

DEVELOPMENT OF A WIRELESS SENSOR NETWORK TO LANDSLIDE MONITORING

Combados Hernández, G.¹; García Garijo, A.¹; Antoñanzas Torres, F.¹;
Alonso García, E.¹; Fernández Martínez, R.²

¹ Universidad de la Rioja, ² Universidad del País Vasco

Predicting possible landslides near human infrastructures is vital to avoid possible damages, either personal or material. This work has carried out a control in real time of the movements in a slope, to monitor its situation and predict future landslides. In order to get this goal a wireless sensor network based in nodes called "Imote 2" is used. Its main function is to measure the land inclination at all times. The whole network, composed by wireless nodes and inclinometers, allows monitoring the slope area with a fault tolerance system which is an energy autonomous system based in solar panels and power source batteries. This system gathers the information every 15 minutes by a star topology network which sends the information to a central station to store it. This system makes a diachronic analysis of the slope situation: it establishes possible ground side movements and detects surface faults in areas hard to get to. This whole system is autonomous and scalable, new nodes can be installed within the network without having to modify the whole configuration.

Keywords: *Wireless sensor network; Imote2; Landslide; Inclinometer; Alert system*

DESARROLLO DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES PARA LA MONITORIZACIÓN DE TALUDES

Predecir deslizamientos y movimientos en taludes cercanos a infraestructuras realizadas por el ser humano es de vital importancia para evitar posibles daños personales y materiales. En este trabajo se ha realizado un control en tiempo real de los movimientos en un talud, para así monitorizar su situación y predecir futuros desprendimientos. Para ello se ha utilizado una red inalámbrica de sensores basada en nodos "Imote2". Su función es medir la inclinación del terreno en todo momento. El conjunto, formado por nodos inalámbricos e inclinómetros, permite monitorizar toda la extensión del talud mediante un sistema tolerante a fallos que se alimenta de forma autónoma a través de placas solares y baterías de alimentación. La instalación desarrollada recoge la información cada 15 minutos y mediante una topología en estrella envía los datos a una estación central donde es almacenada en una base de datos de forma local. Este sistema permite realizar un análisis diacrónico de la situación del talud, tanto de la inclinación como de desplazamientos laterales, y detectar superficies de falla en terrenos de difícil acceso. Todo este sistema es autónomo y escalable, nuevos nodos pueden instalarse dentro de la red sin modificar su configuración.

Palabras clave: *Red inalámbrica de sensores; Imote2; Talud; Inclinómetro; Sistema de alertas*

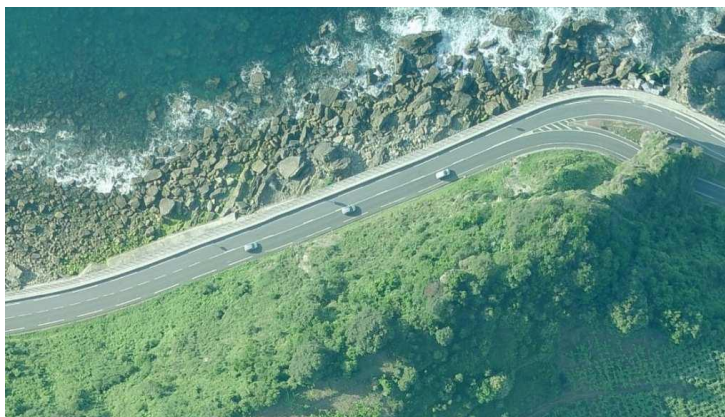
Correspondencia: eduardo.alonsogga@unirioja.es

1. Introducción

Los desprendimientos en taludes, sobre todo en zonas con altas inclemencias meteorológicas, suponen un peligro constante para el ser humano y las infraestructuras construidas. Para solucionar este problema, es necesario tener un control en todo momento de los lugares donde hay más probabilidad de desprendimientos, como por ejemplo taludes compuestos por rocas de fácil erosión por el agua o lugares donde existen gran variedad de fenómenos meteorológicos a lo largo del año (agua, nieve, deshielo, viento etc...).

En la carretera N-634 situada al norte de España en la provincia de Vizcaya, concretamente entre Getaria y Zarautz, existe un importante riesgo de desprendimiento (Diario Vasco, 2006; Diario Vasco, 2008; Diario Vasco, 2009; Diario Vasco, 2011). La carretera circula entre la ladera norte de la Cordillera Cantábrica y el Mar Cantábrico. Esta situación hace que el clima de la zona sea bastante inestable, con abundantes lluvias en primavera y otoño, fuertes nevadas en invierno y altos porcentajes de humedad durante todo el año. La estructura y estratificación del suelo está formada por rocas calizas alternando con areniscas y pizarras negras. Estos materiales son especialmente sensibles a la erosión originada por el agua y la nieve. Debido a esto y a la inclinación de las capas rocosas, los desprendimientos provenientes de las montañas son bastante frecuentes sobre todo en épocas lluviosas. El tramo de carretera en cuestión tiene una longitud de 9 kilómetros aproximadamente, pero el estudio únicamente se centra alrededor del kilómetro 22, en torno a un túnel entre Getaria y Zarautz. (Figura 1). La longitud total del talud es de 100 metros, con una superficie aproximada de 22.25 hectáreas.

Figura 1: Vista aérea del Km 22 de la carretera N-634.



El 6 de Diciembre de 2008 en este mismo punto hubo un gran desprendimiento que hizo que la carretera estuviera cerrada durante varios días. Los periódicos locales recogieron la noticia, y como se puede ver en la Figura 2 los daños fueron importantes.

Actualmente, se dispone de múltiples formas de medición de taludes que van desde las más antiguas como puede ser un detector de agrietamientos formado por dos tablas de madera, hasta los actuales sensores inclinómetros que son capaces de medir la inclinación vertical en varios ejes. Otro de los problemas que surgen es la monitorización en tiempo real, ya que al ser imprevisibles es necesario saber el estado del talud en cada momento. La solución más eficaz es la disposición de una red de sensores, capaces de situar diferentes puntos o nodos que puedan comunicarse entre sí y llevar a cabo un control constante de la situación.

Si se unen estas dos soluciones el resultado es una red inalámbrica de sensores capaz de medir la inclinación del terreno mediante inclinómetros (Hu *et al.*, 2012; Yu *et al.*, 2012).

Figura 2: Desprendimiento producido en el punto de trabajo.



2. Objetivos

El objetivo de este estudio es desarrollar un sistema capaz de poder monitorizar un talud con alto riesgo de desprendimiento. Para ello se dispone de una red de sensores inalámbrica, funcionando en tiempo real y con la autonomía suficiente para que no haga falta intervención humana en largos periodos de tiempo.

Dentro de la red inalámbrica de sensores, las tareas que realiza el sistema son:

- Recoger datos de diferentes puntos de la superficie a medir y ponerlos en común en una base de datos.
- Tener una fuente de energía sostenible, capaz de generar energía de forma autónoma y así durar largos periodos de tiempo.
- Reducir costes tanto en instalación como en mantenimiento.
- Comunicarse a largas distancias.

3. Materiales y metodología

3.1. Inclínómetro.

El modelo LCF196 es un sensor de inclinación de doble eje empaquetado en una carcasa de 22mm de diámetro de acero inoxidable lo que le proporciona gran robustez que lo hace apropiado para condiciones adversas (Figura 3). Existen tres modelos diferentes, dependiendo de su ángulo de inclinación máximo: 14.5°, 30° y 90°. En este caso el utilizado es el de 14.5°. Su rango de acción es bipolar, es decir mide la inclinación tanto negativa como positiva. El funcionamiento de este sensor consiste en que la tensión de salida es un valor lineal equivalente entre +5 voltios y -5 voltios dependiendo de su ángulo de inclinación, siendo cero voltios su posición inicial que es de forma vertical. A partir de ± 5 voltios el sensor sigue incrementando su tensión, pero el fabricante no asegura la linealidad de esos valores.

3.2. Red inalámbrica de sensores.

Una red de sensores inalámbrica es un conjunto de pequeños dispositivos llamados nodos equipados con sensores (Akyildiz *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2006; Peres *et al.*, 2011). Estos son capaces de comunicarse entre sí por medio de protocolos de comunicación inalámbrica para así poder monitorizar la información de una forma rápida y sencilla. Las principales características que tiene la red de sensores inalámbrica son su bajo consumo y su adaptación al terreno. La red tiene dos tipos de nodos diferentes:

Figura 3: Inclínómetro LCF196.



- **Nodo central o puerta de enlace:** Es el encargado de recibir todos los datos de la red de sensores para almacenarlo en una base de datos, además de ser la puerta de enlace con el mundo exterior, pudiendo así enviar los datos vía internet.
- **Nodos sensores o emisores:** Son los que están situados en los puntos críticos del talud tomando medidas durante determinados periodos de tiempo para posteriormente enviarlos al nodo central. Estos nodos son completamente autónomos.

La topología usada es de tipo estrella debido a que aun siendo una topología simple, se adapta perfectamente a la necesidad existente. Esta consiste en que los nodos emisores, equipados con sensores, se disponen alrededor del nodo central o puerta de enlace, el cual almacena en una base de datos toda la información recogida por el sistema. La puerta de enlace es la pieza clave en este tipo de topología, ya que gestiona todos los datos provenientes de los nodos emisores. Una vez organizados estos datos, se envía la información al exterior para poder monitorizar los datos recibidos mediante un ordenador conectado en tiempo real a la puerta de enlace y con conexión a internet. El sistema es recurrente a fallos en cualquiera de sus nodos emisores que ante un problema no perjudican al resto, por el contrario, si el fallo existe en el nodo central, el sistema deja de funcionar totalmente y la información no es almacenada.

3.3. Protocolo de comunicación.

El protocolo usado es ZigBee (IEEE std. 802.15.4, 2002; IEEE std. 802.15.4, 2006). Este tiene varias ventajas con respecto a otros protocolos de comunicaciones inalámbricas como puede ser Bluetooth.

En la Tabla 1 se pueden ver las diferencias más características existentes entre Bluetooth y ZigBee. Además de estos datos, cabe destacar que el funcionamiento de Bluetooth consiste en una comunicación permanente haciendo que la mayoría del tiempo esté activo, mientras que ZigBee después de hacer su envío entra automáticamente en estado de reposo hasta el próximo envío.

Tabla 1: Comparación ZigBee vs Bluetooth

	ZigBee	Bluetooth
Consumo transmitiendo	30 mA	40 mA
Consumo en reposo	0.3 μ A	0.2 mA
Velocidad de transferencia	250 Kbps	3 Mbps
Distancia máxima	75 m	10 m
Número máximo de nodos	65353	8

3.4. Imote2

Uno de los nodos con mejores características que existen en el mercado para ser usados con este protocolo es Imote2 (Figura 4). Es un nodo avanzado para redes de sensores inalámbricas desarrollado por Memsic. Su diseño está basado en una CPU de bajo consumo PXA271 XScale de Intel, pudiendo operar a muy bajos niveles de tensión (0.85 voltios) y baja frecuencia (13MHz). Lleva integrado una antena de radio lo que le permite hacer

comunicaciones mediante el estándar IEEE802.15.4/ZigBee. Su diseño está pensado para obtener un bajo consumo, altas prestaciones en poco espacio y una gran versatilidad.

Gracias a sus placas de expansión sus posibilidades aumentan en gran medida. Otra de sus grandes ventajas es la posibilidad de instalarle un sistema operativo, pudiendo así diseñar aplicaciones de una manera más sencilla. Su diseño es modular y ampliable, con diferentes conectores para sus placas de expansión.

Figura 4: Imote2.



3.5. Placa alimentación de dispositivos y adaptadora de señal

Cada uno de los nodos sensores debe llevar un circuito adicional de adaptación de señal con su correspondiente parte de potencia, además de la conversión necesaria para alimentar cada uno de los dispositivos (inclinómetro y Imote2). Esto es debido a que los rangos de medida del inclinómetro ($\pm 5V$) no coinciden con los rangos de entrada del ADC del Imote2 (0-3V). Se ha realizado un pequeño diseño capaz de convertir esa tensión de salida del inclinómetro al ADC del Imote2. El resultado se muestra en la Figura 5.

Figura 5: Placa alimentación de dispositivos y adaptadora de señal.



La conversión final viene dada por la Ecuación (1).

$$V_{ADC} = 0.3 \cdot (V_{sensor} + 5) \text{ V} \quad (1)$$

De esta forma la tensión obtenida es capaz de ser leída por el ADC perdiendo el mínimo de resolución.

3.6. Fuente de alimentación.

El diseño de la fuente de alimentación es una parte importante, ya que define la autonomía del sistema sin intervención humana (Nallusamy y Duraiswamy, 2011). Las estimaciones globales de cada uno de los nodos viene dada por la Tabla 2.

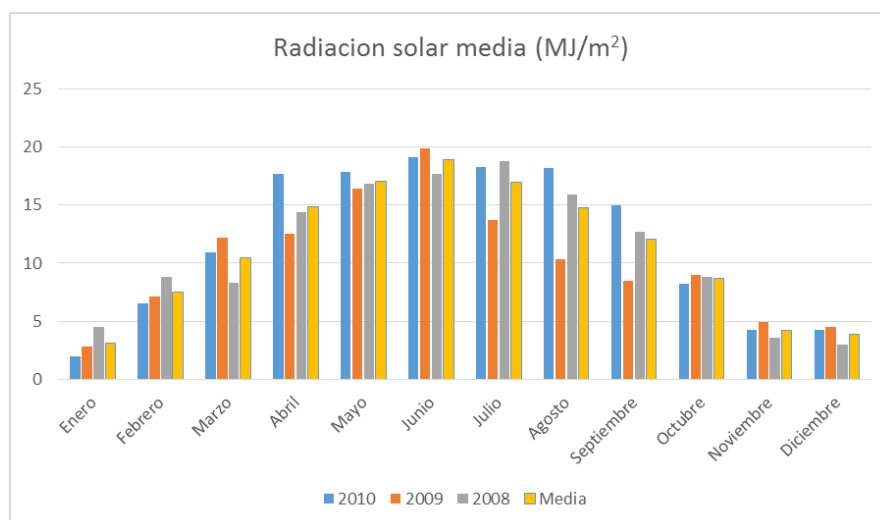
Tabla 2: Características de consumo de cada nodo sensor.

Características	Valores
Tensión de trabajo	12 V
Corriente media	0.165 A
Potencia nominal	1.98 W
Tiempo de uso diario	24 h
Demanda de corriente diaria	3.96 Ah
Demanda de energía diaria	47.52 W

Para abastecer esta necesidad, se ha optado por el montaje de una placa solar de dimensiones reducidas, lo que le otorga un aumento considerable de autonomía con respecto a si únicamente hubiera baterías (Falk *et al.*, 2006).

Previamente, se hace un análisis de radiación solar en la zona donde se va a implantar la red inalámbrica de sensores. En la ciudad de Zarautz existe una estación meteorológica que lleva registrando datos desde hace varios años. Los datos que se han obtenido se pueden observar en la Figura 6.

Figura 6: Radiación solar en Zarautz durante los últimos años.



Se observa que en meses de invierno la radiación solar es menor que en verano, pero se puede realizar una estimación anual para prever la energía obtenida por el sol y el momento en que se debe realizar un cambio de baterías. El resultado obtenido es que la placa solar debe obtener al menos 27W de potencia. Se ha optado por un panel solar de 30W, suficiente para abastecer a cada nodo y a su vez con unas dimensiones reducidas lo que supone un impacto ambiental mínimo.

3.7. Software

Imote2 puede funcionar bajo diferentes sistemas operativos, pero en este caso se ha optado por Linux, debido a su versatilidad y simplicidad en programación ya que usa el lenguaje C. El modo de programación es similar al que se realiza en un ordenador, con la única diferencia de que hace falta un compilador especial debido a la arquitectura del Imote2.

Se pueden diferenciar cuatro procesos diferentes en cuanto a la manipulación de datos se refiere: adquisición, envío, recepción y registro.

- **Adquisición:** el proceso mediante el cual, a través de un ADC (convertor Analógico-Digital) los valores obtenidos por el sensor son captados por el nodo inalámbrico. Es necesario saber la relación existente entre el valor digital recogido y su correspondiente ángulo de inclinación. Este viene dado por la Ecuación 2, donde D es el valor recogido.

$$\text{Ángulo} = 7.08 \cdot 10^{-2} \cdot D - 14.5^{\circ} \quad (2)$$

- **Envío:** La acción que realiza el nodo sensor para transmitir los datos a la puerta de enlace o nodo central.
- **Recepción:** Realizado por la puerta de enlace. Este se mantiene a la escucha para recibir datos enviados por los nodos sensores.

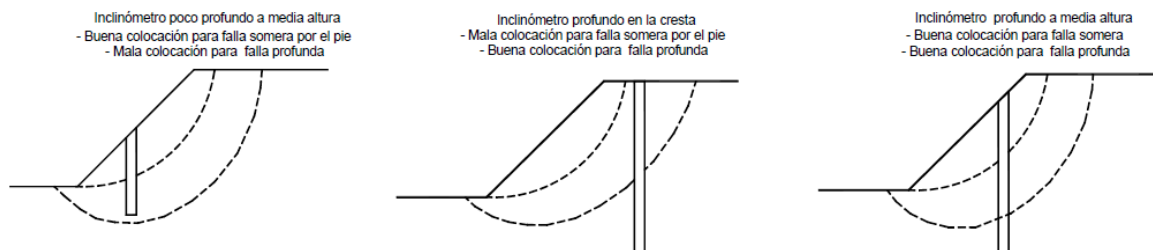
- Registro: Se realiza en la puerta de enlace. Los datos recibidos son convertidos a valores legibles y almacenados para su posterior interpretación, además de estar a la espera de una posible petición para envío de datos a un ordenador.

3.8. Colocación correcta de los nodos

Con los dos tipos de nodos diseñados, solo queda la implementación de cada uno de ellos en su lugar exacto. La situación es la siguiente (Suarez, 1998):

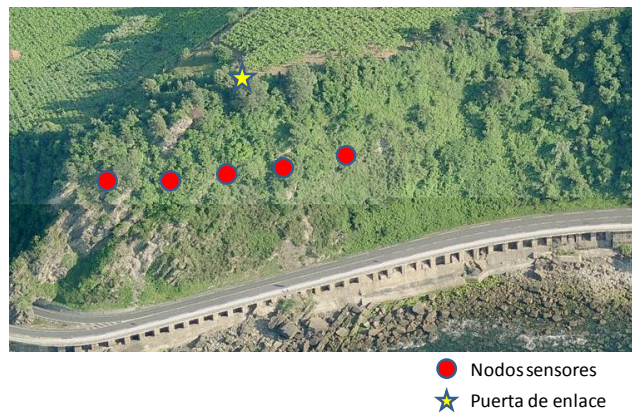
- Altura media entre la carretera y el punto más alto del talud. Es importante la buena colocación ya que si no, no se obtendría una medición correcta (Figura 7).

Figura 7: Comparación de situación la perforación en un talud.



- 20 metros de distancia entre cada punto de medición. La longitud a medir es de aproximadamente 100 metros por tanto se disponen los nodos de forma equidistante (Figura 8).

Figura 8: Situación de cada uno de los nodos.



4. Resultados

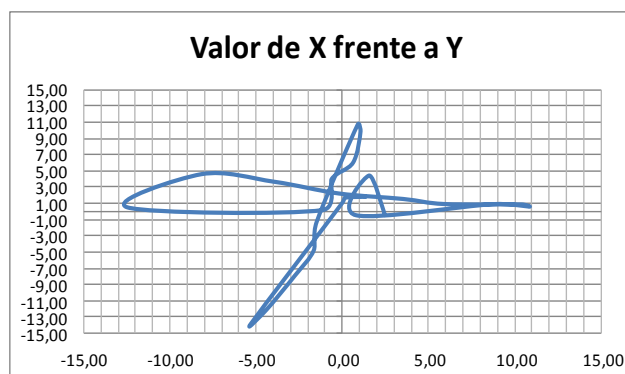
El sistema no se ha llegado a montar en la zona de estudio, pero los ensayos en el laboratorio son satisfactorios. El envío y recepción entre puerta de enlace y un nodo sensor funciona correctamente y las medidas registradas coinciden con las inclinaciones realizadas por el inclinómetro (Figura 9).

El sistema de alimentación suministra energía a los dispositivos que miden la inclinación en cada localización y los nodos inalámbricos encargados de la transmisión. La información recogida es tratada para adecuar la señal al nodo inalámbrico, y este procesa la señal y la distribuye por la red inalámbricamente sin pérdida de paquetes. La puerta de enlace recoge la información que es mandada por el resto de los nodos y la envía a una estación base donde es almacenada.

La información almacenada en la base de datos muestra la inclinación de los dos ejes, la hora y fecha de lectura de la señal, y el identificador del nodo que mando la señal. Esta información almacenada permite monitorizar la red, y en futuros trabajos formará parte de un sistema de aviso de desprendimiento que ayudará a las autoridades a prevenir posibles accidentes en la zona.

Figura 9: Datos y gráficas de los valores obtenidos en laboratorio

04/04/2012	12:04:10	2,48492	-0,44620
04/04/2012	12:04:14	2,46368	-0,43912
04/04/2012	12:04:18	2,47076	-0,41788
04/04/2012	12:04:22	1,56452	4,41068
04/04/2012	12:04:26	0,79280	-0,46744
04/04/2012	12:04:31	8,73656	0,89192
04/04/2012	12:04:35	10,87472	0,58748
04/04/2012	12:04:39	10,40744	0,85652
04/04/2012	12:04:43	5,93288	0,90608
04/04/2012	12:04:48	3,53276	1,52912
04/04/2012	12:04:52	-0,21256	2,20880
04/04/2012	12:04:56	-3,96496	3,65312
04/04/2012	12:05:00	-8,17756	4,58060
04/04/2012	12:05:05	-12,46096	0,49544
04/04/2012	12:05:09	-1,16128	0,15560
04/04/2012	12:05:13	-0,62320	3,96464
04/04/2012	12:05:17	0,62996	6,01784
04/04/2012	12:05:21	1,06184	9,85520
04/04/2012	12:05:26	0,89900	10,70480
04/04/2012	12:05:30	-1,48696	-1,29580
04/04/2012	12:05:34	-1,64980	-4,76500
04/04/2012	12:05:38	-2,76136	-7,92976
04/04/2012	12:05:43	-4,39684	-12,09988
04/04/2012	12:05:47	-5,32432	-13,89112
04/04/2012	12:05:51	-0,01432	1,00520
04/04/2012	12:05:55	0,14852	1,67780
04/04/2012	12:06:00	1,35212	1,80524



5. Conclusiones

Las redes de sensores inalámbricas y los dispositivos analizados presentan un gran potencial, ya que son completamente portables a todo tipo de situaciones donde se requiere una medición de la inclinación en diferentes puntos cercanos de un terreno, como puede suceder en diferentes tipos de infraestructuras o donde se requiera medición de actividad sísmica.

Al ser una de sus características la fácil instalación y la adaptabilidad al medio, permiten adecuarse a terrenos donde redes cableadas no pueden instalarse, o el coste de instalación dispara el coste de la operación. Además es posible aumentar el número de nodos de medición dentro de la red sin necesidad de reprogramar el sistema ni acceder a los nodos ya instalados, lo que permite posibles ampliaciones del sistema a un bajo coste.

Conjuntando todo esto con las pruebas realizadas en este trabajo sobre el funcionamiento en la comunicación y la alimentación a través de energías que permiten la autonomía del nodo, se observa que esta tecnología permite monitorizar localizaciones complejas con gran precisión y con un coste reducido de inversión.

6. Referencias

- Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks* 38 (4), 393-422.
- Diario Vasco [en línea] (2006, 12 Diciembre). Desprendimiento en la ladera del monte en la N-634. Diario Vasco: Zarautz. Disponible en internet: <http://www.diariovasco.com/prensa/20061212/costauroa/desprendimiento-ladera-monte_20061212.html>
- Diario Vasco [en línea] (2008, 8 Abril). Un derrumbe cierra la carretera de la costa en Getaria [en línea]. ALDAZ, Arantxa. San Sebastián: El Diario Vasco. Disponible en internet: <<http://www.diariovasco.com/20081206/al-dia-local/derrumbe-cierra-carretera-costa-20081206.html>>
- Diario Vasco [en línea] (2009, 10 Noviembre). Cortada la N-634 en Zarautz por un desprendimiento. Europa Press. San Sebastián: Diario Vasco. Disponible en Internet: <<http://www.diariovasco.com/20091110/local/cortada-zarautz-desprendimiento-200911101856.html>>
- Diario Vasco [en línea] (2011, 6 Noviembre). Un desprendimiento de tierra causado por la lluvia obliga a cortar la N-634 entre Zarautz y Getaria. Europa Press. Bilbao: 20 Minutos. Disponible en internet: <<http://www.20minutos.es/noticia/1210867/0/>>
- Falk, A, Dürschener, C., & Remmers, K.H. (2006). Capítulo 3. Proyecto de sistemas aislados. *Fotovoltaica para Profesionales*. 1ª ed. Sevilla. PROGENSA, 214-235.
- Hu, C., Zhang, S., Xu, S., & Xu, B. (2012). Distributed landslide monitoring by wireless sensor nodes. *Advanced Materials Research*, 594-597, 1069-1073.
- IEEE std. 802.15.4 (2006). Standard for Local and metropolitan area networks. Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). IEEE 802.15.4-2006. Nueva York, EEUU: IEEE, 2006.
- IEEE std. 802.15.4 (2002). Standard for Telecommunications and Information Exchange Between Systems - LAN/MAN - Specific Requirements. Part 15: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs). IEEE 802.15.1-2002. Nueva York, EEUU: IEEE, 2002.
- Nallusamy, R., & Duraiswamy, K. (2011). Solar powered wireless sensor networks for environmental applications with energy efficient routing concepts: A review. *Information Technology Journal*, 10 (1), 1-10.
- Peres, E., Fernandes, M.A., Morais, R., Cunha, C.R., López, J.A., Matos, S.R., Ferreira, P.J.S.G., & Reis, M.J.C.S. (2011). An autonomous intelligent gateway infrastructure for in-field processing in precision viticulture. *Computers and Electronics in Agriculture* 78 (2), 176-187.
- Suarez, J. (1988). Capítulo 12, Instrumentación y Monitoreo. *Deslizamientos: Análisis geotécnico*. Bucaramanga, Colombia: Ingeniería de Suelos Ltda.
- Wang, N., Zhang, N., & Wang, M. (2006). Wireless sensors in agriculture and food industry - Recent development and future perspective. *Computers and Electronics in Agriculture* 50 (1), 1-14.
- Yu, Z., Xu, S., Zhang, S., & Yang, X. (2012). Distributed detection in landslide prediction based on Wireless Sensor Networks. *World Automation Congress Proceedings*, 6321086.