LoWPAN [8], y con el exterior mediante IPv4.

Las direcciones utilizadas en los sensores son IPv6 locales de sitio fec0::/10. Estas direcciones IPv6 no son enrutables globalmente, sin embargo podrían usarse direcciones IPv6 globales en caso de que el operador ofrezca ese servicio. Si se da este caso, los sensores podrían ser sondeados desde el servidor, sin necesidad de un Gateway intermedio y las comunicaciones serían directamente IPv6.

3.2. Sistema de Gestión Remoto en Tiempo Real

El Sistema de *SGRTR* (Gestión Remoto en Tiempo Real) es una aplicación Web con capacidades GIS que permite albergar los datos procedentes de sensores de naturaleza heterogénea, de cualquier ámbito, facilitando su captura mediante Servicios Web.

Los conjuntos de datos recibidos se organizan en Parámetros, Sensores, Nodos y Grupos que serán accesibles por los Usuarios que dispongan de los permisos adecuados.

De este modo se posibilita la gestión de Usuarios y Perfiles, así como los Parámetros, Sensores y Nodos, precisamente, a aquellos usuarios que dispongan de los privilegios de administrador.

Mediante la utilización de Tags se puede establecer una organización jerárquica de los Nodos que facilita la gestión y permiso de los sensores.

Cada conjunto de datos puede ser visualizado en una gráfica entre una fecha de inicio y una fecha de fin, tanto de forma independiente como de forma conjunta. También se dispone de visualización en diagramas de barras y tartas.

Se permite la configuración de alertas para que cuando un parámetro alcance un cierto valor, se notifique al usuario mediante un e-mail y/o SMS. Además, puede definirse una histéresis para cada alerta, con el objetivo de evitar recibir la misma alerta de forma continua.

Es posible la generación de datos agregados mediante la aplicación sobre diferentes conjuntos reales o a su vez también virtuales. Esto se consigue mediante la ejecución de Modelos.

Cualquier dispositivo con acceso a Internet y posibilidad de invocar a un Servicio Web tiene la capacidad de insertar datos en el SGRTR.

Se ofrece un API para desarrollo a través de Servicios Web para gestionar y consultar los datos del SGRTR.

La relación entre los usuarios, el SGRTR, los gateway que recogen los datos de los diferentes nodos que toman las muestras y los nodos, se presenta gráficamente en la Figura 3.

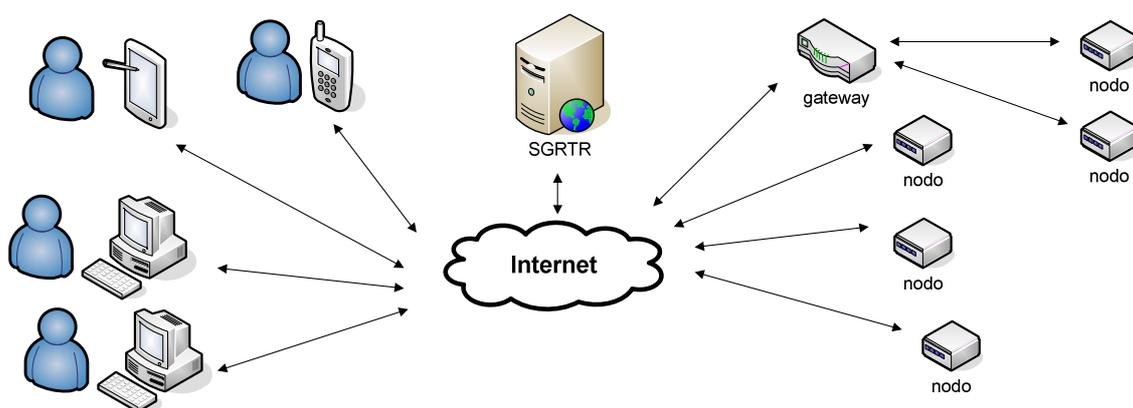


Figura 3. Sistema de Gestión Remoto en Tiempo Real

3.3. Sistema de Modelado Predictivo

El SGRTR incorpora una serie de modelos enfocados en predicción de plagas en cultivos. Los modelos disponibles son los siguientes: Mildiu, Oidio, Horas/Unidades Frío y Evapotranspiración.

El objeto es poder configurar alertas cuando se alcance un determinado valor en la salida producida por estos modelos.

A continuación se describe cada uno de ellos.

3.3.1. Mildiu (Fase Primaria)

La implementación del modelo Mildiu [9] produce, a partir de un conjunto de valores de los parámetros: temperatura, lluvia, humedad relativa y condición de arranque, cada uno con su correspondiente marca temporal (timestamp), una salida con el porcentaje de riesgo correspondiente a la fase primaria para cada día.

La contaminación primaria solo se produce una vez cada año y su arranque se determina cuando se cumplen las siguientes condiciones:

1. Oosporas maduras + brotes de la vid de ± 10 cm
2. Lluvia total recopilada en un día ≥ 10 mm
3. Temperatura Máxima del día $\geq 12^\circ$ C
4. Es la primera vez en el año que se produce todo esto

Al día siguiente de haber arrancado, se inicia el algoritmo que realiza los siguientes pasos:

1. Según la tabla mildiu_table1.m (T^a media ($^{\circ}\text{C}$), Humedad Relativa $> 0 < 75\%$) se obtiene un porcentaje de desarrollo
2. Cada día se acumula el porcentaje que indica la tabla, hasta alcanzar el 100%

En la Figura 4 podemos observar el algoritmo descrito que obtiene un porcentaje de riesgo de Mildiu (Contaminación Primaria) para cada día.

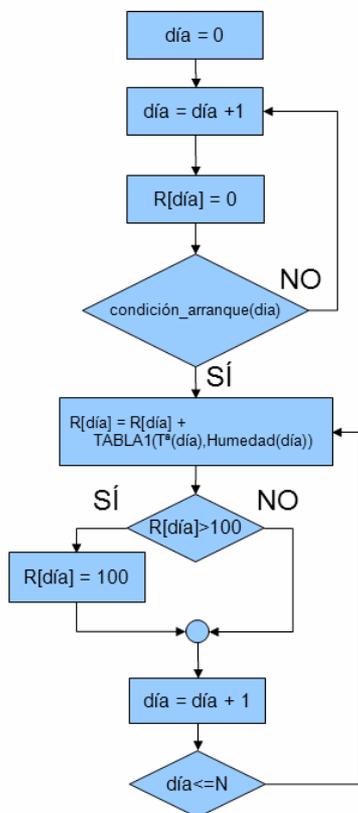


Figura 4. Mildiu

3.3.2. Oidio (Fase Conidial)

La implementación del modelo **Oidio** [10] obtiene a partir de un conjunto de valores de los parámetros: temperatura y reset, cada uno con su correspondiente marca temporal (timestamp), una salida con el porcentaje correspondiente a la **Fase Conidial**. Obtendremos un valor para cada día.

El algoritmo que determina el porcentaje de desarrollo de la fase conidial es el siguiente:

1. Se comprueba si se superan durante tres o más días seguidos 6 horas diarias de temperaturas comprendidas entre 21° y 32°C. Si esto se cumple comenzamos la fase conidial y asignamos el 60% de respuesta al día en que sucedió esto y pasamos al punto 2.
2. Cada día posterior al comienzo se verifica si existen más de 6 horas seguidas entre 21° y 32°, en este caso se asigna al día un 20% más que el porcentaje que tenía el día anterior. En caso contrario se le asigna un 10% menos.
3. Además, si se superan los 35° C durante más de 15 minutos seguidos se resta un 10% de la cantidad asignada en el punto 2.
4. Cuando se supere el 100% se le asignará de nuevo el 100% y cuando se baje del 0% se asignará el 0%.

En la Figura 5 se muestran este conjunto de pasos en forma de diagrama de flujo representando el algoritmo para la detección de la infección de Oidio (Fase Conidial).

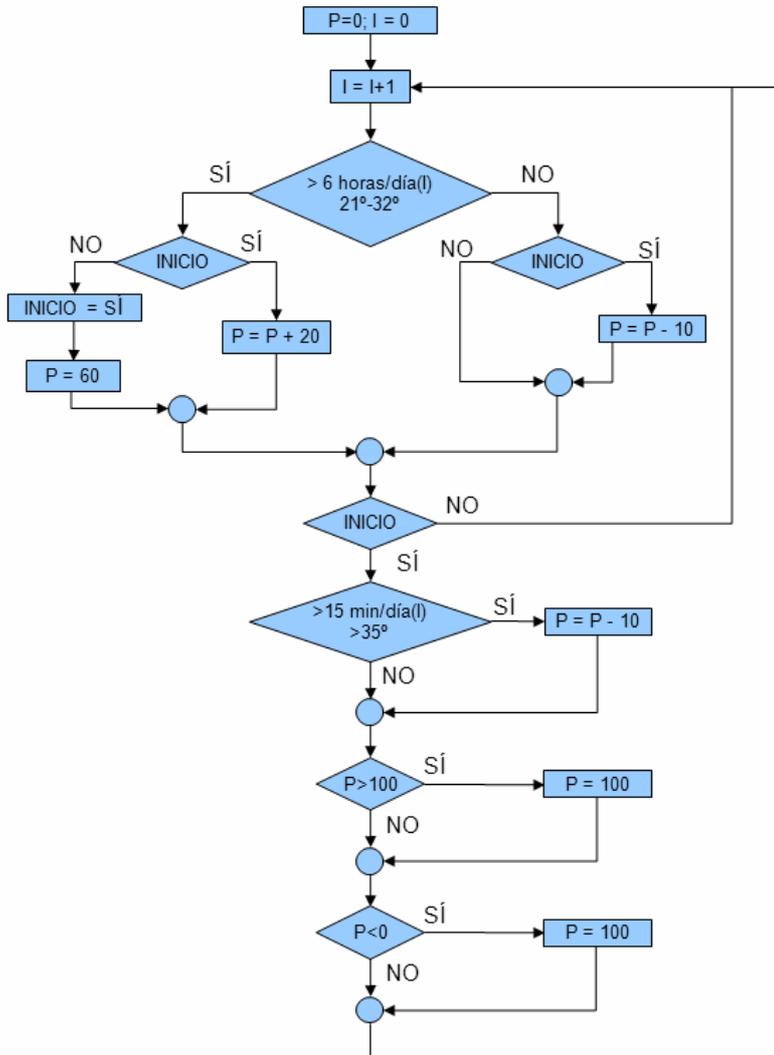


Figura 5. Oidio (Fase Conidial)

3.3.3. Grados/Día

La implementación del modelo **Grados/Día** obtiene a partir de un conjunto de valores del parámetro temperatura, cada uno con su correspondiente marca temporal (timestamp), la suma crítica de grados-día para cada día.

El algoritmo consiste en aplicar la siguiente formula para cada día:

$$Gc(n) = \sum_{i=1}^n \max(T(i) - T_0, 0), \quad T_0 = 10^{\circ}\text{C}, \quad T(i) \equiv \text{Temperatura Media Diaria del día } i$$

Dónde n se corresponde con el n-ésimo día desde del 1 de Enero del año actual. En la Figura 6 se muestra el diagrama de flujo correspondiente al algoritmo.

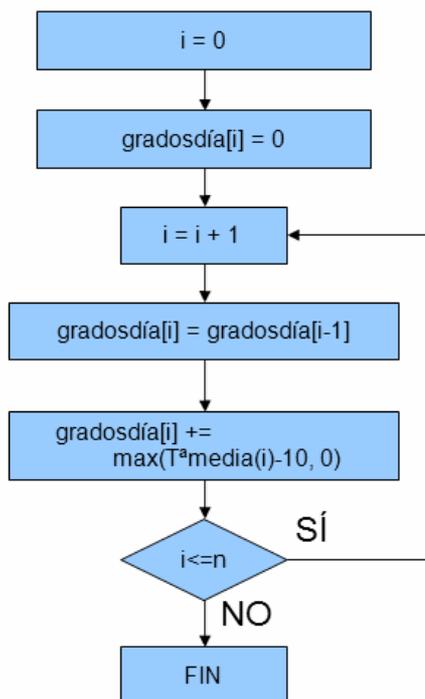


Figura 6. Grados/Día

3.3.4. Horas/Unidades Frío

La implementación del modelo **Horas de Frío** [11] obtiene a partir de un conjunto de valores del parámetro temperatura, cada uno con su correspondiente marca temporal (timestamp), un valor para cada día dependiendo de la versión utilizada. Contemplamos diferentes versiones del modelo Horas de Frío: Weinberger, UC_FNRIC, Utah Model, Low Chilling Model, North Carolina Model.

Cada implementación concreta define su función según la temperatura de entrada y esta función se ejecuta en el algoritmo general de horas de frío. El algoritmo general es el siguiente:

1. Devolver la suma de aplicarle a cada temperatura del día la correspondiente función a una implementación concreta si estamos entre las fechas del 15 de noviembre y finales de febrero, ponderando siempre cada temperatura por la longitud del intervalo en horas. En caso contrario devolver 0.

Podemos observar el diagrama de flujo correspondiente a este algoritmo general de horas/unidades frío en la Figura 7. La función f se corresponderá con el modelo concreto implementado.

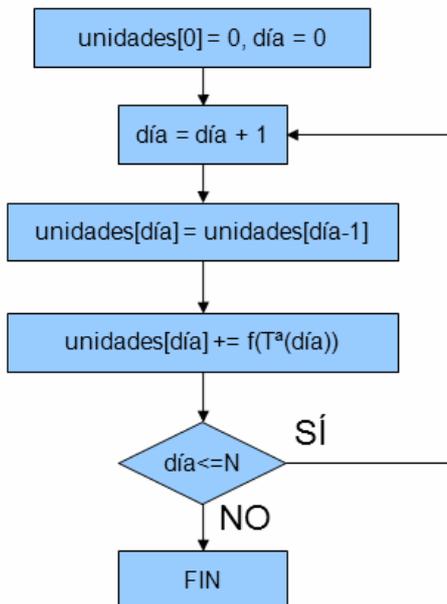


Figura 7. Horas/Unidades Frío

A continuación describimos la función correspondiente con cada una de las implementaciones de este modelo.

Weinberger

La función empleada para esta implementación devuelve 1 para los intervalos cuya temperatura sea inferior a 7,2°C.

UC_FNRIC

La función empleada para esta implementación devuelve 1 para los intervalos cuya temperatura sea superior a 0°C e inferior a 7°C.

Utah Model, Low Chilling Model y North Carolina Model

Las funciones empleadas para estas implementaciones devolverán el valor que se refleja en la Tabla 1 dependiendo de la temperatura del intervalo y la implementación concreta.

Utah Model		Low Chilling Model		North Carolina Model	
Temperatura (°C)	C U F	Temperatura (°C)	C U F	Temperatura (°C)	C U F
<1.5	0	≤1.7	0	≤1.5	0
1.5-2.4	0.5	1.8-7.9	0.5	1.6-7.1	0.5
2.5-9.1	1	8-13.9	1	7.2-12.9	1
9.2-12.4	0.5	14-16.9	0.5	13.0-16.4	0.5
12.5-15.9	0	17-19.4	0	16.5-18.9	0
16-18	-0.5	19.5-21.4	-0.5	19.0-20.6	-0.5
>18	-1	≥21.5	-1	20.7-22.0	-1
				22.1-23.2	-1.5
				≥23.3	-2

Tabla 1. Funciones para los Modelos de Unidades Frío

3.3.5. Evapotranspiración

La implementación del modelo **Evapotranspiración** [12] obtiene a partir de un conjunto de valores del parámetro temperatura, cada uno con su correspondiente marca temporal (timestamp), un valor para cada día dependiendo de la situación de la estación (latitud y altitud).

El algoritmo consiste en aplicar la siguiente secuencia para cada día:

1. Definimos la constante $G_s=118.08$
2. Calculamos φ (latitud en radianes) en función de la latitud en grados:
$$\varphi = \text{latitud} \times \pi / 180$$
3. Calculamos K_a en función de la altitud de la estación:
$$K_a = 0.75 + 0.00002 \times \text{altitud}$$
4. Calculamos la temperatura media (T_{media}), temperatura mínima (T_{min}) y temperatura máxima (T_{max}) del día.
5. Llamamos J al día juliano para el día correspondiente (días transcurridos desde el 1 de enero del año actual +1, ej. 3 de enero es el día juliano 3).
6. Calculamos δ según la función:
$$\delta = 0.4093 \cdot \sin(2\pi(284 + J) / 365)$$
7. Calculamos ω_s según la función:
$$\omega_s = \arccos(-\text{tg}\varphi \text{tg}\delta)$$
8. Calculamos d_r según la función:
$$d_r = 1 + 0,033 \cos(2\pi J / 365)$$
9. Calculamos R_a según la función
$$R_a = \frac{G_s d_r (\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \sin(\omega_s) \cos(\varphi) \cos(\delta))}{\pi K_a (2.2571 - 0.002361 T_{\text{media}})}$$
10. Finalmente, devolvemos el resultado de la siguiente ecuación:
$$ET = 0.0023 \sqrt{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}} (T_{\text{media}} + 17.8) R_a$$

Todo este conjunto de pasos se resume en el algoritmo descrito por el diagrama de flujo de la Figura 8.

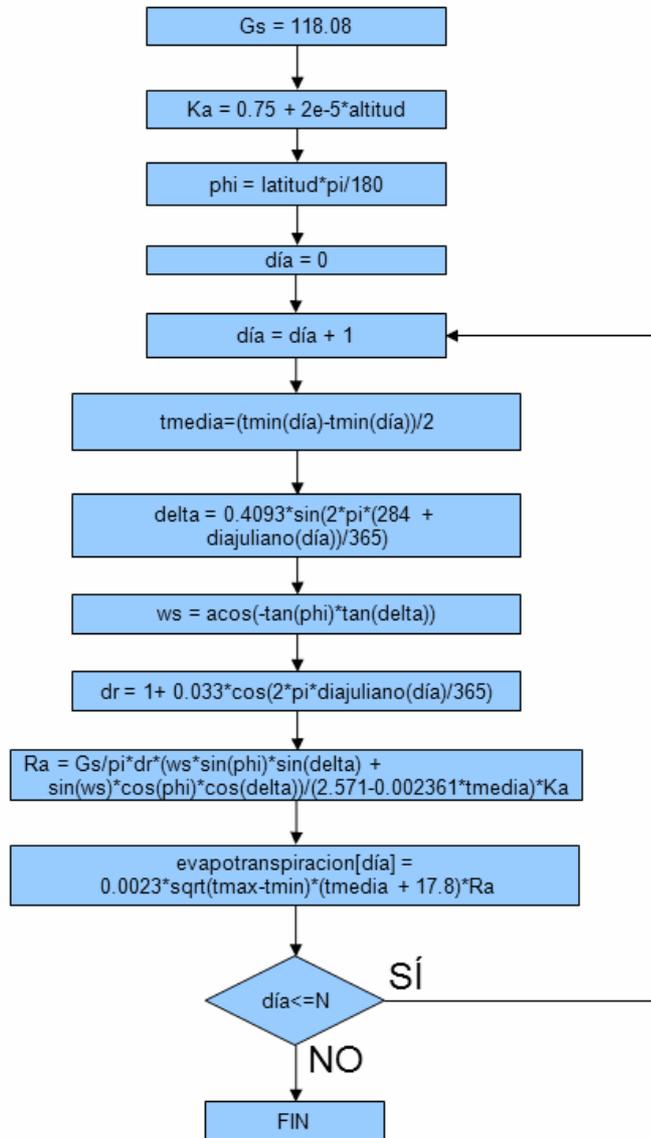


Figura 8. Evapotranspiración

4. Validación en Contexto Real de Aplicación

Se ha seleccionado la zona de Ribadeo como primer escenario piloto, concretamente la parcela representada en la Figura 9.

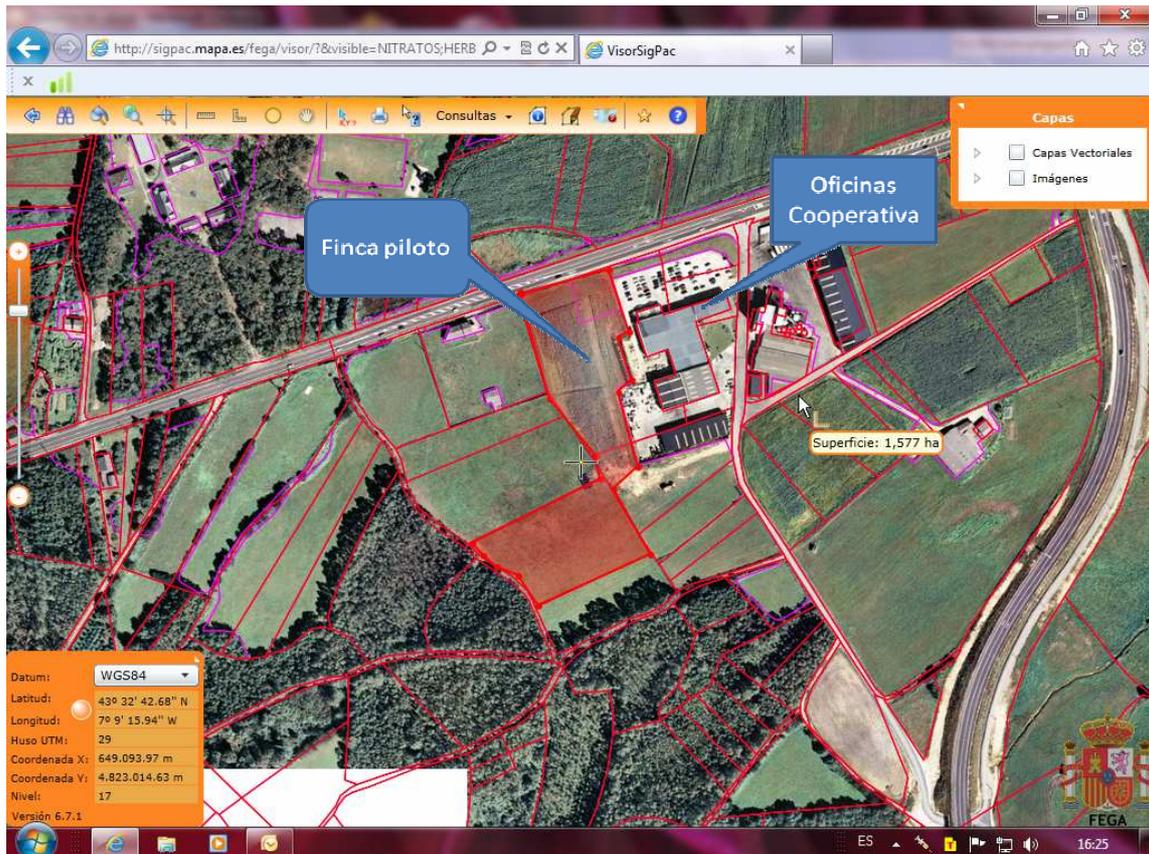


Figura 9. Escenario Piloto: zona de Costa en Ribadeo, inmediaciones de la cooperativa Os Irmandiños

Es una finca en la zona de litoral, a 500 metros de la línea de costa, expuesta al viento. Se ha seleccionado debido a que su historial de producción de forraje está registrado por el equipo técnico de la cooperativa y el laboreo y control de insumos, es dirigido por técnicos. Además, su proximidad a las instalaciones de la cooperativa (menos de 100 metros), permite establecer una supervisión continua de los distintos parámetros a estudiar en la parcela y realizar ajustes inmediatos en los equipos de medición.

Los técnicos de la Cooperativa determinaron que el número inicial de nodos y el juego de parámetros básico para poder realizar el seguimiento de la evolución del cultivo en esa parcela y validar los modelos predictivos implementados era el siguiente:

- **1 Estación Meteorológica:** Temperatura Ambiente, Humedad Relativa Ambiente, Presión Barométrica, Pluviometría, Dirección y Velocidad del Viento y Radiación Solar.
- **4 Mini-Estaciones Agro:** Temperatura Ambiente, Humedad Relativa Ambiente, Humedad del Terreno, Humectación Foliar y Diámetro del Tallo

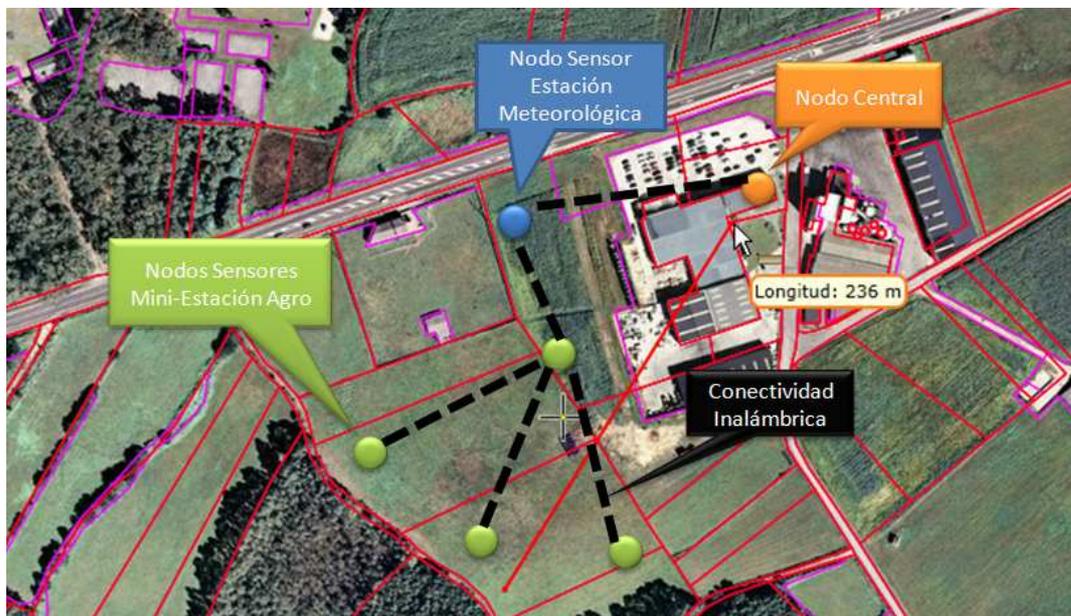


Figura 10. Instalación de Prototipos en Campo: Despliegue Final



Figura 11. Instalación de Prototipos en Campo: Nodo Sensor Mini-Estación Agro



Figura 12. Instalación de Prototipos en Campo: Nodo Sensor Estación Meteorológica

4.1. Validación de los modelos

La posibilidad que ofrece el SGRTR (Sistema de Gestión Remoto en Tiempo Real) de configurar alarmas parametrizables, permitió a la cooperativa estar informada de forma segura del riesgo y proponer actuaciones preventivas.

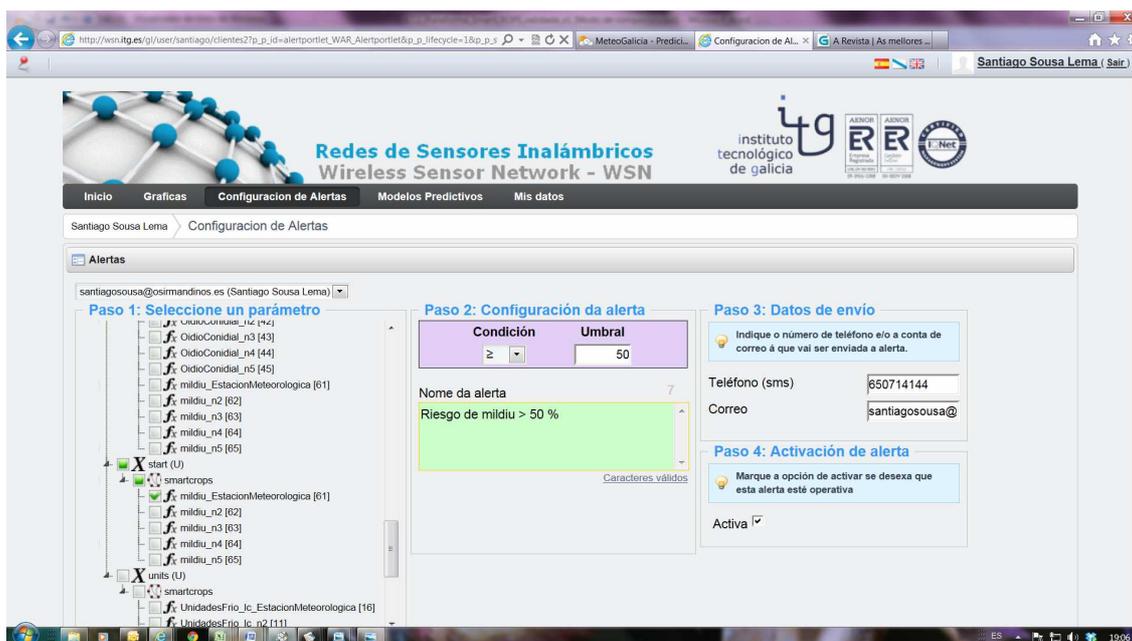


Figura 13. Pantalla de configuración de alertas: definición de alerta por riesgo superior al 50%

La confluencia de factores de clima, suelo y cultivo, determinan el riesgo de afectación de los cultivos a posibles plagas o enfermedades. Disponer de un sistema de alerta temprana, supuso una gran ventaja en el seguimiento y tratamiento de los cultivos.

Las indicaciones de los modelos, se han contrastado con los parámetros base que determinan el nivel de riesgo, como son la humedad ambiental y en hoja, la temperatura ambiente y la secuencia de lluvias. Además se evaluó en campo la situación de las plantas y su evolución tras los posibles ataques de los hongos que se evaluaron en los modelos predictivos.

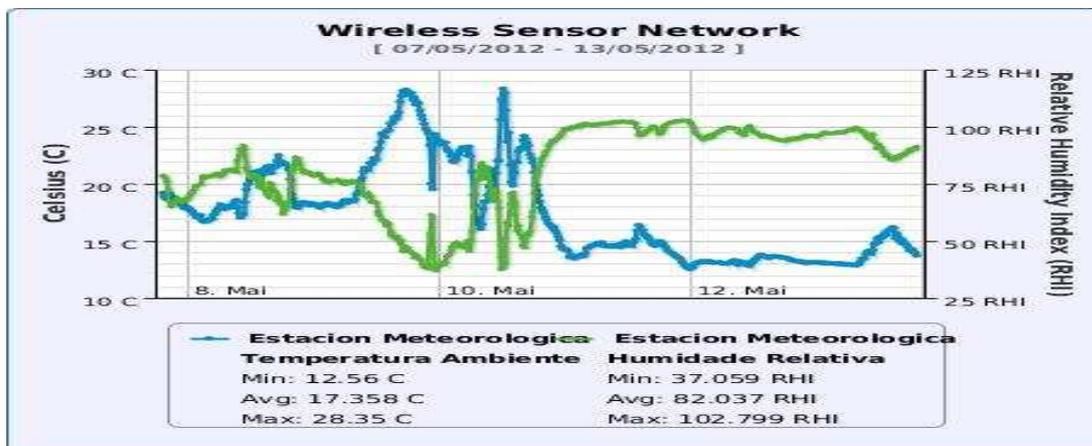


Figura 14. Gráfica representativa de los valores que generan el riesgo indicado en modelos predictivos

Sobre los cultivos implantados en los campos de la red piloto, no se ha detectado la presencia de hongos en sus fases tempranas, que es el riesgo del que advierte el sistema, si bien pudo constatarse que las condiciones ambientales y de cultivo, si eran adecuadas para que se iniciara el desarrollo de esporas latentes de ambos hongos.

Los modelos usados como base para el desarrollo del sistema, pueden calificarse como válidos si consideramos que el objetivo de su integración, es la de trabajar con los datos que recoge la red de sensores y la de generar una predicción del nivel de riesgo en base a los valores que considera en cada caso.

Para el desarrollo comercial y la posterior explotación del sistema, deben obtenerse mayores secuencias de datos y contrastar las predicciones de los modelos en un período lo suficientemente amplio, para determinar su fiabilidad al 100%.

No obstante, la plataforma WSN desarrollada permitió a los técnicos que supervisan las tareas de implantación y protección de cultivos, mejorar el seguimiento en su evolución y tomar decisiones respecto al sistema de mecanización más adecuado basándose en la evolución de las condiciones del suelo, clima y cultivo. Una vez implantado el prototipo, se realizó un uso continuo SGRTR para la consulta en tiempo real de las condiciones que influyen en el desarrollo del cultivo, se configuraron alarmas respecto a parámetros ambientales clave y se analizó la evolución del crecimiento de los cultivos.

5. Líneas Futuras de Trabajo

A lo largo de la elaboración del proyecto se han adquirido mayores conocimientos para el diseño de sistemas de telemetría basados en redes sensoriales inalámbricas, lo que ha permitido el planteamiento de nuevas líneas de trabajo:

- **Diseño de algoritmos de estimación distribuida basada en consenso.** La mayoría de las redes de sensores disponen de un dispositivo central que coordina al resto de dispositivos, como es el caso de SMARTCROPS. En la actualidad se están planteando líneas de investigación basadas en algoritmos distribuidos que pretenden crear redes autónomas sin nodo central con el fin de ganar escalabilidad, flexibilidad y robustez. La idea básica es la siguiente: los sensores cooperarían llegando a un consenso, el cual habitualmente guarda relación con las medidas iniciales de cada uno de ellos.
- **Desarrollo de Servicios Web a nivel de Nodo Sensor.** Uno de los mayores beneficios relacionados con dotar de IP a los nodos WSAN es el de poder construir sobre ellos servicios web. Los Servicios Web, son aquellos que pueden convertir cualquier aplicación en una aplicación web, cuyos mensajes y funciones pueden ser publicados para el resto del mundo. Las WSAN pueden beneficiarse mucho de su uso, desde que cualquier aplicación construida a partir de Servicios web presenta las siguientes prestaciones: *Interfaces Estándar*, *Gran usabilidad* (permite que cada cliente recupere de forma precisa los datos que considere necesarios) e *Interoperabilidad* (los servicios web por lo general no están ligados a una plataforma en concreto). Se considera de gran interés el planteamiento de Castellani en [13], quien detalla la realización de simples, pero potentes, Servicios Web para aplicaciones WSAN-IP por medio de CoAP (Constrained Application Protocol), el cual está siendo definido por el grupo de trabajo IETF CoRE (Constrained RESTful Environment).
- **Diseño y Desarrollo de Nuevas Plataformas WSAN con fuertes requisitos de Modularidad y Ultrabajo Consumo**, de forma que permitan la integración de diversas tecnologías de captación y de comunicación robustas y versátiles (e.g. IEEE 802.15.4, Bluetooth Low Energy, Low Power WiFi, etc.), así como de nuevas tecnologías emergentes (e.g. Dash7, IEEE 1902.1 o Rubees, etc.). El proyecto SMARTCROPS únicamente tiene en cuenta plataformas IEEE 802.15.4, lo cual, aunque es la tecnología más extendida por el momento, no es muy sostenible de cara a futuro. La construcción de plataformas modulares que permitan la conexión de diferentes interfaces radio, se considera prioritario en las actuales líneas de investigación cercanas a mercado.

- **Diseño y Desarrollo de nuevos Sistemas de Gestión GIS-WEB con total abstracción de las aplicaciones y servicios proporcionados con respecto a las tecnologías subyacentes**, para lo que es necesario dotar a la aplicación de gestión SMARTCROPS de un sistema de interconexión estándar. Numerosos proyectos de Investigación actuales que tratan problemas de esta índole, sitúan a la familia de estándares Sensor Web Enablement (SWE) de la Open Geospatial Consortium (OGC), como el sistema idóneo para este fin, proporcionando un modo de conexión de fuentes heterogéneas de información sin depender de cada solución propietaria.
- **Desarrollo de capacidades de Actuación**, una vez resuelto el problema de llegar hasta el nodo a nivel IP, se pretende dotar SGRTR de capacidades de actuación, es decir, además de recibir datos, posibilitar el envío de comandos a elementos actuadores. Un ejemplo claro en el contexto de la agricultura sería el accionamiento de forma remota de una boca de riego, la cual podría ser incluso llevado a cabo de forma automática ante una alerta.
- **Módulo de monitorización de nodos**, para solucionar rápidamente los problemas de comunicación o físicos que puedan sufrir los nodos, es de especial interés poder monitorizar parámetros de comportamiento de los mismos como: la frecuencia de envío de datos, calidad de la señal GPRS/3G, cantidad de datos enviados por unidad de tiempo, nivel de baterías, temperatura, etc.
- **Alta automática de nodos**, se pretende que el alta de nuevos nodos sea una tarea más sencilla para el instalador. Para ello se estudiarán diferentes formas de abordar esta tarea haciendo uso de las tecnologías que incorporan los smartphones como QR, NFC y GPS, pudiendo asociar el identificador del nodo a una posición GPS de forma automática.
- **Módulo de desarrollo de modelos**, actualmente la plataforma dispone de una serie de modelos enfocados a la agricultura, que a partir de un conjunto de parámetros obtienen otro parámetro o parámetros. Se pretende desarrollar un módulo avanzado para que el usuario pueda incorporar y probar sus propios modelos matemáticos de forma directa en la propia plataforma.
- **Minería de datos para desarrollar nuevos modelos**: Mediante la información recogida en varias campañas, y el feedback que puedan transmitir los expertos se pretenden obtener nuevos modelos haciendo uso de técnicas de minería de datos, que puedan adelantarse a la presencia de plagas y/o determinar el momento adecuado de la aplicación de tratamientos.

6. Conclusiones

En este artículo se ha analizado una solución de telemetría basada en sensores sin cables embebidos en cultivos. Esta solución ofrece una plataforma web que incorpora tecnologías GIS para visualizar los sensores en un mapa, recogiendo sus datos mediante servicios web, y permite al usuario visualizar gráficas de los diferentes parámetros, así como la definición de alarmas mediante e-mails o SMS cuando un parámetro alcance un umbral. Además permite la ejecución de modelos matemáticos que a partir de los datos disponibles generan nuevos datos agregados que añaden significado a la situación de los cultivos monitorizados.

Finalmente se ha detallado la implementación de los modelos disponibles de agricultura, útiles para la monitorización de cultivos y detección de plagas para realizar la aplicación de los tratamientos en el momento adecuado minimizando costes e impacto ecológico.

7. Agradecimientos y Financiación

El presente trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto SMARTCROPS (10MRU023E), *“Técnicas Avanzadas de Producción Sostenible para Agricultura de Precisión en Cooperativas mediante Sistemas de Sensores Embebidos”* liderado por la cooperativa Os Irmandiños en colaboración con el Instituto Tecnológico de Galicia (financiado por el PLAN GALLEGO de I+D, Consellería de Innovación e Industria de la Xunta de Galicia, 2010).



8. Referencias

- [1] CS Raghavendra, KM Sivaligam, T Znati. Wireless Sensor Networks, 2006
- [2] Agricultura de Precisión. <http://www.agriculturadeprecision.org>
- [3] P. Haneveld. Evading Murphy: A sensor network deployment in precision agriculture. O teu-Delft, Junio 2007. <http://www.st.ewi.tudelft.nl/~koen>
- [4] Analía López Fidalgo, Lucía López González, Jorge Seoane Brandariz, Xurxo Cegarra González. Redes de Sensores sin Cables para Agricultura de Precisión en Regiones Minifundistas. Conama 2010
- [5] SIG para o seguimiento vitícola e diferenciación de lotes de vendima na D.O. Bierzo (León-España) E.S.T. Enxeñaría Agraria. Universidade de León. Avda. de Astorga s/n. 24400-Ponferrada (León). email: jrrodp@unileon.es
- [6] J. Panchard, S. Raio, P. T.V., J. Hubaux, e H. Jamadagni. Commonsense net: A wireless sensor network for resource-poor agriculture in the semiarid areas of developing countries. Information Technologies and International Development, 4 (1): 51-67, 2007
- [7] Matese, A., Di Gennaro, S.F., Zaldei, A., Genesio, L., Vaccari, F.P., (2009), "A wireless sensor network for precision viticulture: the NAV system", Computers and Electronics in Agriculture, 69, p. 51-58.
- [8] IETF 6LoWPAN: <http://www.ietf.org/rfc/rfc4944.txt>
- [9] Gonçal Barrios, Joan Reyes. "Modelización del Mildiu de la Vid". Phytoma, 2004
- [10] Wayne F. Wilcox. "Grapevine Powdery Mildew". Cornell University and the New York State IPM Program, 2003
- [11] Clyde W. Fraisse, Alicia Whidden. "Chill Accumulation Monitoring and Forecasting". University of Florida IFAS Extension, 2010.
- [12] George H. Hargreaves and Richard G. Allen, "History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, vol 129, issue 1, 2003.
- [13] A.P. Castellani, M. Gheda, N. Bui, M. Rossi and M. Zorzi. "Web Services for the Internet of Things through CoAP and EXI" in Communications Workshops (ICC), 2011