



CONAMA10
CONGRESO NACIONAL
DEL MEDIO AMBIENTE

COMUNICACIÓN TÉCNICA

Redes de Sensores sin Cables para Agricultura de Precisión en Regiones Minifundistas

Autor: Analía López Fidalgo

Institución: Fundación Instituto Tecnológico de Galicia

e-mail: afidalgo@itg.es

Otros Autores: Lucía López González ¹; Jorge Seoane Brandariz ¹, Xurxo Cegarra González ² 1. Fundación Instituto Tecnológico de Galicia, POCOMACO, SECTOR I, PORTAL 5. 15190 A Coruña (SPAIN) 2. Wireless Galicia, S.L. C/ Colón 26 – Planta 4ª, Oficina 3. 36201 – Vigo (SPAIN)



Abstract

Precision agriculture brings together a group of advanced techniques for enhancing crop production while minimizing potential environmental pollution through a more accurate and efficient treatment of the crops based on the land variability.

Thanks to developments in the field of wireless sensor networks as well as miniaturization of the sensor boards, this concept is becoming a reality.

In recent years, Wireless Sensor Network deployments for precision agriculture have increased. However, all of them have focused on large areas of hundreds or thousands of hectares. This article introduces the architecture of a wireless sensor network for precision agriculture in smallholdings regions, which have special communications requirements since fields can be distant from each other so a pure ad-hoc multihop network would not be adapted to them.

Key words: *Precision Agriculture, Smallholdings, Wireless Sensor Networks, Real time monitoring system.*

Resumen

La agricultura de precisión engloba un conjunto de técnicas que permiten tratar los cultivos de una forma más eficiente y con ello obtener mayores beneficios económicos y a la vez minimizar su impacto medioambiental. Se basa fundamentalmente en el tratamiento del terreno de forma diferenciada según su variabilidad.

Gracias a los últimos avances en el campo de las redes de sensores sin cables (WSN, Wireless Sensor Networks), así como en la miniaturización de componentes microelectrónicos, este concepto se está convirtiendo en una realidad.

En los últimos años estamos asistiendo al desarrollo de diversas aplicaciones de agricultura de precisión basadas en tecnología WSN como herramienta facilitadora. Sin embargo, casi todas las experiencias se centran en amplias áreas de cientos o miles de hectáreas. Este artículo presenta la arquitectura de una red de sensores sin cables para agricultura de precisión en regiones típicamente minifundistas, las cuales presentan requerimientos específicos de comunicaciones debido a la dispersión y pequeño tamaño de los cultivos, por lo que una red puramente ad-hoc no se adecúa a esta problemática.

Palabras Clave: *Agricultura de Precisión, Minifundios, Redes de Sensores sin Cables, Monitorización Remota en Tiempo Real*

1. Introducción

El uso abusivo e irracional de los recursos naturales en la agricultura española (ineficiente utilización de insumos agrícolas, sobreexplotación del suelo y de los recursos hídricos) 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 una problemática agravada por el momento actual de recesión económica: progresivo envejecimiento y emigración de la población activa hacia otros sectores económicos. La dimensión media de las explotaciones españolas - 23 Ha de SAU (Superficie Agraria Útil) en 2.005- sigue encontrándose entre las más pequeñas de la UE-15, junto con las de Austria (19,1), Portugal (11,4), Italia (7,4) y Grecia (4,8), indicador de debilidad estructural que limita la competitividad del sector en su conjunto. En los últimos años se aprecia una desaceleración del proceso de ajuste estructural, lo que da a entender que el aumento del rendimiento de las explotaciones no depende tanto del aumento de la dimensión como de su desplazamiento hacia orientaciones con mayor productividad. En regiones en las que predomina el minifundismo, existen además problemas derivados de sus inadecuadas estructuras de producción: excesiva parcelación, deficiencias de la formación profesional del personal, reducida implantación de las estructuras cooperativas, desorganización e individualismo en los canales de distribución y comercialización, marcada dispersión y atomización de las explotaciones y de los métodos de trabajo y de las tecnologías utilizadas.

El reto está claro: es preciso potenciar la producción agrícola, pero con parámetros de sostenibilidad. La agricultura de precisión es un tipo de agricultura más respetuosa con el medioambiente, ya que realiza las aplicaciones de insumos (fertilizantes, fitosanitarios, agua) según las necesidades del cultivo, lo que repercute también en un ahorro de costes, aumento de la calidad y productividad. La telemetría, la localización por satélite y los sistemas de información geográfica (GIS), son la base sobre la cual se sustenta este tipo de agricultura. Debido a que la rentabilidad de la agricultura de precisión es sitio-específica, importar la tecnología de otros países o regiones no es tan efectivo como en otros casos, lo que hace necesario desarrollar sistemas escalables pero que a la vez tengan en cuenta condiciones locales.

La telemetría basada en redes sensores inalámbricas (tecnología WSN, Wireless Sensor Networks) se plantea como herramienta facilitadora de técnicas de agricultura de precisión (AP), haciendo posible que los datos de evolución de parámetros críticos de la explotación estén accesibles 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), de manera que pueda tomar decisiones a tiempo. Estas técnicas permiten la mejora del rendimiento y eficiencia de cultivos en explotaciones agrarias típicamente minifundistas, contribuyendo así al desarrollo de una agricultura sostenible.

Este artículo presenta una propuesta de arquitectura de red de sensores en los aspectos relativos a tipología de nodos, integración de sensores, tecnología WSN, topología y encaminamiento de red. La línea fundamental de desarrollo técnico de la red de sensores se centra en el empleo de tecnologías de sensores sin hilos WSN (*Wireless Sensor Networks / estándar IEEE 802.15.4*) para el diseño de un sistema distribuido de captación de información de diversos parámetros críticos en la evolución de cultivos en regiones minifundistas. Se plantean además líneas futuras de investigación y desarrollo relacionadas con arquitecturas basadas en “Internet de las Cosas” y tecnologías IP, especialmente interesantes para el ámbito de explotaciones minifundistas.

2. Estado del Arte

Las redes de sensores inalámbricas se identifican como una de las tecnologías clave para una rápida adopción y desarrollo de la agricultura de precisión. Los nodos sensores inalámbricos se alimentan normalmente con baterías o energía solar, lo que permite un fácil despliegue en el ámbito de una explotación agraria, tienen un bajo consumo, lo que permite una autonomía elevada (meses, incluso años), esto unido a su bajo coste y a las características de autoorganización y autoconfiguración de la red, hacen que la tecnología sea especialmente idónea para el ámbito de aplicación objeto del proyecto. Es posible integrar varios tipos de sensores en un único nodo inalámbrico, por lo que, las condiciones del suelo y el cultivo, tales como temperatura, humedad, iluminación, plagas, etc pueden ser monitorizadas de forma remota y en tiempo real.

Tanto a nivel internacional como nacional existen empresas y entidades que tienen en su cartera de servicios y productos la implantación de redes de sensores sin cables, y su aplicación a la agricultura de precisión.

En cuanto a proyectos concretos (I+D+i) se han localizado referencias en la aplicación WSN en agricultura (nacional e internacional) que abordan problemáticas específicas de regiones concretas:

- León-España. (Diciembre 2009). Sistema de asistencia al viticultor para el seguimiento vitícola y diferenciación de lotes de vendimia en la D.O. Bierzo **[1]**
- Proyecto Lofar Agro **[2]**. Mejora de las condiciones de combate de fitófitas a través del cálculo de riesgo de desarrollo de la enfermedad. 150 nodos sensores. Datos de temperatura, humedad, luminosidad, presión atmosférica, precipitación, velocidad y dirección del viento, humedad del suelo y el nivel de agua subterránea. La transmisión de datos es diseñada para ahorrar energía en la comunicación. Los nodos utilizan como sistema operativo TinyOS, y el protocolo de enrutamiento multi-salto utilizado es MintRoute.
- Proyecto COMMONSense Net, trabajo conjunto entre India y Suiza **[3]**, una red de sensores diseñada para proveer, a agricultores en zonas con recursos naturales restringidos en países en vías de desarrollo, con información capaz de dar soporte a decisiones orientadas al mejoramiento de la producción.
- China. Cultivos en cuencas de ríos. Mejorar el rendimiento de cultivos en las cuencas del río Huaihe en China, intentando a su vez reducir el

desaprovechamiento de un 70% del agua utilizada se propone en [4] utilizar una red de sensores

- China. Invernaderos [5]. Esta red recopila los datos de temperatura, humedad ambiental y de suelo en un nodo sumidero, que utiliza luego la red GSM para transmitir los datos recopilados a un punto central. Estas aplicaciones en China utilizan el nodo MicaZ de Crossbow
- Otras referencias consultadas a nivel internacional se indican en [6], [7], [8], [9], [10], [11] y [12].

Las principales técnicas y tecnologías que se vienen empleado en Agricultura de Precisión son el GPS, los sistemas GIS, teledetección con GPRS, dispositivos a bordo de maquinaria agrícola y sistemas expertos para el desarrollo de Sistemas de Soporte a la Decisión (SDD). En este contexto se puede afirmar que las redes inalámbricas de sensores proveen la flexibilidad necesaria para disminuir tiempos de instalación, recolección de datos y mantenimiento, y mayor resolución espacial y temporal en el muestreo de las variables de interés a lo alcanzable con métodos tradicionales, factores todos ellos muy importantes para adaptarse a las condiciones específicas de los minifundios.

3. El papel de las redes WSN en la Agricultura de Precisión

Las redes inalámbricas de sensores, WSN, hacen posible la agricultura de precisión, 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 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

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).

Los cultivos, sean protegidos o en campo abierto, interactúan con cuatro factores que determinarán su rendimiento y resistencia: clima, biota, fisiología y suelo [13]. 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. La figura siguiente sintetiza el papel de las redes de sensores en aplicaciones agronómicas.

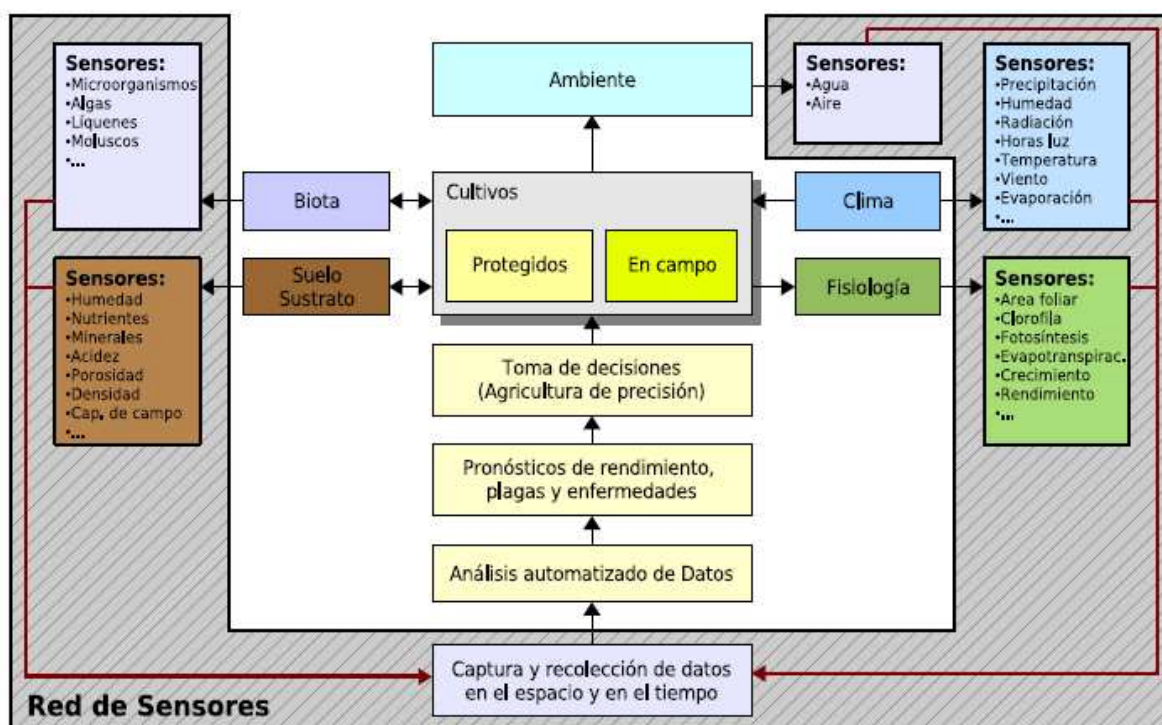


Figura 1. *Redes de Sensores en aplicaciones agronómicas, basada en [14]*

Entre las aplicaciones más importantes cabe destacar:

- Detección Temprana de Heladas
- Aplicaciones de Riego
- Control de Plagas
- Reducción del Uso de Agroquímicos
- Caracterización del Clima de una Zona
- Predicción de la Cosecha en Base al Clima

4. Problemática España/Europa: Pequeñas Explotaciones

La monitorización remota de variables está dando muy buenos resultados (grandes beneficios económicos y medioambientales) en explotaciones de gran tamaño (latifundios).

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, y su gestión es complicada debido al cooperativismo.

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 Política Agrícola Común (PAC) 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 otros característicos, 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 S.A.U. (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, haciendo posibles modelos de negocio rentables y adaptados a esta problemática, 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).

Para ello es necesario superar una serie de retos tecnológicos cuya problemática técnica viene determinada fundamentalmente por los siguientes factores:



- *Variabilidad del Terreno - Orografía - Zonificación.* La agricultura de precisión tiene en cuenta la variabilidad del terreno a la hora de tratar los cultivos, por tanto se basa en la necesidad de dividir el terreno en unidades homogéneas (zonificación) para su posterior tratamiento. La zonificación es dependiente del tipo de cultivo, del clima, de la orografía...En regiones afectadas por minifundismo la orografía suele ser accidentada, por lo que la variabilidad del terreno es elevada, esto hace que la zonificación sea mayor, todo ello complica la implantación de soluciones de telemetría (más número de nodos y mayor dificultad para el envío de información), influyendo en la topología de red, protocolos de encaminamiento, bandas de frecuencia, arquitecturas de almacenamiento y procesado de información, etc
- *Explotación y Propiedad de la Solución.* Es otro factor fundamental que determina los requerimientos del diseño, pues en zonas donde las explotaciones sean muy pequeñas no es viable plantear una solución por propietario, será necesario agrupar explotaciones para diseñar sobre ellas una solución conjunta, p.ej. a nivel de cooperativa agraria. Esto influirá nuevamente en aspectos de topología, encaminamiento de información, almacenamiento, y sobre todo gestión de red.

5. Requisitos del Sistema

La aplicación final es la condición más restrictiva a la hora de establecer una metodología de despliegue para cualquier tipo de red. Para poder fijar cada uno de los parámetros de la red, habrá que partir de las funcionalidades y exigencias de cada elemento del sistema. En los siguientes apartados, se presentan los principales requisitos, tanto de captación como de comunicaciones, que implica la monitorización en tiempo real de los principales parámetros de agricultura de precisión que influyen en el rendimiento y la eficiencia de cultivos.

5.1. Principales requisitos de comunicación

En líneas generales, la red de comunicaciones debe ser capaz de transmitir en tiempo real la información recogida por cada uno de los sensores implicados. La siguiente tabla recoge, de forma más concreta, las diferentes funcionalidades con las que debe contar la red clasificadas en función de los parámetros de comunicación a los que afecta:

Parámetros de Comunicación	Funcionalidades/Características del Sistema
Tamaño de la Red	No se encuentra predefinido, puede ser variable. La topología de red que mejor se ajusta al escenario es la de una red mallada adhoc, donde cada nodo sea capaz de encaminar la información hacia el destino final y la decisión sobre qué camino seguir se toma de forma dinámica en función de la conectividad de la red.
Movilidad de los Nodos	La disposición de los nodos es fija, deben estar situados en zonas específicas controladas. Estamos ante una tipología de red estructurada, cuya colocación de los nodos se realiza de forma manual y planificada.
Tiempo de Vida - Energía	Fuertes requisitos de bajo consumo, desde que el acceso a los cultivos/explotaciones agrarias puede ser dificultoso. En este sentido habrá que trabajar en un protocolo de encaminamiento con requisitos de bajo consumo.
Escalabilidad	La red debe ser escalable. Su tamaño puede variar en cualquier momento con lo que debe permitir la inclusión de nuevos nodos en la red.
Heterogeneidad	La red de captación debe integrarse a Internet, por lo que los nodos de comunicación serán necesariamente heterogéneos. Al menos uno de los puntos de la red debe contar con acceso a Internet, dependiendo de su ubicación con respecto a los nodos de captación (nodos con sensores integrados), podrá ser necesario incluir una serie de nodos router intermedios.
QoS	La transmisión debe ser en tiempo real y tolerante a fallos. El intervalo de medición mínimo establecido es de 15 min.
Tipología de Datos	Los datos que se van a transmitir, son datos de sensores que no requieren un gran ancho de banda.
HW del nodo	El nodo de comunicación no requiere de una elevada capacidad de proceso pero debe permitir la integración de sensores externos a través de interfaces de entrada analógicas y/o digitales.

Tabla 1. *Requisitos de Comunicaciones de la red WSN*

5.2. Requisitos de Captación: Integración de Sensores para Agricultura de Precisión

A la hora de integrar sensores con la tecnología WSN es muy importante tener en cuenta los requerimientos particulares de cada uno de ellos, además de la tecnología concreta WSN empleada.

5.2.1. Tecnología WSN

Hoy en día muchos de los fabricantes de semiconductores, así como de circuitos integrados (entre ellos Texas Instruments) están apostando por esta nueva tecnología, desarrollando productos que le dan soporte. Esto tiene como consecuencia que empresas dedicadas a las tecnologías inalámbricas se sumen al carro, integrando esos productos para ofrecer soluciones hardware y software en el ámbito de redes sensoriales inalámbricas de bajo consumo. Existe un gran número de proveedores en este ámbito: MEMSIC (<http://www.memsic.com>) [15], MeshNetics, Digi, Ember, Freescale, Telegesis, SunSPOT, Sentilla, Jennic, Chipcon, Libelium (<http://www.libelium.com>) [16], etc. Las soluciones seleccionadas para el presente proyecto son:

La tecnología radio seleccionada para los Nodos Sensores es el **mote IRIS** de la compañía estadounidense **MEMSIC** (anteriormente perteneciente a Crossbow Technologies [17]). Las características inherentes a este dispositivo condicionan la conexión/integración con los diferentes sensores externos, por lo que, a continuación se realiza una breve descripción del **mote IRIS** indicando los requerimientos impuestos.

El mote **IRIS** utiliza el chipset radio *Chipcon CC2420*, en la banda de 2400 a 2483.5 MHz y es compatible con el estándar *IEEE 802.15.4/ZigBee*. Lleva integrado un microcontrolador *Atmega1281* y una memoria *flash* serie. La siguiente figura muestra un diagrama de bloques con todos sus componentes.

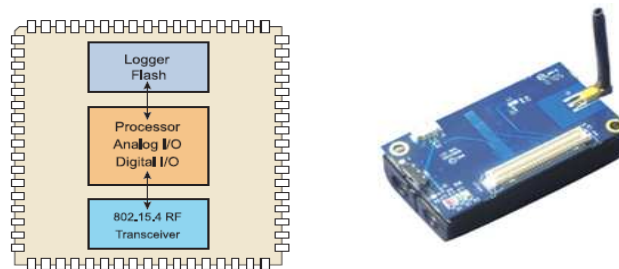


Figura 2. Mote IRIS de MEMSIC

Tal como se muestra en la figura, el microcontrolador posee un convertor analógico-digital, al cual se accede a través de su conector de expansión. La mayor parte de las señales interpretables de salida de un sensor, son voltajes, es decir, señales analógicas, por lo que resulta de especial interés prestar atención a los requisitos de este convertor.

Mote Hardware Platform		IRIS	MICAz	MICA2	MICA2DOT
Models (as of April 2005)		XM2110	MPR2400	MPR400/410/420	MPR500/510/520
MCU	Chip	ATMega1281		ATMega128L	
	Type	7.37 MHz, 8 bit			4 MHz, 8 bit
	Program Memory (kB)	128			
	SRAM (kB)	8	4		
Sensor Board Interface	Type	51 pin			18 pin
	10-Bit ADC	7, 0 V to 3 V input			6, 0 V to 3 V input
	UART	2			1
	Other interfaces	DIO, I2C			DIO
RF Transceiver (Radio)	Chip	RF230	CC2420	CC1000	
	Radio Frequency (MHz)	2400		315/433/915	
	Max. Data Rate (kbits/sec)	250		38.4	
	Antenna				

Figura 3. Características de varios Motes de Crossbow

En la figura anterior se especifican las características de varios *motes* de *Crossbow*. Si nos fijamos en el IRIS y atendemos a la interfaz de conexión del microcontrolador (*Sensor Board Interface*), vemos que el conversor analógico digital, **ADC**, tiene una resolución de **10 bits** y sus **tensiones de entrada** están limitadas al rango de **0 a 3V**.

Asimismo, para facilitar la conexión de dispositivos externos, *MEMSIC* ofrece diversas placas de adquisición de datos, tales como la *MDA100* y la *MDA300*. Ésta última cuenta además con un ADC de mayor resolución (12 bits). Por otro lado, también ofrece una versión del nodo para exteriores, *EKO*, el cual posee una placa solar integrada (para obtener una alimentación continua) y cuya carcasa cumple con la protección IP66. Este nodo ya posee integrada la placa *MDA300*, que **incrementa la resolución del ADC a 12bits**, y posee conectores Switchcraft EN3C6F para integrar diversos sensores de forma directa. Todas estas características, lo convierten en el nodo ideal para SWAP.



Figura 4. Placas de Adquisición de Datos y Nodo EKO de MEMSIC

A continuación se describen algunos de los sensores empleados:

Parámetro	Modelo Sensor	Fabricante
Humectación de la Hoja	ES1301 Leaf Wetness Sensor	Decagon Devices [18]
Temperatura y Humedad del Suelo	ES1101 Watermark Sensor	Watermark [19]
Temperatura y Humedad del Aire	ES1201 (Sensirion SHT75) [20]	Memsic
Radiación Solar	ES1401 Solar Radiation	Davis Instruments [21]
Estación Meteorológica (Anemómetro, Pluviómetro, Barómetro)	ES2000 Weather Station	Davis Instruments

Tabla 2. Sensores empleados en el proyecto

5.2.2. Humectación de la Hoja. Decagon Devices.

Se ha seleccionado este sensor debido a que presenta muy bajo consumo, lo cual permite realizar mediciones a lo largo de un gran periodo de tiempo, tal y como requiere el sistema SWAP. Su principio de funcionamiento se basa en la medición de la constante dieléctrica de la superficie superior del sensor, lo cual le da una estimación fiable de la humedad existente en la superficie de la hoja. Asimismo, presenta una gran resolución, lo que le da la capacidad de detectar cantidades muy pequeñas de agua o incluso hielo.



Figura 6. Sensor Humedad de Hoja. Decagon Devices

Como tensión de alimentación soporta señales de entre 2.5VDC@2mA y 5VDC@7mA. Como salida presenta una señal analógica de tensión comprendida entre el 10 y el 50% de la tensión de alimentación, dependiendo de la constante dieléctrica que rodea a la sonda, (p.e. 320-1000mV para 3V de excitación).

Cualquier módulo que pueda producir una excitación de 2,5 a 5V con aproximadamente 10 milisegundos de duración y leer una señal analógica con una resolución mínima de 12-bit, es compatible con este modelo de sensor (LWS, Leaf Wetness Sensor).

La interpretación de la señal en función de los datos proporcionados por el ADC se resume en la siguiente figura:

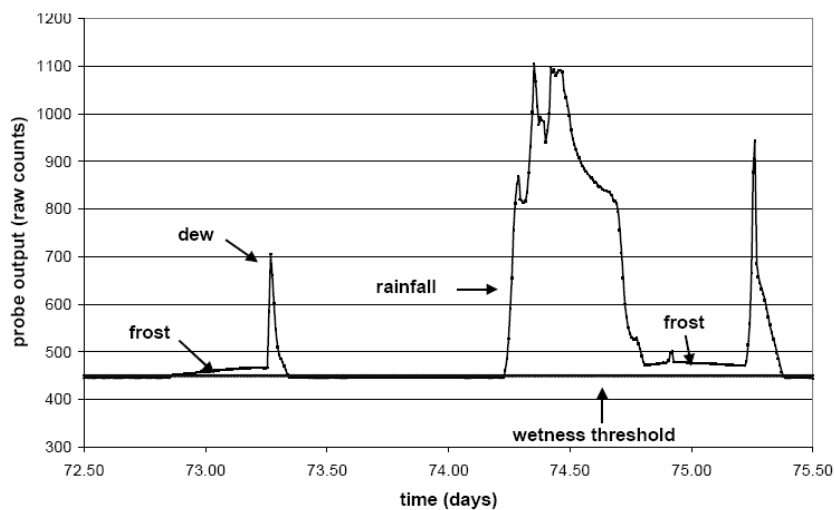


Figura 7. Interpretación de los datos del ADC. Sensor Humedad de Hoja

Cuando la salida es igual a 445 el sensor puede considerarse completamente seco, mientras que para 1100, se estaría en situación de lluvia intensa.

5.2.3. Temperatura y Humedad del Suelo. Watermark.

El sensor seleccionado de Watermark es un dispositivo resistente que responde a los cambios de la humedad y temperatura del suelo. Una vez instalado, intercambia agua con la tierra circundante por lo que se mantiene en equilibrio con ella. A medida que el suelo se va secando el agua se elimina del sensor, lo cual hace que aumente su resistencia. Cuando el suelo se humedece, su resistencia disminuye, proporcionando de esa forma una indicación relativa del contenido de agua del suelo. Se ha seleccionado este sensor debido a su gran estabilidad, lo cual elimina la necesidad de calibración entre instalaciones, y a que presenta un bajo consumo.



Figura 8. Sensor Temperatura y Humedad del Suelo. Watermark

Requiere una tensión de alimentación de 5VDC@1.5mA, lo cual genera una salida analógica de tensión comprendida entre 0 y 3V, directamente proporcional al rango del sensor (0 a 200 cbar). La siguiente tabla indica la interpretación de las típicas mediciones de humedad del suelo:

Humedad del Suelo (cbar)	Condición del Suelo
0-10	Suelo saturado. Sucede durante un día o dos después del riego.
10-20	Suelo adecuadamente húmedo (excepto terrenos áridos, que todavía se mantienen secos en este rango).
30-60	Rango común para el riego (excepto suelos arcillosos). En terrenos húmedos, como el caso gallego, se recomienda regar en el tope de este rango.
60-100	Rango de riego para suelos arcillosos.
100-200	El suelo se encuentra peligrosamente seco para la producción.

Tabla 2. Interpretación Típica de los valores de Humedad del Suelo

El sensor presenta una **resolución de 0.05 cbar**, lo cual requiere un ADC con resolución mínima de **12 bits**, y la **precisión** es del **±2% del factor de escala**.

5.2.4. Temperatura y Humedad del Aire. Memsic.

El sensor seleccionado para medir la humedad y temperatura del aire es el modelo ES1201 de MEMSIC, el cual está compuesto por el sensor Sensirion SHT75, una carcasa que lo protege de daños mecánicos y un filtro de membrana que protege a los elementos del sensor de partículas de polvo, suciedad y agua pulverizada.



Figura 9. Sensor Temperatura y Humedad del Aire. Memsic

SHT75 es un **sensor digital** que presenta un consumo muy bajo (80μW para una **tensión de alimentación de 3V** y convertor de 12bits de resolución). El **rango de temperatura** que proporciona va desde **-40 a 125°C** y presenta un tiempo de respuesta igual a 8s. Las medidas de temperatura y humedad relativa también son utilizadas para calcular el punto de rocío. El punto de rocío se define como la temperatura a la que la cantidad actual de humedad en el aire comienza a condensarse. Las siguientes figuras muestran la precisión del sensor para cada uno de los parámetros medibles:

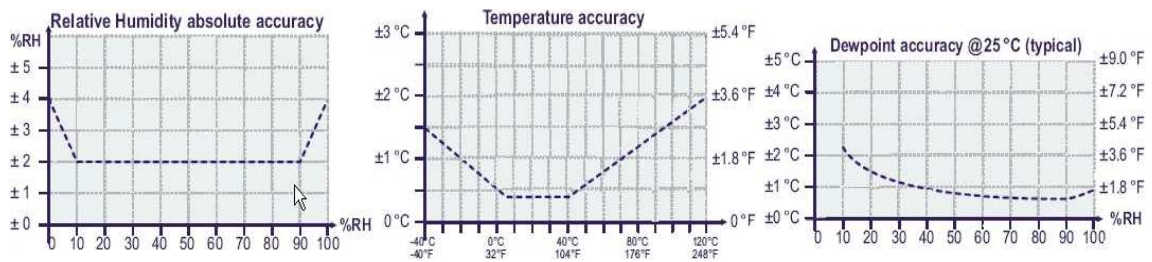


Figura 10. Precisión del Sensor para Humedad Relativa, Temperatura y Punto de Rocío

5.2.5. Radiación Solar. Davis Instruments.

El sensor de radiación solar de Davis es un instrumento de precisión que detecta la radiación en longitudes de onda de 300 a 1100 nanómetros. El transductor, que convierte la radiación incidente a la corriente eléctrica, es un fotodiodo de silicio con una amplia respuesta espectral, lo cual permite monitorizar la evotranspiración.



Figura 11. Sensor de Radiación Solar. David Instruments

Requiere una **tensión de alimentación de 3VDC±10%@1mA** y presenta como **salida** una señal analógica de **tensión comprendida entre 0 y 3V**, en función de la radiación solar existente ($1.67\text{mV por } W/m^2$).

Proporciona una **resolución de $1W/m^2$ (12 bits)** dentro de su **rango de medición (0 a $1800W/m^2$)** y una **precisión del ±5%**. La siguiente figura muestra una respuesta típica del sensor.

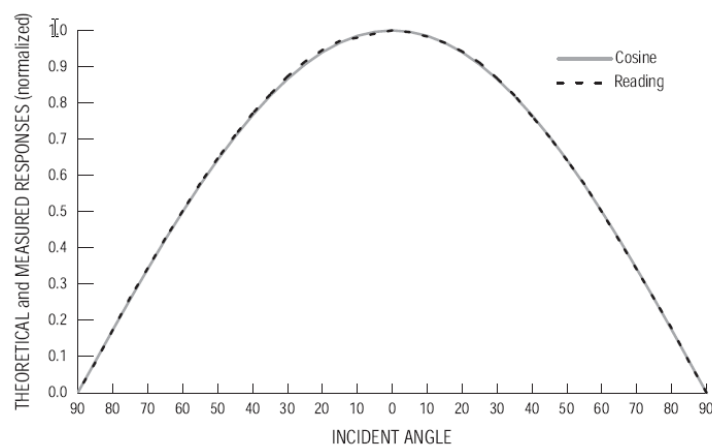


Figura 12. Respuesta Típica del Sensor de Radiación Solar. David Instruments

5.2.6. Estación Meteorológica. Davis Instruments.

La estación meteorológica de Davis proporciona suficiente información para calcular las horas de frío, los días de máximo calor y el punto de rocío (parámetros típicos usados en agricultura). Para ello cuenta con una amplia gama de sensores:

- Temperatura
- Humedad
- Velocidad y Dirección del Viento
- Anemómetro
- Pluviómetro
- Barómetro
- Radiación Solar



Figura 13. Estación Meteorológica de David Instruments

Los datos recogidos de los sensores de temperatura y humedad junto con el sensor de radiación solar permiten a los usuarios monitorizar la ET (evapotranspiración), que es una estimación del agua evaporada de las plantas y proporciona datos útiles para determinar cuándo y en qué cantidad hay que regar. Los usuarios pueden utilizar los datos recogidos para hacer pronósticos, graficación, configurar alertas, etc. La empresa facilita la conexión directa a módulos inalámbricos IEEE 802.15.4.

5.2.7. Integración de Sensores con Tecnología EKO de MEMSIC

Todos los sensores descritos en los puntos anteriores poseen como salida una señal digital o una señal analógica de tensión entre 0 y 3V, con lo que su integración con el nodo inalámbrico seleccionado es directa. En caso de que se den aplicaciones más específicas donde se requiera otra tipología de sensores, será necesario realizar un circuito de adaptación intermedio entre nodo y sensor. A continuación se detalla cómo se realizaría esta conexión.

El mote IRIS para exteriores, EKO, está diseñado para funcionar con diversos tipos de sensores. Sensores con características de bajo consumo que puedan recibir energía de la batería del nodo (típicamente 3,6V) y cuyas señales de salida se encuentren entre los

0 y 3V, pueden conectarse directamente al nodo (como es el caso de los analizados en SWAP).

Tal y como se ha comentado anteriormente, sensores que requieran un mayor nivel de acondicionamiento de señal, acondicionamiento de potencia o el uso de comunicaciones digitales, requieren una interfaz o circuito de adaptación externo. Se pueden distinguir entre tres tipologías de sensores integrables con EKO:

- **TIPO I:** Sensores analógicos que se puedan conectar directamente al nodo, sin necesidad de ningún tipo de acondicionamiento de señal o potencia. El nodo puede interactuar directamente con:
 - Sensores resistivos de 2 hilos que necesitan resistencias de 10k Ω , tales como los sensores de temperatura y humedad del suelo.
 - Sensores de 3 hilos (alimentación, tierra y salida del sensor), que son alimentados entre 3 y 4V y cuya salida no supera los 3V. La alimentación proporcionada por el nodo puede ser a través de una línea GPIO (8mA máximo) o directamente de las baterías (3.6 a 4.2V, 100mA máximo).

Esta tipología de sensores sólo necesitan ser conectados a través de un conector Switchcraft EN3C6F con una EEPROM programada para la auto-identificación (ver siguiente figura).



Figura 14. Conector Switchcraft EN3C6F

- **TIPO II:** Sensores analógicos que requieran un acondicionamiento de señal (amplificación, cambio de nivel, etc.) y/o de potencia.
Para esta tipología de sensores se requiere de una etapa de adaptación intermedia entre el sensor y el nodo. La placa que proporciona MEMSIC para este propósito es la ES9100, mostrada en la siguiente figura, directamente conectable al Switchcraft EN3C6F.



Figura 15. Placa ES9100 y conexión al Switchcraft EN3C6F

Esta placa incluye:

- Soporte para 2 sensores analógicos en uno de los puertos del nodo.
 - Cada entrada del sensor es:
 - Configurable (jumper) para una entrada simple o diferencial.
 - Atenuación seleccionable (potenciómetro).
 - Ganancia de 1 a 500 seleccionable a través del amplificador AD623.
 - Offset del amplificador seleccionable (jumper) entre 0 y 1,2V.
 - Alimentación del sensor seleccionable (jumper):
 - Batería del nodo (3.6-4.2V)
 - Refuerzo de alimentación a través de una batería externa. Configurable mediante un potenciómetro.
 - Regulador de tensión lineal de precisión, alimentado por las baterías del nodo o por una auxiliar. Configurable mediante un potenciómetro.
 - Dos conectores de 6 pines: uno para los sensores externos y otro para el Switchcraft EN3C6F.
- **TIPO III:** Sensores digitales que requieran un protocolo de comunicación. Al igual que para la anterior tipología de sensores, requieren de un circuito de adaptación externo entre sensor y nodo. La placa que proporciona MEMSIC para este propósito es la ES9200, mostrada en la siguiente figura, directamente conectable al Switchcraft EN3C6F.



Figura 16. Placa ES9200 y conexión al Switchcraft EN3C6F

Esta placa incluye:

- Un microprocesador Atmega128L programable para la comunicación entre el nodo y el sensor:
 - Conector JTAG para el desarrollo y la depuración del código
 - Conector ISP para la carga del código y la configuración de fusibles.
- Transceptor RS485 para la comunicación half-duplex con el nodo
- Transceptor RS232 para la comunicación con sensores inteligentes
- Entradas de los sensores seleccionables (jumpers) para la respuesta a interrupciones, contadores de pulsos y puertos SPI e I2C.
- Alimentación del sensor seleccionable (jumper) entre las baterías del nodo u otra externa.
- Alimentación del sensor seleccionable (jumper) entre refuerzo de tensión y/o salida lineal del regulador.
- Dos conectores de 6 pines: uno para los sensores externos (pueden ser múltiples) y otro para el Switchcraft EN3C6F.

6. Arquitectura del Sistema

6.1. Nodos. Tipología y Arquitectura

Se han identificado dos tipologías de nodos en la red WSN: Nodo Central y Nodo Sensor. El Nodo Central está compuesto por la estación base radio, encargada de recopilar toda la información de la red y volcarla al sistema central de gestión, mientras que los Nodos Sensores son los que llevan integrados los diversos sensores encargados de medir los diferentes parámetros definidos en el entregable técnico 2.1 “Requerimientos del Sistema”.

En el apartado anterior “Etapa de captación” se ha descrito la etapa de adaptación HW necesaria para poder integrar cada uno de los sensores con la tecnología radio seleccionada para los nodos. Partiendo de este análisis, en los siguientes apartados se realiza una descripción de los componentes HW integrados en cada una de las tipologías de nodos de la red, para finalmente, ofrecer un esquema de la arquitectura HW de red del sistema.

6.1.1. Nodos Sensores

Los nodos sensores son los encargados de recabar información acerca del estado de los diferentes cultivos, por lo que estarán compuestos de un módulo radio inalámbrico (mote IRIS para exteriores, **EKO**, de la compañía estadounidense **MEMSIC** (anteriormente perteneciente a Crossbow Technologies)) junto con los diferentes sensores específicos según la zona específica del terreno:



Figura 17. Componentes del Nodo: estación EKO y sensores

6.1.2. Nodo Central – Pasarela de Comunicaciones WSN

El Nodo Central está compuesto por la **estación base WSN**, encargada de recopilar toda la información de la red, un **servidor con base de datos** para almacenamiento de las muestras recogidas, y una **conexión inalámbrica de largo alcance (3G/GPRS, WLAN, WMAN, etc.)** que permita volcar la información al sistema de gestión central.

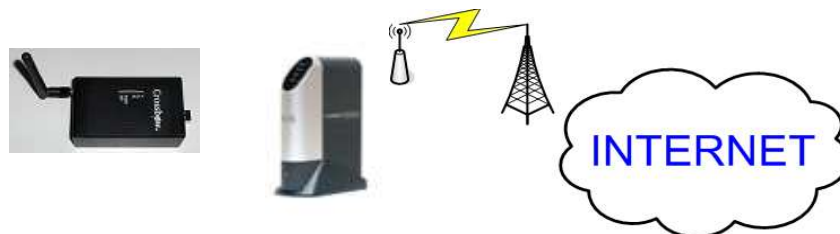


Figura 18. Nodo Central: estación base, servidor y conexión a Internet

6.1.3. Arquitectura Global del Sistema



Figura 19. Arquitectura Global del Sistema

6.2. RED. Topología y Encaminamiento

6.2.1. Diseño de Red Planteado

Partiendo de un análisis previo acerca de las principales características técnicas del estándar IEEE 802.15.4 y de los requerimientos del proyecto, se ha elaborado un diseño de red específico, el cual se describe a continuación.

6.2.2. Topología de Red y Encaminamiento

La topología que mejor se ajusta al escenario planteado es la de una red mallada, encargada de distribuir la información entre los distintos puntos de la explotación agraria. Esta red estaría compuesta por el coordinador central (Gateway o Nodo Central) y de routers encargados de liberar de carga de comunicación al nodo central y de mejorar la comunicación dentro de la explotación. Estos routers pueden ser además puntos de medida (nodos sensores), es decir, recopilan información de los sensores acoplados.

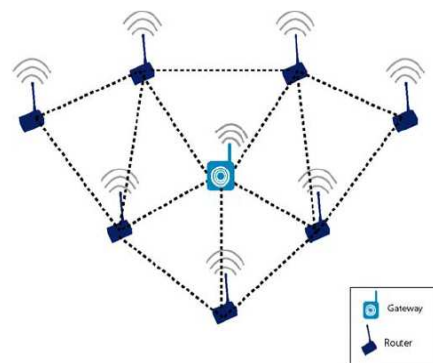


Figura 20. Topología en Malla

6.2.3. Tipos de Dispositivos

Según la topología establecida, se emplean los siguientes dispositivos definidos en el estándar:

- **Coordinador o Nodo Central:** es único en la red. Es el encargado de establecer la red inalámbrica y de coordinar a los demás nodos. Toda la información que circula en la red va a parar a este dispositivo, el cual estará conectado a un mini PC donde se procesarán y almacenarán los datos. Este es el único elemento de la red que debe permanecer siempre activo, ya que no puede permitir la pérdida de datos.
- **FFD (Full Function Device) o Nodo Sensor:** como su nombre indica es un dispositivo de función completa. Actúa como *router* en la red para reenviar la información y se le añade la capacidad de recogida de información, propia de los *nodos finales*.

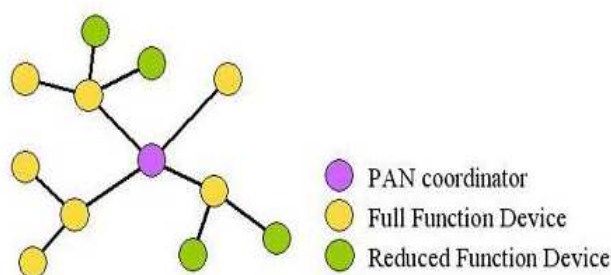


Figura 21. Tipos de Nodos según su Funcionalidad

6.2.4. Modo de Funcionamiento

En el estándar IEEE 802.15.4 se indican dos modos de funcionamiento, el modo beaconless y el modo beacon. En el caso de la red planteada, el modo de transmisión empleado sería el modo beacon, puesto que existe la figura de un coordinador central (Gateway o Nodo Central). Éste se encarga de transmitir beacons cada cierto tiempo para que el resto de nodos se puedan sincronizar, permitiendo en caso de necesidad una latencia mínima para aquellos dispositivos que necesiten tener este parámetro garantizado (transmisión con beacons y un tiempo de acceso garantizado). Como mecanismo de acceso al medio se utiliza CSMA-CA ranurado.

6.2.5. Metodología de Formación de la Red

En cuanto a la metodología de formación de red podemos ver que se mantiene una estructura similar a una red cluster-tree.

Un RFD (nodo sensor final) se conecta a una red cluster-tree como un dispositivo hoja al final de una rama puesto que los RFDs no permiten tener otros dispositivos asociados. Cualquiera de los FFDs (routers) puede actuar como un coordinador y proporcionar servicios de sincronización con otros dispositivos u otros coordinadores. Sólo uno de estos coordinadores puede ser el coordinador general, en este caso el nodo central WSN. Éste constituye el primer cluster eligiendo un identificador que no está siendo utilizado y transmitiendo tramas beacon de forma broadcast a todos sus vecinos (routers o nodos satélites). Un dispositivo que recibe una trama beacon podrá solicitar su unión a la red al coordinador. Si éste le permite unirse, añade al nuevo dispositivo como un hijo a su lista de vecinos. Posteriormente, el nuevo nodo añade al coordinador como nodo padre a su

lista de vecinos y comienza a transmitir beacons de forma periódica, de forma que otro nuevo dispositivo podrá unirse a la red a través de él. Si éste último no es capaz de unirlo a la red con el coordinador, el nuevo nodo deberá buscar otro nodo padre.

7. Líneas Futuras de Trabajo

Tal como se ha analizado la incorporación de sensores sin cables a estos cultivos exige disponer de numerosos nodos routers o pasarela para unir pequeñas redes entre sí o a Internet (**interoperabilidad de redes**). Si aplicamos el paradigma de internet de las cosas a este escenario, de manera que cada sensor sin cables sea un nodo conectado a Internet, el escenario es mucho más sencillo y viable (se facilita su gestión, desarrollo de servicios, escalabilidad,...). En este contexto las redes WSN son una de las tecnologías más prometedoras para hacer realidad el concepto de Internet de las Cosas, sin embargo las tecnologías disponibles en la actualidad presentan limitaciones importantes: los protocolos empleados (p.ej. Zigbee) no proporcionan la flexibilidad e interoperabilidad que demandan este tipo de redes. Esto hace que sea necesario emplear pasarelas específicas y complejas para comunicar las redes WSN con las redes convencionales (i.e. Internet).

La solución pasa por emplear IP como protocolo de red. La implementación de IP directamente en los nodos sensores ofrece varias ventajas muy útiles para muchas aplicaciones. Permite que cualquier dispositivo conectado a Internet se pueda comunicar directamente con un sensor específico, lo que puede proporcionar importantes facilidades de gestión y posibilidad de desarrollo de aplicaciones de nueva generación, además IP es el lenguaje común que cualquier dispositivo reconoce.

- Simplifica el modelo de conectividad. Evita el uso de complejas pasarelas necesarias para traducir protocolos propietarios, permitiendo el uso de simples routers o bridges, conocidos, desarrollados y basados en tecnologías ampliamente extendidas.
- Es posible emplear herramientas ya disponibles para el comisionado, configuración, gestión y debugging de estas redes, no es necesario desarrollar herramientas específicas basadas en protocolos y aplicaciones propietarias y las capacidades para utilizarlas
- Programadores y administradores no necesitarán aprender y desarrollar expertise en nuevos paradigmas de programación. La red está programada y funciona igual que otras aplicaciones Internet.
- Los desarrolladores de aplicaciones podrán acelerar el proceso de diseño y desarrollo ya que pueden hacer uso de estándares existentes. En lugar de tener que comenzar desde cero para crear un protocolo de gestión, será posible aprovechar SNMP (Simple Network Management Protocol) RFC1067, en lugar de inventar un nuevo mecanismo para el descubrimiento de servicios disponibles en la red local será posible emplear SLP (Service Location Protocol) RFC 2608. Hay un gran número de protocolos estándares que pueden ser aplicables tales como UDP, TCP, ICMP, DNS, and TFTP...
- Disponibilidad de muchos servicios de alto nivel tales como Balanceo de Carga, Caching, Firewalling, y Movilidad que podrían emplearse.

- Posibilidad de realizar mesh routing entre los nodos por encima de la capa IP en lugar de debajo

La problemática técnica descrita plantea diversos retos que se deben abordar desde la perspectiva global de un diseño basado en el concepto innovador de **“Web de los Cultivos”**:

- Redes de sensores inalámbricos. Herramienta flexible y robusta para la recogida y transmisión de la información
- Internet de los Cultivos, IP para nodos LoWPAN. Característica de conectividad IP a nivel de nodo, que permita interoperabilidad, flexibilidad y escalabilidad en los despliegues, superando las barreras descritas
- Arquitectura WOA y GIS, que permitan la integración y visualización de la información recogida haciendo realidad finalmente el concepto de Web de los cultivos a partir de una arquitectura de comunicaciones IP avanzada (a nivel de nodo sensor)

Se plantean por tanto las siguientes líneas futuras de I+D:

- **Conectividad IP a nivel de nodo (Internet de los Cultivos)**, implementación de conectividad IP en nodos LoWPAN (nodos IEEE 802.15.4 de la WSN), aportaría las siguientes ventajas:
 - Posibilidad de conexión directa a otras redes basadas en IP sin emplear complejas entidades intermediarias como proxies o pasarelas de traducción
 - Uso de infraestructura existente, aprovechando la naturaleza omnipresente/dominante de las redes IP
 - Aprovechar las ventajas de las tecnologías IP que ya existen, son bien conocidas, abiertas y libres, y con funcionalidad probada
 - Uso de las herramientas de gestión, diagnóstico, mantenimiento y comisionado de las redes IP

Soportar IPv6 sobre LoWPAN implica varios retos debido fundamentalmente a la longitud de los datagramas IP que no son soportados por nodos de recursos limitados como los IEEE 802.15.4. El **IETF 6LoWPAN working group** ha documentado todas las características en el RFC 4944 [22]. 6LoWPAN introduce una capa de adaptación, entre la capa de enlace y la de red, que permite realizar comunicaciones eficientes IPv6 sobre enlaces IEEE 802.15.4 LoWPAN. El formato define como llevar a cabo comunicaciones IPv6 sobre tramas 802.15.4 y especifica los elementos clave de la capa de adaptación: *Compresión de cabecera, Fragmentación y Reenvío de datagramas IPv6 sobre capa 2*. Esta capa IPv6 es la inmediatamente superior a LoWPAN, dentro de la arquitectura de protocolos del nodo. La capa IPv6 a desarrollar que describe 6LoWPAN de forma específica debe operar únicamente en los nodos de la red, pues está pensada en entornos de pocos recursos como el de las redes IEEE 802.15.4.

- **Accesibilidad Web a nivel de nodo (Web de los Cultivos)**, desarrollo de una interfaz de usuario basada en Web, concretamente en tecnologías WOA (Web

Oriented Architecture). El diseño del sistema deberá ser totalmente modular y altamente escalable de manera que se pueda afrontar un fuerte crecimiento en el número de fuentes de datos y en el volumen de información de las fuentes, permitiendo además el acceso a y desde bases de datos externas (administración, servicios de empresas consultoría agrícola, etc.). Asimismo, es muy interesante el desarrollo de un sistema GIS para visualizar y gestionar tanto la cartografía asociada a la zona de estudio como a cada uno de los datos asociados a dicha cartografía.

8. Conclusiones

En este artículo se han analizado los principales requisitos de comunicaciones y de captación a tener en cuenta a la hora de diseñar un sistema distribuido basado en redes de sensores sin cables (WSN) para aplicaciones de agricultura de precisión, especialmente teniendo en cuenta los requisitos de regiones minifundistas. Se han presentado el diseño y la arquitectura realizados, empleando un juego básico de sensores típico en estas aplicaciones y la tecnología IRIS de la empresa MEMSIC, detallando aspectos de integración de sensores con esta tecnología, así como topología y encaminamiento de red escogidos.

Finalmente se ha analizado la idoneidad de una arquitectura IP a nivel de nodo inalámbrico para el ámbito de la agricultura de precisión en minifundios, concluyendo el interés de abordar un proyecto de I+D para el desarrollo del concepto de “Web de los Cultivos”.

9. Agradecimientos y Financiación

El presente trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto SWAP, “Sistema de Telemetría basado en redes WSN para Agricultura de Precisión en Galicia” liderado por la Organización Profesional Agraria Xóvenes Agricultores-ASAJA GALICIA (financiado por la Secretaría Xeral de Modernización e Innovación Tecnolóxica de la Xunta de Galicia, 2010).



10. Referencias

- [1] 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
- [2] P. Haneveld. Evading murphy: A sensor network deployment in precision agriculture. O teu-Delft, Xuño 2007. Disponible en:<http://www.st.ewi.tudelft.nl/~koen>
- [3] J. Panchar, 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
- [4] MD609 GPRS DTU,<http://www.etungtech.com.cn/zdcp/md609g.asp>

- [5] H. Liu, Z. Meng, e S. Cui. A wireless sensor network prototype for environmental monitoring in greenhouses. In International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, págs. 2344 {2347, September 2007
- [6] Matese, A., Di Gennaro, S.F., Zaldei, A., Genesisio, L., Vaccari, F.P., (2009), "A wireless sensor network for precision viticulture: the NAV system", Computers and Electronics in Agriculture, 69, p. 51-58.
- [7] Morais, R., Fernandes, M.A., Matos, S.G., Serôdio, C.(2008), " A ZigBee multi powered wireless acquisition device for realcume sensing applications in precision viticulture", Computers and Electronics in Agriculture,62, p. 94-106.
- [8] A. Baggio. Wireless sensor networks in precision agriculture. In Proceedings of the Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks (REALWSN'05), Xuño 2005.
- [9] R. Beckwith, D. Teibel, e P. Bowen. Report from the eld: results from an agricultural wireless sensor network. In 29 th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks, págs. 471 {478, November 2004
- [10] P. Haneveld. Evading murphy: A sensor network deployment in precision agriculture. O teu-Delft, Xuño 2007. Disponible en:<http://www.st.ewi.tudelft.nl/~koen>.
- [11] N. Wang, N. Zhang, e M. Wang. Wireless sensors in agriculture and food industry { recent development and future perspective. Computers and Electronics in Agriculture, 50 (1): 1 {14, Xaneiro 2006.
- [12] Y. Wang, L. Huang, J. Wu, e H. Xu. Wireless sensor networks for intensive irrigated agriculture. In IEEE 4th Consumer Communications and Networking Conference, págs. 197 {201, January 2007.
- [13] Propuesta de aplicación de redes de sensores en el modelado de cultivos protegidos y en campo, 2008, en el marco del Proyecto D2ARS "Diseño y Desarrollo de Redes de Sensores". CYTED
- [14] T. Guzm_an y F. Araya. Aplicaciones basadas en redes y sensores. Comunicado sobre desarrollo de proyectos. Escuela de Agronom__a, ITCR, Octubre 2007.
- [15] MEMSIC - <http://www.memsic.com/>
- [16] L.C. distribuídas.<http://www.libelium.com/>
- [17] Crossbow Technologies,<http://www.xbow.com/>
- [18] DECAGON Devices - <http://www.decagon.com/>
- [19] WATERMARK Sensors - <http://www.irrometer.com/sensors.html#wm>
- [20] Sensirion - <http://www.sensirion.com/>
- [21] DAVIS Instruments - <http://www.davisnet.com/>
- [22] IETF 6LoWPAN: <http://www.ietf.org/rfc/rfc4944.txt>