



TESIS DOCTORAL

**DISEÑO Y ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE MONITORIZACIÓN Y  
CARTOGRAFÍA DE LA TEMPERATURA COMO VARIABLE  
AMBIENTAL EN ZONAS DE RELIEVE COMPLEJO**

**MIGUEL ÁNGEL MARTÍN TARDÍO**

---

DEPARTAMENTO DE EXPRESIÓN GRÁFICA

2017





TESIS DOCTORAL

**DISEÑO Y ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE MONITORIZACIÓN Y  
CARTOGRAFÍA DE LA TEMPERATURA COMO VARIABLE  
AMBIENTAL EN ZONAS DE RELIEVE COMPLEJO**

**MIGUEL ÁNGEL MARTÍN TARDÍO**

---

DEPARTAMENTO DE EXPRESIÓN GRÁFICA

DIRECTOR: ÁNGEL MANUEL FELICÍSIMO PÉREZ

2017

*A Eu por su imprescindible apoyo y  
comprensión durante todo este tiempo.  
A mi hijo Fran, sin el cual habría terminado  
esta tesis dos años antes.  
Y a mis padres, que confiaron en mi y me  
dieron en su día la oportunidad  
de llegar hasta aquí.*

## **Agradecimientos**

A mi director, por brindarme esta oportunidad y por darme tu confianza desde el primer momento para la realización de esta tesis, por tu inestimable ayuda y por aportarme esa visión “asturiana” tan tranquilizadora en los momentos más complicados. *Muchas gracias, Ángel.*

También quiero acordarme de Miguel Macías Macías que, de una forma totalmente desinteresada, me facilitó el uso de herramientas y materiales de sus propios proyectos que fueron fundamentales para avanzar en el desarrollo de una de las partes de este trabajo de investigación. Sin esa ayuda, desarrollar esa parte se hubiese puesto aún más cuesta arriba.

Al Instituto Universitario de Investigación de la Dehesa de la UEx (INDEHESA) por permitirme el uso de su laboratorio en el campus de Badajoz, en el cual desarrollé parte de la tesis facilitándome en gran medida la conciliación entre vida laboral, investigación y vida familiar.

Por último, acordarme de todas aquellas personas que en algún momento durante estos cinco años me han manifestado su apoyo, o se han preocupado por mi en lo referente a esta tesis.



# Resumen

La cartografía climática está siendo ampliamente utilizada en estudios ambientales de conservación, de la biodiversidad y el cambio climático. Pero los métodos convencionales basados en estaciones meteorológicas sólo son capaces de generar cartografía de baja resolución, habitualmente del orden de 5-10 km. Sin embargo, muchos de esos estudios requieren una resolución espacial mayor, del orden de centenas o incluso decenas de metros. En España, la reducción significativa del número de estaciones meteorológicas ha provocado la necesidad de buscar alternativas para la elaboración de este tipo de cartografía precisa. En esta tesis se desarrollan dos métodos novedosos de seguimiento de la temperatura atendiendo especialmente a su implementación en terrenos de relieve complejo, donde la diversidad microclimática queda sin definir en la metodología habitual de medida y cartografía debido a la escasa resolución espacial de los datos y métodos usados. Así, el problema se abordará desde dos perspectivas: por un lado, con una nueva metodología de diseño para el despliegue de una red inalámbrica de sensores (WSN) adaptada a la diversidad microclimática del terreno para la toma de datos *in situ*; y por otro, el desarrollo y validación de un nuevo método de reducción de escala (*downscaling*) que combina datos históricos, variables topográficas y modelos geométricos de exposición a la radiación solar para afinar la resolución espacial de mapas climáticos de temperaturas.





# Índice de contenido

<b>Capítulo 1</b> .....	<b>1</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1. Contexto .....	2
1.2. Objetivos .....	4
1.3. Desarrollo .....	5
1.4. Estructura .....	8
<b>Capítulo 2</b> .....	<b>9</b>
<b>Resumen general</b> .....	<b>9</b>
Artículo 1: Diseño de una WSN para el muestreo de la variabilidad ambiental en terrenos complejos. ....	10
Artículo 2: Error, repetibilidad e incertidumbre de los sensores digitales de temperatura de bajo coste para la vigilancia medioambiental. ....	13
Artículo 3: Método de reducción de escala de mapas de temperaturas basado en sombreado analítico para su uso en modelos de distribución de especies.....	16
<b>Capítulo 3</b> .....	<b>21</b>
<b>Artículos completos</b> .....	<b>21</b>
3.1. Artículo 1.....	22
1. <i>Introduction</i> .....	23
2. <i>Some Considerations on the Design of an Environmental WSN</i> ...	24
3. <i>Material and Data</i> .....	26
4. <i>Methods</i> .....	27
5. <i>Results</i> .....	35
6. <i>Conclusions and Future Work</i> .....	39
3.2. Artículo 2.....	42
1. <i>Introduction</i> .....	43
2. <i>Materials</i> .....	45
3. <i>Methodology</i> .....	49
4. <i>Results and discussion</i> .....	51
5. <i>Conclusions</i> .....	55
3.3. Artículo 3.....	57
1. <i>Introduction</i> .....	58
2. <i>Material and methods</i> .....	60
3. <i>Results</i> .....	64
4. <i>Testing the maps</i> .....	69
5. <i>Conclusions and discussion</i> .....	71

<b>Capítulo 4</b> .....	<b>73</b>
<b>Discusión de resultados</b> .....	<b>73</b>
4.1. Artículo 1.....	74
4.2. Artículo 2.....	80
4.3. Artículo 3.....	88
<b>Capítulo 5</b> .....	<b>97</b>
<b>Conclusiones</b> .....	<b>97</b>
<b>Capítulo 6</b> .....	<b>103</b>
<b>Trabajo futuro</b> .....	<b>103</b>
<b>Referencias</b> .....	<b>107</b>





# Capítulo 1

---

## Introducción

## 1.1. Contexto

La cartografía climática está siendo ampliamente utilizada para estudios ambientales de conservación, estudios de la biodiversidad y también para el cambio climático (Alam & Starr, 2013; Holon et al., 2015; Lam, Qiang, Arenas, Brito, & Liu, 2015; J. Li & Sheng, 2012; Lobo & Rebollar, 2010; Pellissier et al., 2012; Seoane, Viñuela, Díaz-Delgado, & Bustamante, 2003). Pero los métodos convencionales basados en estaciones meteorológicas sólo son capaces de generar cartografía de baja resolución, habitualmente del orden de 5-10 km. Sin embargo, muchos de esos estudios requieren una resolución espacial mejor, de centenas o incluso decenas de metros como, por ejemplo, los relacionados con la conservación de especies animales y plantas en hábitats ligados a condiciones microclimáticas.

La elaboración de cartografía climática para un área determinada se ha venido realizando a partir de estaciones meteorológicas terrestres dispersas y aplicando posteriormente métodos de interpolación: a partir de un conjunto de datos puntuales proporcionado por estas estaciones se estiman los valores correspondientes a otros lugares incluidos en un dominio espacial determinado. Existe una amplia bibliografía relativa tanto a los métodos de interpolación climática, como a la elaboración de cartografía mediante la aplicación de los mismos. Para los primeros destacan trabajos como los incluidos en

(Dubois, Malczewski, & De Cort, 1998) dedicados a los métodos de interpolación espacial. Respecto a los segundos, se han desarrollado trabajos para el estudio de la variabilidad de las precipitaciones (Bigg, 1991; Dingman, Seely-Reynolds, & Reynolds, 1988; Anatoly A. Saveliev, Mucharamova, & Piliugin, 1998), la estimación de temperaturas (Fred C. Collins & Bolstad, 1996; Lennon & Turner, 1995; Ninyerola, Pons, & Roure, 2000), la radiación solar (Fernández Cepedal & Felicísimo, 1987) o el análisis climático relacionado con la distribución de especies vegetales (Hutchinson, 1991a; Ninyerola, 2000). Otro ejemplo es el conjunto de datos climáticos conocido como Worldclim, que está elaborado a partir de miles de estaciones (Hijmans, Cameron, Parra, Jones, & Jarvis, 2005) y es ampliamente utilizado para proporcionar las variables independientes necesarias para el modelado predictivo en un contexto ecológico (Bedia, Herrera, & Gutiérrez, 2013; Mateo, de la Estrella, Felicísimo, Muñoz, & Guisan, 2013).

Sin embargo, existen dificultades importantes para la aplicación de estos métodos debido principalmente a la propia naturaleza de los datos. Frecuentemente, las series de datos son heterogéneas en calidad, longitud y período cubierto, la distribución espacial de las estaciones no es la idónea y las propias variables suelen mostrar una variabilidad temporal muy notable. Estos problemas son más significativos, aún si cabe, en

áreas montañosas donde la heterogeneidad espacial es muy alta debido a las diferentes exposiciones a la radiación solar, las sombras topográficas y donde la presencia de estaciones meteorológicas es más escasa (Felicísimo Pérez, Morán López, Sánchez Guzmán, & Pérez Mayo, 2001). Por estos motivos, los estudios ambientales que requieren el análisis de condiciones climáticas detalladas con resolución de decenas de metros necesitan métodos diferentes capaces de reflejar los microclimas condicionados por la topografía local (Wang, Zhang, Quan, & Dong, 2013).

## **1.2. Objetivos**

En esta tesis se desarrollan dos métodos de control y seguimiento de la temperatura atendiendo especialmente a su implementación en terrenos de relieve complejo, donde la diversidad microclimática queda sin definir en la metodología habitual de medida y cartografía debido a la escasa resolución espacial de los datos y métodos usados. Así, el problema se abordará de dos maneras: 1) mediante el diseño y despliegue de redes inalámbricas de sensores (WSNs) con una configuración idónea y adaptada a la diversidad microclimática del terreno, y 2) el desarrollo y validación de un nuevo método de reducción de escala (*downscaling*) (Hatfield, 2001) que combina datos históricos, variables topográficas y modelos geométricos de exposición a la radiación solar para afinar la resolución espacial



de mapas climáticos de temperaturas. En este contexto, los objetivos específicos de esta tesis son:

1. Desarrollar un método de diseño de redes inalámbricas de sensores (WSNs) adaptado para monitorización climática en terrenos complejos que garantice la correcta representación de la variabilidad térmica, usando el menor número de nodos posibles que asegure la redundancia necesaria para proporcionar estabilidad y robustez a la red.
2. Analizar la calidad de diferentes modelos de sensores de temperatura con salida digital de bajo coste para valorar su idoneidad de uso en las redes mencionadas en el objetivo anterior, con especial énfasis en la exactitud, repetibilidad e incertidumbre de las medidas.
3. Diseñar, aplicar y validar un método de *downscaling* para los mapas de temperaturas clásicos basado en modelos geométricos de radiación incidente, que permita mejorar la resolución desde valores de 1-2 kilómetros hasta otros de centenas o decenas de metros.

### **1.3. Desarrollo**

La tesis se ha desarrollado cronológicamente según el orden establecido por los objetivos anteriores. La primera parte ha consistido en explorar las posibilidades que la tecnología WSN

ofrece en el contexto de la monitorización medioambiental. Concretamente, el trabajo se ha centrado en utilizar esta tecnología como una fuente de datos para el seguimiento climático de zonas geográficas de relieve complejo. Para ello, se ha desarrollado una metodología de diseño de la red para cubrir el rango de variabilidad de temperaturas presente en un área de estudio, minimizando el equipamiento necesario y proporcionando una redundancia suficiente al sistema. La idea de usar este tipo de redes surgió por la experiencia previa del autor de esta tesis en el estudio de esta tecnología durante el desarrollo de un trabajo fin de máster (Martin Tardio, 2010).

La segunda parte de la tesis surgió como una consecuencia lógica de la anterior. Si se tiene en cuenta que los mapas climáticos de temperaturas deben servir para estudiar la relación causa-efecto de las condiciones microclimáticas sobre una determinada área, y que la misma puede verse afectada por variaciones entre 1 ó 2 décimas de grados Celsius, es fundamental disponer de instrumentos de medida (en este caso, sensores de temperatura) con una exactitud y resolución adecuada. En los últimos años han aparecido en el mercado multitud de componentes electrónicos de bajo coste como placas base, microcontroladores y sensores de todo tipo relacionados con las WSNs. Estas tecnologías se han visto impulsadas por lo que se denomina en la actualidad el “Internet de las Cosas” (IoT) (Atzori, Iera, & Morabito, 2010), el renacido movimiento

“hágalo usted mismo” (DIY) y el uso de “hardware libre y abierto” (FOSS) (Pearce, 2012). Por tanto, la elección concreta del tipo y modelo de sensor de temperatura más adecuado no parece una tarea trivial, no sólo por los numerosos modelos y fabricantes disponibles, sino también por una falta de información técnica independiente de los propios fabricantes respecto al rendimiento de estos dispositivos.

En cuanto a la tercera parte, contiene el desarrollo de la idea original que motivó la realización de esta tesis, pues en ese momento se disponía de una primera propuesta del modelo de *downscaling* realizada por el director de estos trabajos de investigación. Ha consistido en la elaboración de un modelo teórico-práctico de afinamiento de mapas climáticos usando una técnica de reducción de escala basada en datos históricos de temperatura de la zona, la topografía local del terreno y la energía solar incidente sobre la superficie terrestre. Así, estaba previsto contrastar la validez de este nuevo método a partir de imágenes tomadas desde satélites e *in situ* mediante una cámara térmica, y también comparar la información obtenida por el modelo para un área de estudio con medidas usando una WSN desplegada siguiendo la metodología propuesta en la primera parte de la tesis. Sin embargo, en el momento de escribir esta memoria, la fase de validación mediante el despliegue de una red WSN no está asegurada que pueda realizarse próximamente. Aunque se dispone de la financiación correspondiente para la

adquisición del equipamiento necesario a través de un proyecto concedido a INDEHESA (Instituto de Investigación de la Dehesa de la UEx) a través de la convocatoria nacional de ayudas a infraestructuras y equipamiento científico-técnico 2015, el proceso administrativo de presentación de ofertas aún no se ha puesto en marcha. No obstante, este trabajo ya está diseñado tal y como se describe en el apartado final de este documento.

## **1.4. Estructura**

Esta tesis se organiza como compendio de publicaciones, en concreto tres artículos relacionados con la temática de estudio que proporcionan coherencia a la misma. A continuación, se incluye un resumen general donde se describe brevemente el contenido de cada uno de los artículos. Y seguidamente, por orden cronológico, se incluye una copia completa de los trabajos publicados o pendientes de publicación. Después, una discusión de los resultados proporcionados por esos trabajos de investigación, para continuar con las conclusiones obtenidas. Por último, se encuentra el apartado de trabajo futuro y las referencias bibliográficas, tanto las incluidas en los apartados de este documento, como las utilizadas en cada una de los tres artículos.

# Capítulo 2

---

## Resumen general

## **Artículo 1: Diseño de una WSN para el muestreo de la variabilidad ambiental en terrenos complejos.**

Título original: Design of a WSN for the Sampling of Environmental Variability in Complex Terrain.

El artículo comienza revisando cómo la tecnología de redes inalámbricas de sensores (WSNs) se ha generalizado para la medida de parámetros medioambientales *in situ* en los últimos años (Hart & Martinez, 2006; Oliveira & Rodrigues, 2011). Una WSN es una red de comunicación sin cables, auto-organizada y compuesta de un gran número de nodos de sensores que interactúan con el mundo físico (Akyildiz, Su, Sankarasubramaniam, & Cayirci, 2002), (Buratti, Conti, Dardari, & Verdone, 2009). Este aumento del interés en la aplicación de las WSNs para la investigación de las ciencias ambientales ya se ponía de manifiesto en (Porter et al., 2005). Ese artículo contenía un estudio de 52 trabajos elegidos al azar de la revista *Ecology*, para justificar cómo la mayoría de los muestreos en entornos medioambientales se llevaban a cabo en áreas reducidas o consistían en la toma de muestras poco frecuentes o de una sola vez. Por ello se afirmaba que las WSNs cubrirían áreas en las que el muestreo continuo del espacio-tiempo no era posible o, simplemente, no se realizaba. Esto ayudaría a los investigadores a comprender mejor la variabilidad espacial y temporal de los procesos biológicos y ambientales. Una gran cantidad de escenarios de aplicación de las WSNs en

entorno medioambientales pueden encontrarse en (Hart & Martinez, 2006; Oliveira & Rodrigues, 2011).

Por tanto, a priori, esta tecnología cuenta posiblemente con el potencial necesario para ser aplicada al afinamiento de mapas climáticos. Sin embargo, conseguir un diseño optimizado de la WSN para un área de estudio independientemente de la complejidad del terreno se planteaba como un reto importante. La razón principal es que tradicionalmente los nodos de una WSN se han desplegado en el terreno de una manera no planificada. Por tanto, para que el diseño de la red se considerase óptimo para el propósito descrito anteriormente, se establecieron los siguientes objetivos de diseño: 1) ajustarse al área de estudio, 2) cubrir el rango de variabilidad ambiental (temperatura) presente en dicha área, 3) estar formada por el mínimo número de nodos y, 4) cumplir las condiciones técnicas de conectividad para garantizar la disponibilidad de los datos. De esta forma, el diseño optimizado de una WSN ajustada al área de estudio proporcionaría un aumento de la eficacia y calidad de la información, sin redundancia excesiva de las medidas y sin microclimas no representados. También supondría un ahorro económico en la instrumentación empleada y en el mantenimiento del propio sistema, por ejemplo, respecto al uso de estaciones meteorológicas y *dataloggers*.

La metodología propuesta para el diseño optimizado de la red consta de cuatro fases secuenciales y ejecutadas en el siguiente orden: 1) modelización de la irradiancia potencial (Kumar, Skidmore, & Knowles, 1997), 2) definición de las clases homogéneas de temperatura aplicando la técnica de análisis ISODATA (Ball & Hall, 1965), 3) determinación de los nodos candidatos para la red a partir de las relaciones de intervisibilidad calculadas mediante el algoritmo de línea de visión (LOS) y, 4) optimización del diseño de red en base al conocido “problema del conjunto de cobertura” (Vazirani, 2003) de la investigación de operaciones y resuelto mediante programación lineal entera binaria (PEB) (Yick, Bharathidasan, Pasternack, Mukherjee, & Ghosal, 2004; Yick, Mukherjee, & Ghosal, 2008). Para validar su correcto funcionamiento, esta metodología se aplicó mediante simulación a una zona con relieve complejo, montañosa, en el norte de España con dimensiones de 9645 x 6690 m, un tamaño de píxel de 5 m y una elevación en el rango de 15 a 750 m.



## **Artículo 2: Error, repetibilidad e incertidumbre de los sensores digitales de temperatura de bajo coste para la vigilancia medioambiental.**

Título original: Error, repeatability and uncertainty of low-cost temperature digital sensors for environmental surveillance.

Las técnicas de medida de la temperatura son muy diversas y su elección condiciona los parámetros básicos de la calidad en metrología: exactitud (magnitud del error), precisión (cifras significativas en la medida) y repetibilidad (estabilidad de las medidas), a los que hay que añadir el coste económico y mantenimiento del sistema. Actualmente, destacan entre estos sistemas los sensores de temperatura con salida digital por su uso extendido, que se está traduciendo en una mayor variedad y un menor coste de los mismos. Sin embargo, ante el empuje de este tipo de sensores, no proliferan en la literatura científica trabajos que evalúen y comparen su funcionamiento. La disponibilidad de estos análisis independientes permitiría conocer si estos sensores podrían sustituir a elementos de coste más elevado y mantenimiento más complejo como los empleados en las redes de vigilancia ambiental. Los objetivos concretos de este trabajo fueron 1) diseñar un banco de pruebas calibrado y, 2) evaluar el comportamiento de este tipo de sensores, comprobando la exactitud, precisión y repetibilidad de los modelos específicos DHT22 (Aosong Electronics Co., 2014), DS18B20 (Maxim Integrated, 2015) y TMP102 (Texas

Instruments, 2014). La elección de estos tres modelos se basó en los siguientes criterios: 1) menor coste por unidad, 2) error (declarado por el fabricante) bajo en el rango de temperaturas entre  $-15\sim 50$  °C y, 3) mayor resolución de bits en la salida de datos.

Los primeros tipos de sensores de temperatura que se desarrollaron estaban dotados con salida analógica. Este tipo de sensores, tales como termistores, termopares y resistencias dependientes de la temperatura (RTD) (Martínez Bohórquez, Andújar Márquez, & Enrique Gómez, 2014) han sido muy usados por *dataloggers* y estaciones meteorológicas. Sin embargo, en comparación con los primeros, los sensores de temperatura con salida digital ofrecen una mayor precisión (hasta 0.01 °C), inmunidad al ruido, escalabilidad, bajo coste y facilidad de conexión con unidades microcontroladoras (MCU) con muy bajo acondicionamiento, permitiendo su rápida integración con las plataformas de WSNs. Sin embargo, entre sus inconvenientes están que no pueden ser utilizados en el exterior sin un encapsulamiento adecuado y no admiten una calibración externa (los parámetros vienen ajustados de fábrica).

El banco de pruebas desarrollado constaba de una cubeta termostática de acero inoxidable rellena con 5 l de etilenglicol al 30% (JP Selecta, 2015). La temperatura del fluido se regulaba mediante un termostato de inmersión SBS TI-07 (SBS, 2015), que constaba a su vez de un sensor de temperatura de referencia

tipo RTD (Pt100) que declaraba una estabilidad garantizada a 100 °C de  $\pm 0.05$  °C. El sistema de captura de datos adjunto se diseñó para cumplir dos objetivos: 1) almacenar las medidas de los sensores de temperatura de forma automática y, 2) tener un bajo coste de implementación frente a otras soluciones comerciales (National Instruments, 2010). Para ello, se emplearon dos placas Arduino UNO redundantes con los sensores conectados a distintas E/S digitales. Las pruebas de laboratorio consistieron en capturar series completas de temperaturas en un rango entre  $-15\sim 50$  °C, comenzando por enfriar el fluido por debajo de  $-15$  °C y pasándolo a continuación a la cubeta con todos los sensores sumergidos simultáneamente. El sistema registraba las lecturas de los sensores con una frecuencia de muestreo de 1 min. Primero, el fluido se dejaba calentar pasivamente hasta alcanzar la temperatura ambiente, y a partir de ese momento se utilizaba el termostato para subir la temperatura progresivamente hasta los 50 °C, con un incremento de unos 0.5 °C/min. Las medidas de los sensores eran enviadas a un ordenador de forma coordinada a través del puerto USB, que añadía automáticamente una marca de tiempo a cada medida y compilaba toda la serie en un único fichero de texto CSV para su posterior análisis.

### **Artículo 3: Método de reducción de escala de mapas de temperaturas basado en sombreado analítico para su uso en modelos de distribución de especies.**

Título original: A method of downscaling temperature maps based on analytical hillshading for using in species distribution modelling.

La cartografía climática se ha generado tradicionalmente mediante la interpolación de datos de estaciones meteorológicas. La resolución espacial que se puede esperar no supera 1 km en el mejor de los casos y con frecuencia se limitan a 10 km o más. Sin embargo, producir mapas climáticos de alta resolución (decenas de metros) sería muy recomendable para estudios locales o de microhábitats relacionados, por ejemplo, con el cambio climático y la distribución de especies (Meineri & Hylander, 2016). En España, una reducción significativa del número de estaciones meteorológicas (Felicísimo, Muñoz, Villalba, & Mateo, 2011) ha provocado la necesidad de buscar alternativas para la elaboración de este tipo de cartografía precisa. El enfoque más común ha sido el uso de procedimientos de reducción de escala, que intentan utilizar información conocida a gran escala para estimar los valores correspondientes a escala más detallada. Los dos enfoques principales para reducir la escala de los datos climáticos son el dinámico y el estadístico (Benestad, Hanssen-Bauer, & Chen, 2008; Trzaska & Schnarr, 2014); y bajo ellos se han publicado procedimientos basados en probabilidades (Caillouet, Vidal, Sauquet, & Graff,

2016), en redes neuronales (Coulibaly, Dibike, & Anctil, 2005) o en máquinas de soporte vectorial (Duhan & Pandey, 2015) entre otras.

El objetivo de este trabajo ha sido diseñar un método de reducción de escala o *downscaling* de los mapas de temperaturas siguiendo un enfoque estadístico. Este método emplea como predictor una variable sintética denominada índice topográfico ( $\tau$ ), cuyos valores indican cuánto debe modificarse la temperatura de cada celda del mapa original en función de su exposición a la radiación solar. Las principales ventajas son que no necesita datos externos aparte del modelo digital de elevaciones (MDE), se adapta a una determinada época del año y es especialmente adecuado para zonas montañosas de relieve complejo. Aunque la topografía se ha empleado anteriormente en métodos de reducción de escala (Feidas et al., 2014; Fridley, 2009; Landgraf, Matulla, & Haimberger, 2015; Slavich, Warton, Ashcroft, Gollan, & Ramp, 2014), no ha sido utilizada de la forma propuesta en este trabajo.

Este método comienza estimando la irradiación solar potencial (directa y difusa) para cada celda MDE (25 m), calculando la trayectoria solar sobre el horizonte para estimar a su vez la exposición del terreno a la energía solar. Para ello se usan las ecuaciones de Kumar (Kumar et al., 1997) que fueron

programadas por N. E. Zimmermann en lenguaje AML<sup>1</sup>. El siguiente paso es la estimación del índice topográfico ( $\tau$ ) de la radiación solar previamente estimada, a partir de la ley de Stefan-Boltzmann que relaciona la energía  $E$  radiada por unidad de superficie y la temperatura absoluta  $T$  de la superficie como  $E = \sigma \cdot T^4$ , siendo  $\sigma$  la constante de Stefan-Boltzmann. En este paso del procedimiento es necesario aplicar los índices topográficos ( $\tau$ ) a los mapas de temperaturas. Como estos mapas tienen una resolución espacial de 1 km, es necesario reducir el tamaño de celda a 25 m para que sea compatible con las cuadrículas de índice topográfico. Este procedimiento se realiza mediante interpolaciones mediante *splines*, y el resultado es un conjunto de mapas de temperaturas con la misma información, pero sin pixelación y con transiciones continuas entre celdas. El último paso es multiplicar los dos conjuntos de mapas, temperaturas y los índices topográficos, para cada mes obteniendo los mapas de temperaturas de escala reducida. Como ejemplo de aplicación, se ha reducido de escala un conjunto de 24 mapas mensuales de temperaturas (12 de máx. y 12 de mín.) desde un tamaño de celda de 1 km a otro 25 m en una zona del Valle del Jerte (Extremadura). Esta zona se caracteriza por una gran heterogeneidad de los patrones de temperaturas locales

---

<sup>1</sup> Lenguaje de Macro ARC o lenguaje algorítmico de alto nivel patentado para generar aplicaciones en ArcInfo. ArcInfo es la herramienta de Sistema de Información Geográfica empleada para aplicar el método de reducción de escala a la muestra.

debido a una topografía accidentada y amplias diferencias de exposiciones a la radiación solar y sombreado.





# Capítulo 3

---

## Artículos completos

## 3.1. Artículo 1

### Design of a WSN for the Sampling of Environmental Variability in Complex Terrain

*Miguel A. Martín-Tardío and Ángel M. Felicísimo*

**Abstract:** In-situ environmental parameter measurements using sensor systems connected to a wireless network have become widespread, but the problem of monitoring large and mountainous areas by means of a wireless sensor network (WSN) is not well resolved. The main reasons for this are: (1) the environmental variability distribution is unknown in the field; (2) without this knowledge, a huge number of sensors would be necessary to ensure the complete coverage of the environmental variability and (3) WSN design requirements, for example, effective connectivity (intervisibility), limiting distances and controlled redundancy, are usually solved by trial and error. Using temperature as the target environmental variable, we propose: (1) a method to determine the homogeneous environmental classes to be sampled using the digital elevation model (DEM) and geometric simulations and (2) a procedure to determine an effective WSN design in complex terrain in terms of the number of sensors, redundancy, cost and spatial distribution. The proposed methodology, based on geographic information systems and binary integer programming can be easily adapted to a wide range of applications that need exhaustive and continuous environmental monitoring with high spatial resolution. The results show that the WSN design is perfectly suited to the topography and the technical specifications of the sensors, and provides a complete coverage of the environmental variability in terms of Sun exposure. However, these results still need be validated in the field and the proposed procedure must be refined.

Keywords: wireless sensor network; geographic information systems; binary integer programming; environmental monitoring; watershed analysis; network optimization.

---

## 1. Introduction

Climate mapping is required for numerous environmental studies, but methods based on weather stations have limitations in terms of low spatial resolution and unsuitable spatial distribution of the weather stations. The common procedure interpolates the data using splines, kriging or other methods (F. C. Collins & Bolstad, 1996; Hutchinson, 1991a, 1991b; Ninyerola et al., 2000; A. A. Saveliev, Mucharamova, & Piliugin, 1998). A well-known climatic dataset is Worldclim, elaborated from thousands of stations (Hijmans et al., 2005) and widely used, for example, to provide the independent variables in predictive ecological modelling (Bedia et al., 2013; Mateo et al., 2013).

The real spatial resolution of climatic datasets is on the order of 5–25 km or more. This makes them useful only for coarse scale studies. However, many studies require spatial resolutions of tens of metres or less; for example, if the habitat of animals or plants closely linked to microclimate conditions must be modelled. The problem is very important in mountainous areas, where spatial heterogeneity is very high due to the different exposures to solar radiation and topographic shadows.

One of the ways to complete climate data is to place temperature and radiation sensors on the ground. In this context, a wireless sensor network (WSN) is a self-organized wireless communication network composed of a large number of sensor nodes interacting with the physical world (Akyildiz et al., 2002).

In recent years, *in-situ* environmental parameter measurements using sensor systems connected to a wireless network have become widespread (Antoine-Santoni, Santucci, de Gentili, Silvani, & Morandini, 2009; Ayday & Safak, 2009; Baggio, 2005; Barrenetxea et al., 2008; Britton & Sacks, 2004; Cano, Lopez-Baeza, Anon, Reig, & Millan-Scheding, 2007; Cardell-Oliver, Kranz, Smettem, & Mayer, 2005; Choi, Kim, Cha, & Ha, 2009; Corke et al., 2010; Delin et al., 2005; Hakala, Tikkakoski, & Kivela, 2008; Hart & Martinez, 2006; Kotamäki et al., 2009; Larios et al., 2013; M. Li &

Liu, 2009; X. Li, Cheng, Yan, & Gong, 2010; López et al., 2010; Martinez, Riddoch, Hart, & Ong, 2006; O'Flynn et al., 2007; Oliveira & Rodrigues, 2011; Polastre, Szewczyk, Mainwaring, Culler, & Anderson, 2004; Porter et al., 2005; Seders, Shea, Lemmon, Maurice, & Talley, 2007; Tolle et al., 2005; Werner-Allen & Lorincz, 2006). This increased interest in the application of WSNs for environmental science research has already been highlighted in (Porter et al., 2005), but the problem of monitoring large and topographically complex (mountainous) areas by means of WSNs is not well resolved.

There are several reasons for this: (1) the environmental variability is unknown in the field; (2) without this knowledge, a huge number of sensors would be necessary to ensure complete coverage of the environmental variability and (3) WSN design requirements, for example, effective connectivity (intervisibility), limiting distances and redundancy, are usually solved by trial and error.

Using temperature as the target environmental variable, we propose: (1) a method of determining the homogeneous environmental classes to be sampled using the digital elevation model (DEM) and geometric simulations and (2) a method to determine an effective WSN design in complex terrain in terms of the number of sensors, redundancy, cost and spatial distribution. The proposed methodology can be easily adapted to a wide range of applications that need environmental monitoring.

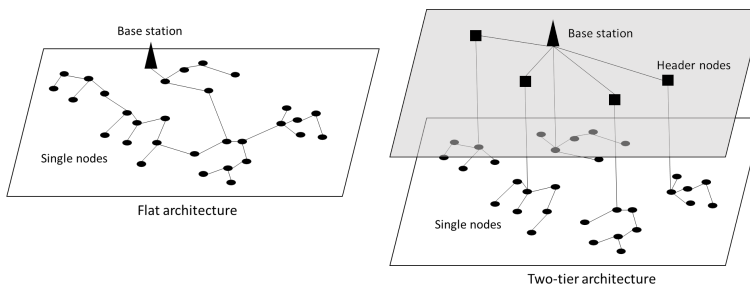
Therefore, the specific objectives are to define of homogeneous classes to be sampled, to select the candidate area for each class with sensor and to optimize network design based on the physical constraints that guarantee coverage of environmental variability.

## **2. Some Considerations on the Design of an Environmental WSN**

From the literature review we found that in complex terrains WSNs are deployed intuitively without specific analysis of the location of each sensor

node. Since WSNs work best with the nodes organized and interconnected in a hierarchical clustering schema (Abbasi & Younis, 2007; Yick et al., 2004; Younis & Akkaya, 2008), the design of a WSN must take into account at least two criteria: (1) the role of the nodes in the network (network architecture) and (2) the diffusion characteristics of wireless signals between nodes (coverage and interconnectivity) (Baronti, Pillai, & Chook, 2007; Marks, 2010).

Regarding network architecture, we propose a hierarchical two-level tree topology (two-tier architecture, Figure 1). The first level consists of single nodes (SNs) grouped into clusters where each SN is able to communicate directly or indirectly and with a unique header node (HN). Communications are established over short or moderate distances.



**Figure 1.** Flat architecture vs. two-tier architecture.

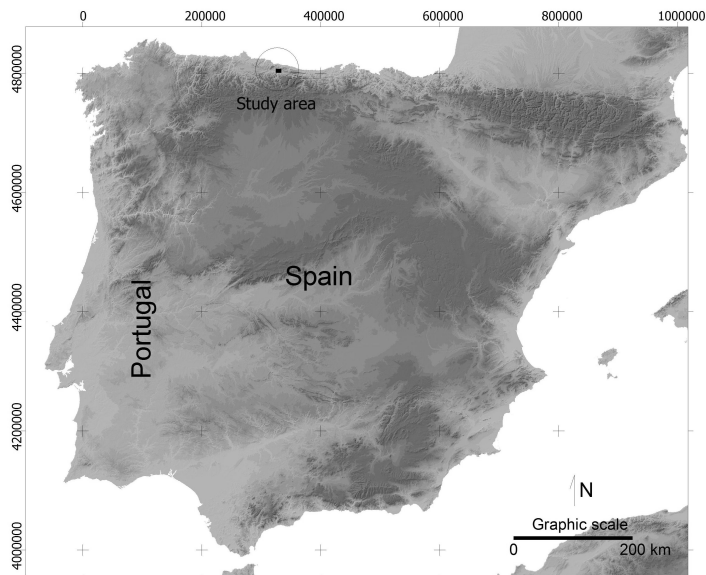
At the second level, the HNs must communicate with a base station (BS) that can be one of them or a complementary device. The distances can be significantly longer in this case and it may be required that the nodes are able to communicate with the BS through radio links or mobile telephony networks (GSM/GPRS). Finally, the BS serves to periodically send all information of the nodes to a remote processing system, also via radio or GSM/GPRS. The optimization of the WSN includes two objectives: (1) to use only the necessary nodes (both SN and HN) and (2) to ensure coverage/sampling of the environmental variability.

Obviously, fewer nodes involve lower cost, energy saving and easier maintenance (Akyildiz et al., 2002). Using a two-tier architecture helps to reduce the number of nodes involved in data transmission over long distances with a BS (Yick et al., 2004).

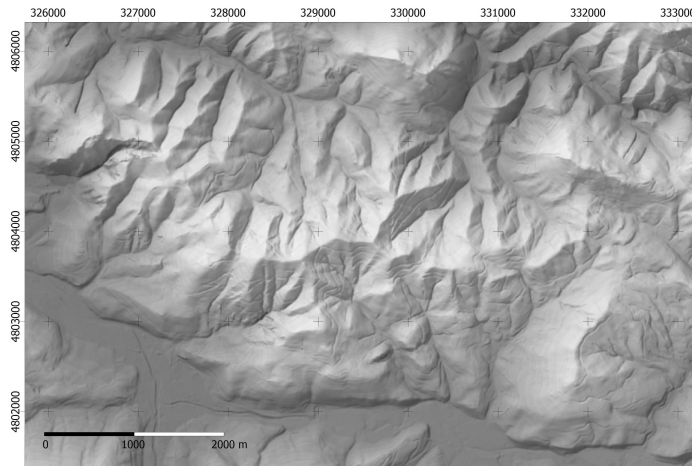
### 3. Material and Data

#### 3.1. Digital Elevation Model (DEM)

The proposed methodology has been applied to a mountainous area in northern Spain with dimensions  $9645 \times 6690$  m (Figures 2 and 3) and pixel size of 5 m. Elevation is in the range 15–750 m. The DEM proceeds from LIDAR data and the estimated accuracy is better than  $\pm 1$  m. The lower left corner of the area has XY coordinates 324,400 and 4,800,500 (Datum WGS, projection UTM, zone 30N).



**Figure 2.** Study area in northern Spain (Asturias).



**Figure 3.** Hill-shaded DEM of the study area (9645 × 6690 m, 5 m spatial resolution).

### 3.2. Software

The geographic information systems (GISs) ArcInfo and ArcView (ESRI Inc., Redlands, CA, US) have been used for map analysis, including the tasks of modelling the solar irradiance, terrain classification, intervisibility analysis and representative areas selection. The LINGO tool (Cunningham & Schrage, 2013) has been used to build and solve optimization models based on integer linear programming (ILP) that determines a suitable set of candidate nodes satisfying the design objectives.

## 4. Methods

The proposed methodology is carried out in four steps: (1) modelling the potential irradiance; (2) defining and mapping homogeneous classes; (3) selecting the network nodes and (4) optimizing the network topology.

### 4.1. Modelling the Potential Irradiance

The main variable driving the surface temperature of a topographically complex area is solar radiation. The current temperature maps may include the influence of elevation using estimated temperature gradients, but they do

not consider the angle of exposure to solar beams and the topographic hill-shade. Consequently, the local variations due to relief are lost. The relief influence can be estimated by means of simulating the Sun's trajectory and its incidence angle over each cell in the DEM (Kumar et al., 1997). For this objective we have used Zimmermann's `shortwavg.aml` routine (Zimmermann & Kienast, 1999). The routine uses the latitude of the study zone and the solar declination to calculate the Sun's azimuth and zenith angles for given hourly values. Daily values are estimated by integrating the hourly value intervals and local shadows are taken into account if they occur.

In this work, solar radiation has been estimated for the average day of each month. The result is a set of 12 monthly irradiance models ( $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ ) that represent the variation in solar radiation exposure throughout the year with a 5 m spatial resolution.

#### 4.2. Mapping Homogeneous Classes

With elevation and solar radiation being the main causes of local variations in environmental conditions, we undertook an analysis to define and delimit a set of homogeneous classes, taking into account all solar radiation maps and the DEM.

The method uses the iterative self-organizing data analysis technique algorithm (ISODATA) (Ball & Hall, 1965) widely used in the unsupervised classification of satellite images, terrain landforms and pattern recognition. ISODATA is a well-known algorithm based on an iterative procedure that reclassifies the pixels (cells in this case) until an optimal classification of a predefined number of classes is achieved. As result, the terrain is tessellated in areas with maximum internal (intra-area) homogeneity and maximum external (inter-area) heterogeneity covering all the solar radiation variation in the study area.

We used the 12 solar radiation maps to perform the ISODATA classification. The only parameter to be defined was the number of classes to



be separated by the algorithm. Since we intend to conduct a field trial in the future, we chose a total of 20 classes to keep the number of sensors within a reasonable limit, but this number can be changed depending on available resources. As expected, a lot of areas his assigned to each class (more than 25 in all the classes). The following step is to select only a sample of these areas as candidates to contain a sensor node.

#### 4.3. Preselecting Candidate Areas and Nodes within Classes

The result of the previous step is a map of polygons where each element is assigned to a class from 1 to 20. Usually, each class has many polygon areas that can be used as candidate areas to carry a sensor. The areas have been filtered by selecting the 20 larger polygon areas for each class. This criterion is used to reduce the magnitude of the subsequent analysis but also to select areas with significant extensions. Smaller areas are discarded to facilitate the placement of sensor nodes in the field avoiding errors. The result is a set of approximately 400 candidate polygons to represent the 20 homogeneous classes. As the potential location of a sensor, a node is placed automatically in the centroid of each polygon.

#### 4.4. Testing Connectivity

Two nodes cannot connect to each other if the terrain breaks the line of sight (LOS). Therefore, each LOS between each pair of nodes must be “labelled” with a value of intervisibility: true or false. This analysis was undertaken with standard GIS tools taking into account not only the relief but also the limiting angles, both horizontal and vertical, and distance. The values of these factors depend on the characteristics of the selected model. We chose a device whose characteristics are shown in Table 1.

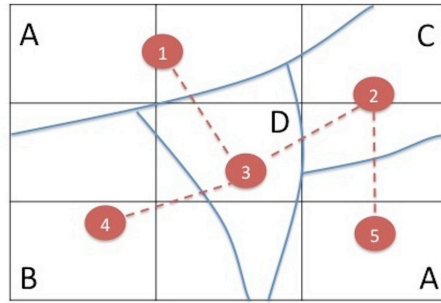
**Table 1.** Summary of the technical features of sensor nodes and header nodes.

Protocol	IEEE802.15.4/ZigBee-Pro
Antenna	Dipole 5 dBi
Frequency	2.40–2.48 GHz
Power TX	50 mW
Max. distance	5000 m
Horizontal angle	0–360°
Vertical angle	±15°

Since the antennas are omnidirectional, a valid horizontal angle includes the full range 0–360° but the vertical angle is restricted to  $\pm 15^\circ$  relative to the horizontal. The maximum connectivity distance included in the visibility analysis is 5000 m. Distance has a strong influence on energy expenditure and, therefore, on the lifetime of the network (Akyildiz et al., 2002). Finally, two statistics are calculated for each node: the number of intervisibility connections and the mean distance to visible neighbours.

The analysis taking into account the node location, relief, valid angles and maximum distance generates a  $400 \times 400$  symmetric matrix of intervisibility with values 0 (not visible) or 1 (visible). This matrix restricts the paths of connectivity and consequently the potential network design.

Figure 4 shows a minimalist example to clarify the procedure. The study area has been segmented into five zones (nodes numbered 1 to 5) representing four homogeneous classes (A, B, C, D). Class A has two candidate zones (1 and 5). Solid lines separate the zones and dotted lines represent the intervisibility among the nodes. Node pairs 1–2, 1–4, 1–5, 2–4, 3–5, and 4–5 are not intervisible.



**Figure 4.** A minimalist example of five nodes and four classes.

Table 2 shows the matrix of relationships among the nodes. The values 0–1 represent the condition of intervisibility between nodes and the columns VN (visible nodes) and MD (mean distance) represent the number of VNs including itself, and the MD to the visible neighbours. X and Y are the coordinates of each node. HC represent the homogeneous class that the node belongs.

**Table 2.** Connectivity matrix for the example in Figure 4 (arbitrary units).

HC	Nodes	X	Y	1	2	3	4	5	VN	MD
A	1	1.1	2.5	1	0	1	0	0	2	1.1
B	2	2.5	2.0	0	1	1	0	1	3	1.2
C	3	1.6	1.3	1	1	1	1	0	4	1.1
D	4	0.7	0.8	0	0	1	1	0	2	1.0
A	5	2.5	0.7	0	1	0	0	1	2	1.3

#### 4.5. Selecting the Nodes

The next step is to select the best subset of nodes from the potential candidates that configures a functional network with or without redundancy. There are many examples of optimization algorithms based on clustering and node location (Kumarawadu, Dechene, Luccini, & Sauer, 2008; Younis & Akkaya, 2008) but they focus on the optimization of network architecture from device features and the limitations of hardware and software. It is less common to find examples of optimization based on the representativeness of

environmental conditions (Cano et al., 2007; Marks, 2010; Wark et al., 2008).

We used some single rules to select the best functional configuration from the connectivity matrix:

From all the candidates for each class the node with the highest number of intervisibility connections with its neighbours will be chosen.

If two or more nodes tied, the one with the lowest average distance to the visible neighbours will be chosen.

The result of applying the criteria (i) and (ii) to the example is a reduction in the number of candidate nodes. Node 1 and node 5 are placed in representative zones of the same HC and both nodes have the same number of neighbours. However, node 5 is discarded because of the higher mean distance to its neighbours compared to node 1. The following step determines which of the selected sensor nodes also acquires the HN role.

In the example we selected a unique node to represent each HC. However, this design is more vulnerable than a network with more representative zones for each HC. The same criteria used up to now can be applied to select two or more nodes for each HC. Redundancy is more expensive in terms of material and administration but increases the availability, security and fault tolerance of the network. We believe that a minimum of two nodes for each HC should be selected.

#### 4.6. Optimizing the Network Topology

Research related to node placements in WSNs is growing. The main proposed methodologies exposed in (Younis & Akkaya, 2008) focus on this problem as multi-objective optimization. The two most common approaches are: (1) a pure multi-objective metaheuristic methodology mainly based on genetic (Rabrin K. Jena, 2010; Jia, Chen, Chang, Wen, & Song, 2009; Jourdan & de Weck, 2004; Molina, Alba, & Talbi, 2008) and evolutionary (Guerra Álvarez & Crawford Labrín, 2006; R. K. Jena & Mahanti, 2012) algorithms;

and (2) an aggregate multi-objective methodology based on linear programming optimization models (LP) (Amaldi, Capone, Cesana, Filippini, & Malucelli, 2008; Gandham, Dawande, Prakash, & Venkatesan, 2003; Y. T. Hou, Sherali, & Midkiff, 2005; Watson, Greenberg, & Hart, 2004; Yick et al., 2004; Yick, Pasternack, Mukherjee, & Ghosal, 2006). We use the LP approach.

According to network design considerations (Section 2), the optimization process should cluster the nodes to determine which also acquire the HN role. The goal is to minimize the number of HNs, maintaining full network connectivity and functionality.

The optimization problem has been approached by means of binary integer programming (BIP) as: (1) the mathematical optimization model approaches the known “set covering problem” (Vazirani, 2003) of operations research; (2) the model, based on an objective function, variables and constraints, provides simplicity and ease of understanding and (3) software tools are available that simplify the creation of these models for application of these models to large data matrices.

To establish a model based on BIP, the first step is to declare the variables:

$$X_{x,y} \in \{0,1\}$$

$$X_{x,y} = 1, \text{ HN is placed in position } x,y$$

$$X_{x,y} = 0, \text{ otherwise}$$

Second, the objective function must be defined:

$$\min Z = \sum_{x,y} X_{x,y}$$

Finally, the constraints of the system are based on the conditions:

- i. Any network node can become an HN.

- ii. Two network nodes are connected if there is a relationship of intervisibility between them.
- iii. The sum of candidate nodes around any node must be equal to or greater than 1, if not this node will be considered as an HN.

Once the model is developed, finding an optimal solution can be undertaken by the simplex or branch-and-bound algorithm (B-and-B). Although the simplex algorithm is the general method for LP, the B-and-B algorithm is suitable when working with binary variables (Cunningham & Schrage, 2013; Hillier & Liberman, 2010).

The procedure applied to the above example using node ID instead of the (x, y) coordinates begins with the declaration of the variables  $X_i$ :

$$X_i \in \{0,1\}$$

$$X_i = 1, \text{ HN is placed in position } x,y$$

$$X_i = 0, \text{ otherwise}$$

In the constraints definition, it is necessary to obtain the candidate nodes resulting from the previous phase (see Table 2). For example, to ensure that the node with ID = 1 meets the conditions defined above, it is included as a constraint:

$$X_1 + X_3 \geq 1$$

Adding constraints for all the candidate nodes and the objective function, the proposed model is:

$$\min Z = \sum_i X_i, \text{ where } X_i = \{0,1\} \forall i = 1..4$$

s.t.

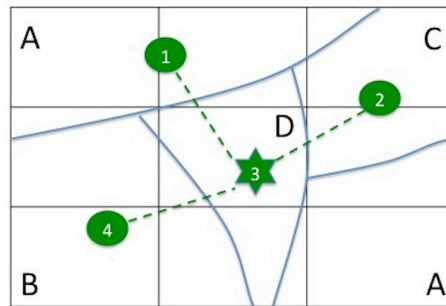
$$X_1 + X_3 \geq 1 \text{ (ID node =1)}$$

$$X_2 + X_3 \geq 1 \text{ (ID node =2)}$$

$$X1 + X2 + X3 \geq 1 \quad (ID \text{ node } = 3)$$

$$X3 + X4 \geq 1 \quad (ID \text{ node } = 4)$$

The theoretical model will be implemented as an optimization model using the LINGO software tool (optimization modelling software for linear, nonlinear and integer programming) that can read data from external matrices and find an optimal solution regardless of the number of nodes available. This software automatically recognizes this model as a BIP model and applies the B-and-B algorithm to find the optimal solution. Figure 5 shows the proposed network design from the solution obtained. This solution determines a unique HN corresponding to the node ID = 3 (star symbol).



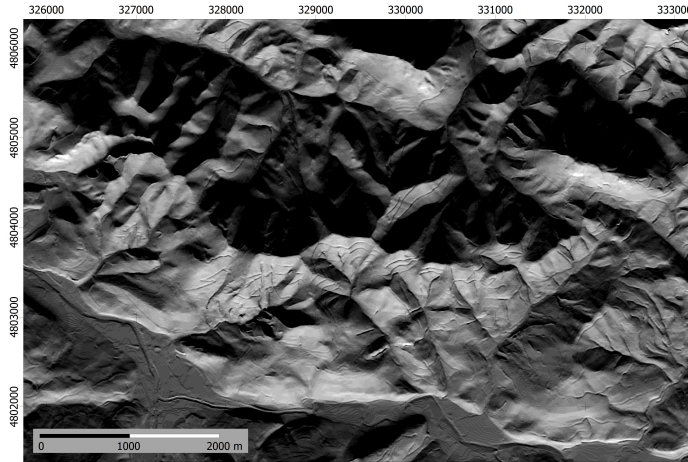
**Figure 5.** Optimal network design proposed with node ID = 3 as HN.

## 5. Results

The proposed methodology has been applied to the study area described in Section 3.

### 5.1. Modelling the Potential Irradiance

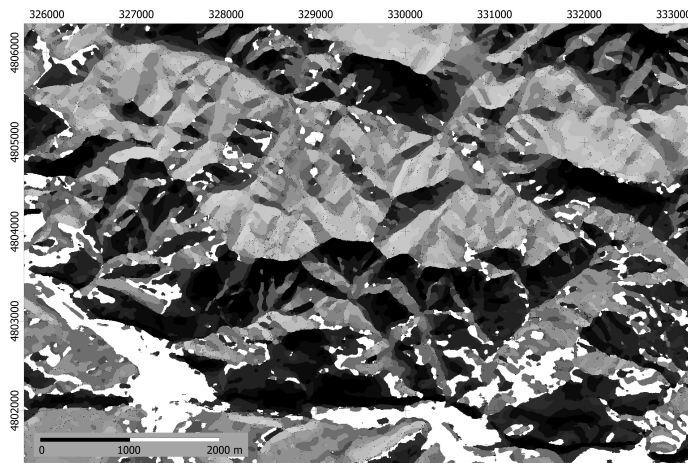
The result of this stage is a set of 12 monthly irradiance models ( $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ ) with 5 m spatial resolution that represent the variation in solar radiation exposure throughout the year. As an example, Figure 6 shows the model corresponding to day 349 (December 15 each year), near to the winter solstice.



**Figure 6.** Potential solar radiation corresponding to day 349 (December 15 each year); the values are in the range from 0 (black, without direct solar radiation) to  $16,000 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$  (white).

## 5.2. Mapping the Homogeneous Classes

The result of applying the ISODATA to the stack of elevation and irradiance models is terrain segmentation into 20 homogeneous environmental classes. Figure 7 shows the appearance of the areas symbolized in grey tones. Class 14 is represented as white areas.

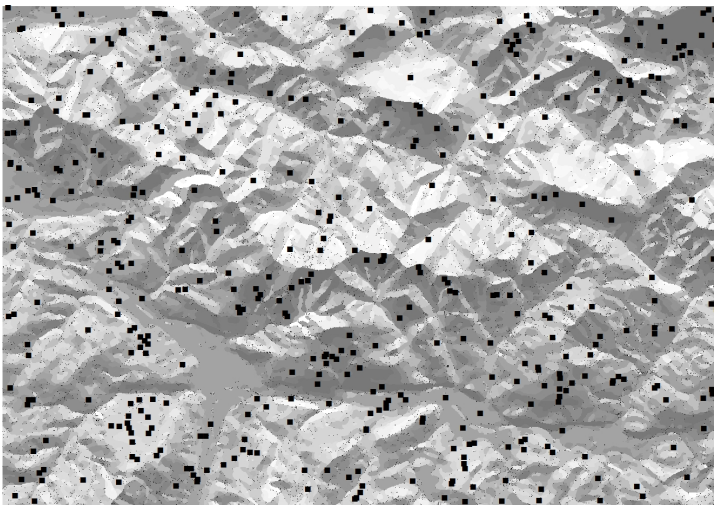


**Figure 7.** Homogeneous classes symbolized with grey tones. As expected, the appearance is similar to the irradiance spatial patterns. For clarity, class 14 has been represented as white areas.



### 5.3. Preselecting Candidate Nodes

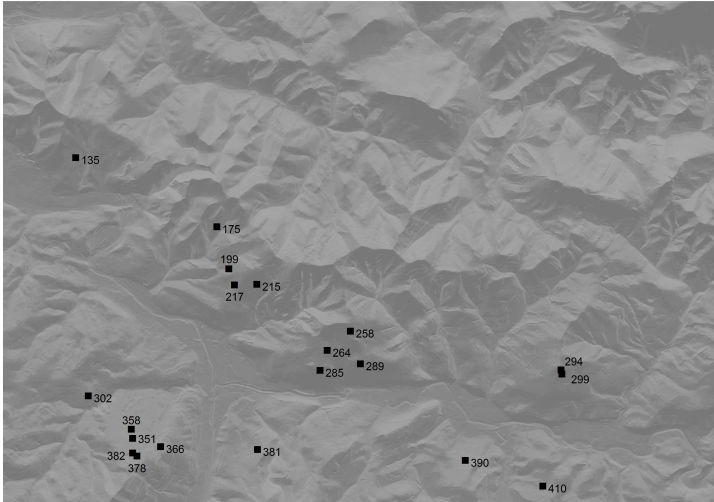
The number of representative areas of each class is usually very high but mostly contains very few cells. As explained before, around 20 large areas of each class have been selected as candidate areas, discarding the rest. If the distance and visibility analysis generates few candidate areas, it will likely be necessary to change the characteristics of the sensors to increase the distance connectivity. Figure 8 shows the preselected 425 candidate nodes as black points.



**Figure 8.** 425 preselected candidate nodes (around 20 for each class).

### 5.4. Testing Connectivity (Intervisibility) and Distance

The intervisibility has been calculated for each node pair including the restrictions of vertical angles ( $\pm 15^\circ$ ) and maximum distance (5000 m). A set of more than 112,000 visibility tests were performed automatically by a GIS and the results have been used to build the  $425 \times 425$  intervisibility matrix. Complementary columns with the coordinates, the number of VNs and the MD to them have been added as an example in Table 2.

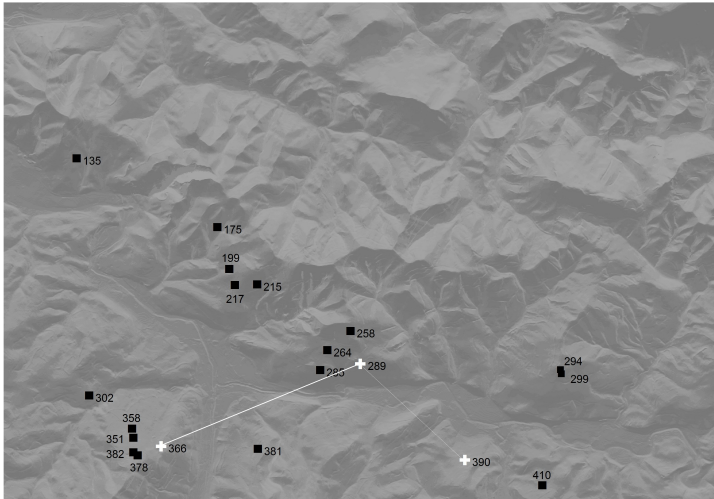


**Figure 9.** Selected nodes based on the maximum intervisibility and minimum distance to neighbours.

The procedure described in Section 4.5 has been applied and a set of 20 network nodes based on the maximum intervisibility and minimum distance to other nodes has been selected, one for each class (Figure 9).

### 5.5. Optimizing the Network Topology

The process carried out by means of the BIP mathematical model generates the optimal topology. Figure 10 represents the deployment of the WSN of 20 nodes (without redundancy) where the HNs are represented as white crosses. Nodes 289, 366, and 390 have been selected as HNs and, because the selection is based on distance and connectivity, almost all sensor nodes are connected simultaneously with two HNs so increasing the reliability and fault tolerance.



**Figure 10.** Optimized WSN with three HNs (white crosses). White lines are the intervisibility between HNs. Node 289 is the most appropriate to be configured as the BS.

The HNs are interconnected as:  $366 \leftrightarrow 289 \leftrightarrow 390$ , 366 and 390 remaining isolated from each other. This circumstance suggests the use of node 289 as the BS (see Section 2). The BS node is responsible for communicating via radio links or telephony (GSM/GPRS), sending all the information periodically to a remote system for processing.

We emphasize that a second network can be added for redundancy. In this case, a new set of HNs is defined and the interconnectivity should be analysed to define the optimum BS for long distance communication.

## 6. Conclusions and Future Work

The results show that the proposed methodology can be used for optimizing the design of a WSN that meets the objectives of this work:

- i. A design adapted specifically to the study area. The network design is perfectly suited to the topography and the technical specifications of the sensors.
- ii. Complete coverage of the environmental variability in terms of Sun exposure, the main factor for local contrast on a detailed scale.

- iii. An adaptable network from the minimalist version with a unique node for each class to the progressive redundant networks for greater fail tolerance.
- iv. A robust topology based on intervisibility analysis that takes into account the technical properties of the sensors.

The methodology has some other features that allow greater flexibility. For example, it is possible to use sensors with different ranges and dispersion angles because these properties are fully configurable for each node in the visibility analysis. Likewise, once the network is configured, the distances between the nodes can be revised and the sensor model modified to reduce the cost using cheaper devices.

The proposed procedure, although functional, must be refined. For example, the selection of candidate nodes can be carried out with more flexibility using some degree of randomization. Similarly, the ISODATA classification used to define the classes to be sampled can be revised to assign greater weight to elevation, a factor with a strong influence on temperature values.

Further work includes the ground validation of this methodology. Sun exposure is the main factor driving the microclimate variability in complex terrain but the percentage of explained variability and the accuracy of the system are unknown. In this context, it is necessary to deploy a real network over a control terrain. Currently, we are developing the physical implementation of the sensors based on open hardware devices.

Since thermal infrared emissivity is strongly related to surface temperature, further work also includes the use of the thermal band of Landsat satellites to compare and analyse the sensor data. We think that the proposed networks and satellite thermal imagery can help in building high-resolution temperature maps based on geometrical models and real terrain data. As noted at the beginning of this paper, many environmental studies

require spatial resolution of tens of metres, especially for species conservation closely linked to microclimatic conditions.

## 3.2. Artículo 2

### **Error, repeatability and uncertainty of low-cost temperature digital sensors for environmental surveillance**

*Martín-Tardío, M. Á., Felicísimo, Á. M.*

**Abstract:** Low-cost temperature digital sensors have widespread use as temperature measurement systems included in wireless sensor networks (WSNs). However, there are very few independent studies that evaluate and compare the performance (accuracy and repeatability) of these sensors with high precision sensors like Pt100 or Pt1000. This work aims to design a calibrated testbed and data acquisition system and to evaluate the behavior of DHT22, DS18B20 and TMP102 sensor models for use within environmental monitoring networks. Laboratory testing was designed to capture temperature data ranging from -15 to 50 °C. All sensors were simultaneously submerged into a thermodynamic fluid in a temperature-controlled stainless steel bath equipped with a calibrated immersion thermostat. An automatic data acquisition system was based on Arduino UNO registered sensor measurements. The results showed confidence intervals of less than  $\pm 0.5$  °C in terms of accuracy; therefore, all the evaluated sensor models provided acceptable performance for environmental monitoring. However, if a high number of sensors was used by the system, significant differences in “intramodel” repeatability were observed. It was estimated that over 75% of these differences could be attributed to variabilities in the sensor manufacturing processes.

**Keywords:** temperature measurement; low-cost digital output temperature sensor evaluation; testbed design; data acquisition system; wireless sensor network; Arduino.

---

## 1. Introduction

This article contains a comparative study of low-cost temperature digital sensors. This type of sensors have acquired great relevance in monitoring projects because they provide high accuracy and reduce the cost of the data acquisition system. This economic saving can be up to a few hundred euros in case of systems with the Pt100 or Pt1000 sensor. These analog sensors has been widely used and studied in the scientific literature (Blain et al., 2004; Kotamäki et al., 2009; Qian et al., 2014; Torán et al., 2001; Valverde et al., 2012). However very few studies in the scientific literature evaluate the accuracy, repeatability and uncertainty associated with the measures of different low-cost digital temperature sensor models comparing them with the previous ones, and only for the sensor model DS18B20 (Jankovec & Topič, 2013; Martínez Bohórquez et al., 2014). The authors of this work believe that this novel evaluation is necessary to determine sensor usefulness in environmental monitoring networks dedicated to the control of microclimatic conditions or global climate change. The availability of these analyses could determine whether these low-cost sensors can address the higher cost and more complex maintenance of sensors currently used in environmental monitoring networks.

Climate mapping is widely used for the study of environmental conservation, biodiversity and climate change (Alam & Starr, 2013; Felicísimo Pérez et al., 2001; Holon et al., 2015; Lam et al., 2015; J. Li & Sheng, 2012; Lobo & Rebollar, 2010; Pellissier et al., 2012; Seoane et al., 2003). The available mapping is suitable for studies on a continental scale, as the spatial resolution is moderate (1 km maximum and more often 5 to 10 km). However, environmental studies that require detailed analyses of weather conditions (with resolutions in the scale of tens of meters) need novel methods that are capable of reflecting different microclimates conditioned by the local topography (Wang et al., 2013). One solution involves using wireless sensor networks (WSNs) (Akyildiz et al., 2002; Hart & Martinez,

2006). More than 10 years ago, J. Porter et al. (Porter et al., 2005) commented that WSNs could be used to monitor areas in detail, helping researchers better understand the spatial and temporal variability of biological and environmental processes. (Bainbridge, Eggeling, & Page, 2011; Chavan, Kadam, & Sawant, 2009; Gobbett et al., 2013; C. Li, Chen, Wu, & Su, 2015; Lopes Pereira et al., 2014; Nadimi, Jørgensen, Blanes-Vidal, & Christensen, 2012; Vairamani, Mathivanan, Venkatesh, & Kumar, 2013) are recent examples of the application of these networks in environmental monitoring. In a previous article (Martín-Tardío & Felicísimo, 2014), these authors proposed a method for calculating the deployment of a WSN adapted to local conditions of temperature variability.

Currently, the success of WSNs is due to the availability of a wide range of sensor types with analog and digital outputs that can capture many environmental parameters. Temperature sensors with analog outputs have been widely used by data loggers and weather stations. The most common analog types are thermistors, thermocouples and resistance temperature detector (RTDs). The advantages include the possibility of calibration and a nominal accuracy of up to 0.1 °C. The major disadvantages are sensitivity to environmental noise, lack of scalability and additional monitoring costs (for conditioning, signal transmission, data acquisition card, and processing) (Martínez Bohórquez et al., 2014). In recent years, numerous digital temperature sensor models have become available (Martínez Bohórquez, 2009, p. 80). Compared to previous versions, these sensors provide greater accuracy (up to 0.01 °C), noise immunity, scalability, lower cost, and ease of connection with microcontroller units (MCUs) with very low conditioning. However, these sensors cannot be used outdoors without appropriate encapsulation and do not support an external calibration (their parameters are factory set).

The general aim of this work is to evaluate the accuracy and repeatability of three digital output temperature sensor models. The specific aims are to design a calibrated test bench suitable for this type of sensor and data



acquisition system and to evaluate the sensor models DHT22 (Aosong Electronics Co., 2014), DS18B20 (Maxim Integrated, 2015) and TMP102 (Texas Instruments, 2014).

The materials and methods used to evaluate the performance of the three selected sensor models are described in the next section. The results obtained from repeatability and accuracy testing are then shown, compared and discussed. Finally, conclusions and recommendations are included for designing monitoring systems that can use these temperature sensor models.

## **2. Materials**

Temperature is a measure of the average kinetic energy of particles in a unit mass and is expressed in units on standard scales (K, °F, °C). There are numerous methods of temperature measurement, and their selection depends on basic parameters of quality in metrology: accuracy (error magnitude), precision (significant numbers in measure) and repeatability (stability measures). The economic cost of the measuring equipment and its maintenance should also be considered.

### 2.1. Digital output temperature sensors

At present, WSNs are extensively used for temperature sensors with digital output (Gao, Jia, Zhang, & Li, 2012; X. Q. Hou & Wang, 2013; Hu, Chen, & Li, 2013; Hulea, Mois, Folea, Miclea, & Biscu, 2013; S. Liu, Yuan, & Chen, 2016; Sharma & Bhattacharjee, 2016; Zhang, He, Li, Cheng, & Rao, 2015). Table 1 contains a summary of most common models of these sensors based on information contained in the respective datasheet.

**Table 1.** Summary of technical characteristics of digital output temperature sensors.

Model	Manufacturer	Power Supply (V DC)	Error (°C)	Sign output (Bits)	Interface	Operating temperature range (°C)	Approx. price <sup>2</sup> (US \$)
DHT11 <sup>1</sup>	Aosong Electronics	3.5 – 5.5	±2 (at 25 °C)	16	1-wire bus	0~50	0.99
DHT22 <sup>1</sup> (AM2302, RHT03)	Aosong Electronics	3.3 – 5.5	±0.5 (-40~80 °C)	16	1-wire bus	-40~80	1.99
DS18S20	Maxim	3.0 – 5.5	±0.5 (-10~85 °C)	9	1-wire bus (Dallas)	-55~125	0.99
DS18B20	Maxim	3.0 – 5.5	±0.5 (-10~85 °C)	9 – 12	1-wire bus (Maxim/Dallas)	-55~125	0.99
LM77	Texas Instruments	3.0 – 5.5	±1.5 (-10~65 °C)	9	SMBus I2C 2-Wire	-55~125	0.90
LM92	Texas Instruments	2.7 – 5.5	±1.0 (-10~85 °C)	9	SMBus I2C 2-Wire	-25~150	1.69
TMP102	Texas Instruments	1.4 – 3.6	±0.5 (-25~85 °C)	12	SMBus I2C 2-Wire	-40~125	0.50
TMP112	Texas Instruments	1.4 – 3.6	±1.0 (-40~125 °C)	12	SMBus I2C 2-Wire	-40~125	0.90
STS21	Sensirion	2.1 – 3.6	±1.0 (-40~100 °C)	12 – 14	I2C	-40~125	2.70
SHT71 <sup>1</sup>	Sensirion	2.4 – 5.5	±2.0 (-20~80 °C)	12 – 14	SMBus	-40~123.8	33 <sup>3</sup>

<sup>1</sup>with humidity sensor including.

<sup>2</sup>without accessories (resistance, wiring, encapsulated waterproof and/or PCB module).

<sup>3</sup>not available without PCB Module

The three sensor models analyzed in this work are described in the following sections. The selection criteria for the sensor models were as follows:

- a lower cost per unit,
- a theoretical error low in the temperature range from -15~50 °C, and
- a higher bit resolution in data output.

### 2.1.1. *DHT22*

This device includes two sensors in the same module: temperature and relative humidity. The operation of this sensor is different from the TMP102 and DS18B20 because it is not based on a semiconductor. This sensor originally used an analog output and a strong nonlinear behavior that requires the use of mathematical models to make an accurate estimate of the measurement (NTC thermistor). This calculation is based on a very basic chip that also handles the analog-digital (A/D) conversion (Aosong Electronics Co., 2014). This operation increases the response time of the sensor to 2000 ms, compared to 750 ms for DS18B20 and 35 ms for TMP102. However, this value is not limiting for environmental monitoring applications related to the measurement of air temperature. DHT22 provides a data output with a precision of 16 bits via a data bus simplified 1-wire (not compatible with MAXIM/DALLAS (Maxim Integrated, 2014)) with an accuracy of  $\pm 0.5$  °C. This data bus allows for the simultaneous connection of multiple sensors through the same data line and simplifies connectivity to the MCU. Although the manufacturer states that the use of this sensor in environmental applications is possible, outdoor use requires adequate protection to prevent damage to the device.

### 2.1.2. DS18B20

This sensor model is based on a semiconductor. The sensor uses two sources that are bandgap voltage generated to obtain a temperature measurement, of which one source has a high temperature coefficient ( $\alpha_{HT}$ ) and other has a low temperature coefficient ( $\alpha_{LT}$ ). The A/D converter measures the difference between the two sources and reports a digital value with a resolution of X bits that represents the sensor measurement. The DS18B20 uses a 1-wire bus MAXIM/DALLAS as an output interface, which allows for the connection of multiple sensors of this type or compatible types through a single data line. The output is programmable by the user to 9, 10, 11 or 12 bits of precision, corresponding to increases of 0.5 °C, 0.25 °C, 0.125 °C and 0.0625 °C, respectively. By default, this sensor model has a fixed precision of 12 bits. It has an accuracy of  $\pm 0.5$  °C for temperature measurements between -10~85 °C and operates in a range between -55~125 °C. The conversion time for 12 bits is 750 ms (Maxim Integrated, 2015). This study selected a TO-92 format for easy connection. The basic model is not designed specifically to work outdoors and requires a specific encapsulated cover to protect it from external atmospheric agents and to ensure adequate thermal conduction. This sensor model is also available with a PVC or stainless steel encapsulated cover, but at a higher cost.

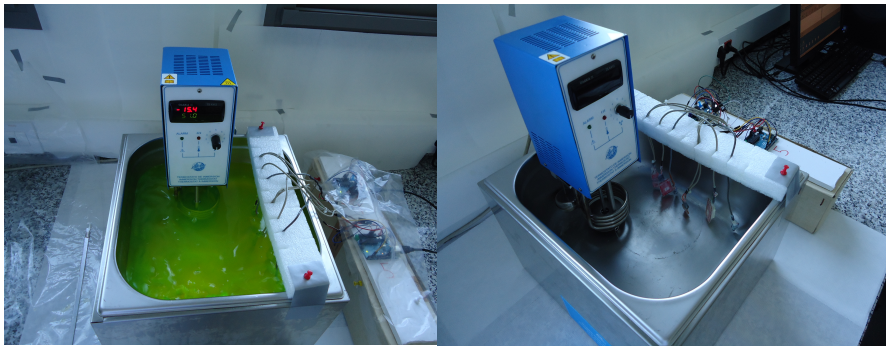
### 2.1.3. TMP102

This sensor model, manufactured by Texas Instruments, is also based on a semiconductor and its operation is similar to DS18B20 (Texas Instruments, 2014). This sensor uses a precision of 12 bits to represent measurements made by the sensor. This device has an accuracy of  $\pm 0.5$  °C for temperature measurements between -25~85 °C. The data output is performed on an interface compatible with SMBus, I2C or 2-wire controls. According to the manufacturer, each unit is tested and verified with traceable equipment by National Institute of Standards and Technology (NIST) and accredited

calibration by the ISO/IEC 17025 standard (International Standards Organization, 2005). As above, this sensor requires encapsulation that properly isolates it for outdoor installation.

## 2.2. Bath, fluid and immersion thermostat

This test uses a stainless steel bath with 5 l of 30% ethylene glycol (JP Selecta, 2015) to perform a series of temperature measurements, as 30% ethylene glycol is a suitable fluid for working with instrumentation within submerged homogeneous temperatures between -15~50 °C. The fluid temperature is regulated by an TI-07 immersion thermostat (SCIENCE BASIC SOLUTIONS) (SBS, 2015) and controlled by an TSK 412 thermostat controller (OSAKA SOLUTIONS) (Figure 1). The thermostat has a temperature sensor reference RTD (Pt100) type with a guaranteed accuracy of  $\pm 0.05$  °C up to 100 °C. It also uses a circulation pump to homogenize fluid conditions and facilitate heat conduction. A freezer was used to pre-cool the fluid.



**Figure 1.** Stainless steel bath and immersion thermostat with a Pt100 probe.

## 3. Methodology

The methods used to design a data acquisition system for sensor measurements, a testbed and a set of implemented laboratory tests are described below for the three models of temperature sensors.

### 3.1. Data acquisition system

The data acquisition system was designed to (1) store measurements of temperature sensors automatically and (2) implement a low-cost application compared to other commercial solutions (National Instruments, 2010). The system uses an Arduino UNO board based on an ATmega328 microcontroller unit (Arduino, 2014). The system supports communications via an I2C and SPI bus for connecting sensors compatible with this type of interface. The chosen sensors are connected to this board as follows:

- DHT22 via a bus interface 1-wire (not MAXIM/DALLAS), capturing the output through pin 3.
- DS18B20 via a bus interface 1-wire (MAXIM/DALLAS), capturing the output through pin 2.
- TMP102 via an I2C bus interface with 0x48 addresses assigned, capturing the output through pin SDA.

Measurements of each sensor are sent in text format to the computer via a USB port. The computer automatically includes each measure as a new line, adds a timestamp and compiles the entire series into a single CSV file.

### 3.2. Testbed design

Testing was performed in a laboratory environment under controlled temperature. The calibration of the reference system corresponding to a Pt100 probe included in the immersion thermostat was checked prior to the test. The probe's performance was compared with a JP Selecta 1001267 analog thermometer with certified calibration (JP Selecta, 2014). The results for the -10, 0, 10, 20 and 40 °C checkpoints showed no significant differences.

The sensors used were not equipped for installation in outdoor environments or for submersion in a water-based fluid. Encapsulation forms were made by coating each sensor with a 1-2 mm thick capsule of transparent

neutral silicone with a thermal conductivity of 0.2 W/mK. This material was used in (Martínez Bohórquez, Enrique Gómez, & Andújar Márquez, 2009) to achieve a suitable seal on the DS18B20 sensor without significantly affecting its performance. The encapsulation influence on error was also minimal for the other two sensor models, with a measurement of less than 0.05 °C.

### 3.3. Lab testing

During laboratory testing, the sensors were operated through a series of temperatures ranging from -15 to 50 °C. The test began with the pre-cooling fluid below -15 °C and then passed to the bath. All sensors were submerged simultaneously and temperature readings were registered with a 1-min sampling rate. The fluid was then passively warmed to reach room temperature. The thermostat was subsequently used to raise the temperature gradually to 50 °C. The approximate increase was 0.5 °C/min. Because the response time of the three sensor models (including the Pt100 reference probe) was less than or equal to 3 s in all cases, it was possible to exclude thermal inertia as a factor influencing the sensor's readings.

## 4. Results and discussion

The test results were imported into a spreadsheet for repeatability and accuracy analyses; the results of these analyses are listed below.

### 4.1. Repeatability

Repeatability evaluates the consistency of measurements between sensors of the same model. The results may show, regardless of measurement accuracy, that sensors of the same model are more homogeneous than those of another model and may also show the extent of “intramodel” variability. A low repeatability warrants testing for each sensor that will be placed on the ground as part of a WSN and the application of corrections to the obtained results. This process involves an additional cost but ensures better accuracy

because it reduces or eliminates systematic error due to the individual properties of each sensor. If the repeatability value is superior to the absolute error of the sensors, then pre-installation testing is unnecessary.

This analysis was performed by comparing simultaneous measurements of five sensor units of the same model for each model. Table 2 summarizes the testing results.

**Table 2.** Repeatability analysis: mean deviation of each sensor relative to the sensor array of the same model, standard deviation and 95% confidence interval.

Model	Unit ID	Mean	Standard deviation	95% Confidence Interval
DHT22	1	0.05	0.12	$\pm 0.24$
	2	0.08	0.10	$\pm 0.19$
	3	-0.09	0.09	$\pm 0.19$
	4	-0.04	0.12	$\pm 0.23$
	5	0.00	0.14	$\pm 0.27$
DS18B20	1	0.17	0.19	$\pm 0.37$
	2	-0.02	0.17	$\pm 0.33$
	3	-0.10	0.16	$\pm 0.31$
	4	-0.10	0.16	$\pm 0.31$
	5	0.09	0.29	$\pm 0.57$
TMP102	1	-0.07	0.26	$\pm 0.51$
	2	-0.12	0.24	$\pm 0.47$
	3	-0.10	0.25	$\pm 0.49$
	4	0.07	0.19	$\pm 0.37$
	5	0.21	0.29	$\pm 0.57$

The confidence intervals (C.I. 95%) for each sensor model are (1) DHT22 =  $\pm 0.22$  °C; (2) DS18B20 =  $\pm 0.38$  °C; and (3) TMP102 =  $\pm 0.48$  °C. The intervals determine the measurement uncertainty as to whether an individual control should be performed for each sensor before their integration into a WSN. This precaution is not only because of the variability between sensors but also because of the potential presence of systematic errors in some



models. In section 4.3, estimates of uncertainty are presented without the removal of these systematic errors and a determination of how to correct these errors.

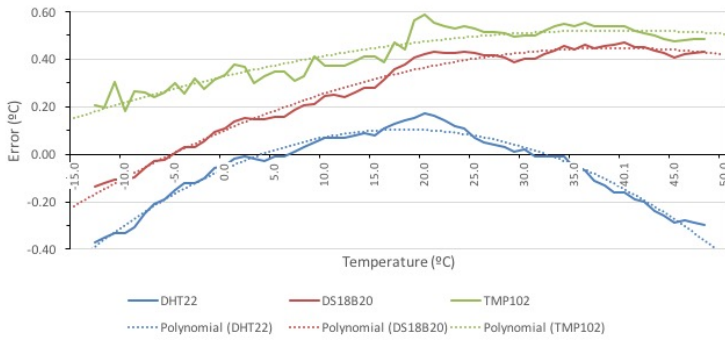
A simple regression analysis between repeatability and temperature was also performed. The results were as follows:

- DHT22 (n = 1495),  $r = 0.42$  ( $P < 0.01$ )
- DS18B20 (n = 1586),  $r = 0.49$  ( $P < 0.01$ )
- TMP102 (n = 1495),  $r = 0.23$  ( $P < 0.01$ )

All the regressions are significant, showing that repeatability decreases when temperature increases in the sensors. However, the coefficients of determination ( $r$ ) indicate that temperature determines only 17.8% of the variation in DHT22 sensor repeatability, 24.3% in DS18B20 and 5.3% in TMP102. The remaining variations can be attributed to the manufacturing processes of the sensors.

#### 4.2. Accuracy

Accuracy evaluates the ability of the sensors to provide measurements close to the conventional true values provided by the calibrated reference system. Estimating absolute accuracy was performed by calculating the differences between the Pt100 probe and the temperature measurements of each sensor model throughout the temperature range of -15 to 50 °C. Measurements were taken simultaneously with two sensors of each model. Figure 2 shows the deviations of temperature measurements from each sensor model and the trend lines fitted to second-degree polynomial equations.



**Figure 2.** Deviations of temperature measurements for each sensor model compared to the reference system and trend lines.

In Figure 2, two different patterns can be observed with respect to errors: DS18B20 and TMP102 show increasing errors with temperature, whereas DHT22 has readings that are somewhat overvalued in the middle of the temperature range (between 7~32 °C) and undervalued at the ends of this range. The patterns are consistent for all the tested sensors.

Table 3 shows the standard deviations and C.I. of measurement errors for each sensor model for the temperature range of -15 to 50 °C. This analysis allows for the estimation of the uncertainties due to these measurement errors. Uncertainty values expressed by C.I. limit the usefulness of sensors according to the purpose of the networks that use them.

**Table 3.** Standard deviation value of measurement errors and confidence interval (°C).

Model	Standard deviation	95% Confidence	99% Confidence
		Interval	Interval
DHT22	0.17	± 0.33	± 0.44
DS18B20	0.20	± 0.40	± 0.51
TMP102	0.12	± 0.23	± 0.31

### 4.3. Simulations

There were two sensor models behavior simulations based on probability distributions as defined by statisticians. These simulations were used for a complete evaluation of the effect of systematic errors, uncertainty and

repeatability in the measurements resulting from the sensors. The first simulation, based on 10000 replicates of each model, obtained the following results for uncertainty due to better or worse repeatability:

- DHT22:  $\pm 0.32$  °C (C.I. 95%);  $\pm 0.43$  °C (C.I. 99%)
- DS18B20:  $\pm 0.46$  °C (C.I. 95%);  $\pm 0.60$  °C (C.I. 99%)
- TMP102:  $\pm 0.56$  °C (C.I. 95%);  $\pm 0.74$  °C (C.I. 99%)

In the second simulation, the same number of replicates was used, but systematic error affecting the sensors was removed, thus obtaining the following estimates:

- DHT22:  $\pm 0.26$  °C (C.I. 95%);  $\pm 0.35$  °C (C.I. 99%)
- DS18B20:  $\pm 0.39$  °C (C.I. 95%);  $\pm 0.51$  °C (C.I. 99%)
- TMP102:  $\pm 0.49$  °C (C.I. 95%);  $\pm 0.65$  °C (C.I. 99%)

In comparing the two tests, the uncertainties in sensor measurements are reduced by approximately 19% (DHT22), 16% (DS18B20) and 13% (TMP102). In any case, any heterogeneity of the sensors due to manufacturing and/or factory calibration does not allow for better measures than those included in the estimated confidence intervals. However, the uncertainty results due to repeatability are consistent with the uncertainty results due to the measurement errors shown in section 4.2.

## 5. Conclusions

This analysis showed that the performance of these low-cost sensors renders them suitable for use in environmental monitoring. Therefore, they are reliable alternatives to replace other more expensive models with more complex maintenance regimens that are often used in this context. Temperature sensors with analog outputs have typically been used in dataloggers and weather stations due to their high accuracy, such as thermistors, thermocouples and temperature dependent resistances (RTD)

(John G. Webster, 1998). However, the cost of a system temperature measurement based on RTD with a Pt100 quality, wiring and data acquisition card is hundreds of euros.

The results show an accuracy confidence interval (95%) of less than  $\pm 0.5$  °C for all the sensor models. This value is suitable for environmental monitoring of protected areas, national parks, or extensive networks over natural areas. The results also verify that the error information provided by the manufacturers is correct.

However, significant differences of “intramodel” repeatability did appear. It is estimated that 75% of the temperature uncertainty can be attributed to variabilities in the manufacturing processes. The DHT22 model displays better performance in both accuracy and repeatability parameters. However, it is recommended that an individual control be performed for each sensor unit before their integration into a WSN. This procedure can reduce sensor uncertainty by up to 19% for the DHT22 model.

As for outdoor use, it is advised that the DHT22 and TMP102 be used within a plate gill radiation shield instead of encapsulations applied directly to the sensor module. In the case of DHT22, this method will also allow the use of the humidity sensor included in the same module. The DS18B20 is the only model sold with some type of encapsulation for this purpose.

Finally, we believe that the test results provided in this paper will aid in the design of environmental monitoring systems, thus ensuring that features are suitable for accuracy, precision and stability requirements at a lower cost.

### 3.3. Artículo 3

#### **A method of downscaling temperature maps based on analytical hillshading for use in species distribution modelling**

*Felicísimo, Á. M., Martín-Tardío, M. Á.*

**Abstract:** Climate maps have been widely used for the construction of species distribution models. These maps proceed from interpolation of data collected by meteorological stations. The main problem of these datasets is the sparse distribution of data that generates maps with coarse spatial resolution than are unable to detect microclimates or areas that can serve as plant or animal refuges. In this work, a method for downscaling temperature maps is proposed. This method uses the solar radiation falling upon hillsides as predictor representing accurately the influence of the relief in the local variability. The solar irradiance is estimated from the digital elevation model (DEM) of the study zone using a routine based on analytical hillshading. Some examples of a mountainous area are shown, downscaling from 1 km to 25 m spatial resolution for each month of the year. The results are compared with the surface temperature maps from Landsat 8 satellite imagery.

Keywords: downscaling; analytical hillshading; temperature maps; climate cartography; DEM.

---

## 1. Introduction

Climatic cartography has traditionally involved generating maps by means of meteorological station data interpolation. This method has numerous well-known problems, such as the sparse distribution of data, the poor representation of high elevations, and the non-representative distribution over a given terrain. The spatial resolution from such data does not surpass 1 km in the best case and is frequently limited to 10 km or more.

Climate maps have been widely used for the construction of species distribution models (SDM). For example, Worldclim datasets (Hijmans et al., 2005) have been used in hundreds of studies due to their free availability and worldwide coverage. Worldclim datasets incorporate a spatial resolution of 1 km<sup>2</sup>, but this value is obtained by means of interpolation procedures from sparse data and does not represent the real climate variability and complexity of given terrains, especially in mountainous areas. As a consequence, although Worldclim and similar data are very valuable sources of information, they remain problematic in certain aspects (Beier, Signell, Luttman, & DeGaetano, 2012) and therefore can be useful at continental scales but cannot detect local variability. The availability of high resolution climate maps would be considerably important for conducting local or microhabitat studies, i.e., studies on the influence of climate change on the distribution of species that can find suitable microclimates to be used as refugia (Meineri & Hylander, 2016).

In some countries such as Spain, the problem of data inadequacy has worsened over time due to a significant reduction in the number of weather stations (Felicísimo et al., 2011), which correspondingly reduces the quality of even conventional maps. Consequently, other solutions must be tested. The most common approach to solve this problem involves the use of downscaling procedures. Downscaling refers to procedures that attempt to use information known at large scales to estimate the corresponding values at more detailed scales. There are two main approaches to downscaling

climate data: dynamical and statistical (Benestad et al., 2008; Trzaska & Schnarr, 2014). Dynamical downscaling applies climate models based on physical principles to reproduce local climate over a finer grid by solving equations of motion and thermodynamics. On the other hand, statistical downscaling establishes empirical relationships between local climate dependent variables and a set of known independent variables or predictors. Within these two approaches, numerous procedures have been proposed: dynamical procedures (Gerelchuluun & Ahn, 2014), probabilistic procedures (Caillouet et al., 2016), multiple regression (Landgraf et al., 2015), neural networks (Coulibaly et al., 2005), support vector machines (Duhan & Pandey, 2015), regression trees (Gerlitz, 2015), etc.

In this work, we propose a method for downscaling temperature maps. The proposed method is an approach that uses the solar radiation falling upon hillsides as predictor or covariable. This variable can be estimated from the topography or digital elevation model (DEM) of the study zone. Data such as the latitude of the study zone and the day are also required for the simulation. The major advantage of the method is that it does not need external data other than the DEM. Other advantages are that it adapts to the time of year and that it is especially suitable for mountainous areas and the generation of change scenarios using only temperature maps (specific to the model and climate scenario) and the DEM.

As a sample, we have downscaled a set of 24 monthly temperature maps (12 of the maximum temperatures and 12 of the minimum temperatures) corresponding to the same mountainous zone. The procedure calculates the solar trajectory over the horizon for estimation of the terrain's exposure to solar energy. Both relief patterns and solar energy are used to build a model of the local temperature patterns. As expected, topography has been used as a covariable in several downscaling approaches (Feidas et al., 2014; Fridley, 2009; Landgraf et al., 2015; Slavich et al., 2014), but it does not appear to have been used in the manner we propose in this article.

## 2. Material and methods

### 2.1. Study area

The study area covers the mountainous zone of SW Spain (Figure 1), for which the main characteristics are as follows:

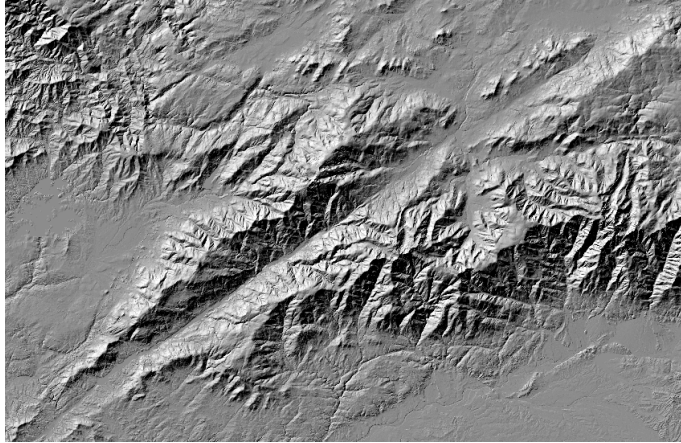
- Boundary coordinates (Datum WGS84, projection UTM, zone 30):  
Xmin = 227587, Xmax = 315012, Ymin = 4429787, Ymax = 4488412.
- Minimum and maximum height values: 235 and 2578 m; mean height: 900 m.
- Mean latitude: 41° N.

The study area is characterized by strong altitudinal temperature gradients and large heterogeneity in local temperature patterns due to the rugged topography and the greatly differing hillshading and exposure to solar radiation. The main geological structure is a fault in the NE-SW direction that forms the Jerte Valley (Extremadura Region).

### 2.2. Digital elevation model

The DEM was downloaded from the data web of the Spanish official CNIG (Centro Nacional de Información Geográfica, National Centre for Geographic Information, <http://centrodedescargas.cnig.es/>). Nine DEM sheets were downloaded and joined; the result is a raster DEM of 2345 rows, 3497 columns, and a 25 cell size. Some border cells were clipped to obtain a rectangle approximately 88 x 59 km in area. Metadata of the DEM ensures a height RMSE (root mean square error) < 2 m.





**Figure 1.** Analytical hillshading of the study zone reveals its mountainous relief.

### 2.3. Climate data

Climate maps were elaborated by us several years ago in the context of a national project for climate change modelling of the Iberian Peninsula. The maps were generated using data from meteorological recordings using kriging for the interpolation. Later, empirically calculated monthly height gradients were added for better representation of the high areas without meteorological records. A large set of maps (monthly from 1950 to 2007) with a 1 km cell size was generated for the variables of minimum temperature, maximum temperature, and precipitation (Figure 2). In this work, we use the mean values of the minimum and maximum temperatures for the reference period 1961-1990. We emphasize that the map time range is not relevant for explanation or application of the downscaling method.



**Figure 2.** Example of a temperature map (cell size 1 km) of the study area. The variable is the mean minimum temperature in March for the period 1961-1990. The more conspicuous temperature patterns are due to the altitudinal gradient, with bright cells corresponding to low temperature values.

## 2.4. Software and code

The analysis was performed using the geographic information system (GIS) ArcInfo (ESRI Inc.). ArcInfo is an old GIS but exhibits strong performance in massive calculus operations and is suitable for running some essential parts of the code. All the routines have been programmed in AML (Arc Macro Language), the specific programming language used by ArcInfo.

## 2.5. Methods: general workflow

### 2.5.1. Solar radiation estimation

The hypothesis on which the procedure is based is that solar energy is a main factor driving local temperature variability. Obviously, under a given environment, hillsides facing the sun have higher temperatures than ones in the shade. The aim herein is to estimate a *topographic index* derived from the incident solar radiation that can be applied to each DEM cell with size 25 m to increase or decrease the temperature of the corresponding temperature map cell with size 1 km.

The first step is to estimate the potential solar irradiation over each 25 m DEM cell. This variable was estimated using the equations of (Kumar et al., 1997), which were programmed by N. E. Zimmermann in AML. The routine called `shortwavg.aml` is freely available on the programmer's webpage and calculates direct solar radiation. The routine `diffuse.aml` calculates diffuse radiation. The inputs are DEM, latitude, Julian day, and time interval (min) for the integration of a solar path. The routine determines how often sun position is calculated during a day as a function of the time interval. The incidence angle of the solar radiation vector over each DEM cell is calculated for each solar position taking into account the terrain slope and orientation and the potential overshadowing caused by adjacent terrain. The result is output in  $\text{kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{day})$  as a gridded map of potential solar radiation values whose spatial resolution is the same as that of the DEM used. Total solar radiation is the sum of the direct and diffuse components, and the procedure is repeated for each month of the year. At this point, it may be emphasized that the accuracy of the energy estimation is not substantially important, rather the relations between the areas differently exposed are, as shown below.

### *2.5.2. Topographic index $\tau$ calculation*

The following step involves the estimation of the topographic index (symbolized as  $\tau$ ) from the previously estimated solar radiation. The rationale for this estimation is that the  $\tau$  values will indicate how much the temperature of each cell should be modified based on its exposure to solar radiation. For example, if  $\tau = 0.85$ , the procedure for the cell is to multiply the general  $1 \text{ km}^2$  temperature value for this index by 0.85, resulting in a topographically corrected value; i.e.,  $20.0 \text{ }^\circ\text{C} \times 0.85 = 17.0 \text{ }^\circ\text{C}$ . This example would correspond to a cell facing north and/or overshadowed by the adjacent relief. The estimation of topographic indexes from solar radiation has been performed by applying the directly proportional relationship between energy  $E$  radiated per unit surface area of a black body across all wavelengths per

unit time and the fourth power of the black body's thermodynamic temperature  $T$ :  $E = \sigma \cdot T^4$ , where  $\sigma$  is the Stefan–Boltzmann constant. This equation shows how a relationship between energy and temperature can be used to estimate  $\tau$  values. The procedure is as follows:

- The solar radiation models are transformed by applying the fourth root of the energy values.
- The fourth root of the mean irradiance for the 1 km cell area is also calculated.
- The topographic index  $\tau$  for each cell is calculated as the ratio between its fourth root value and the mean value of the 1 km cell area.

All steps are performed by means of GIS map algebra operations, and the result is a set of 12 topographic index maps, one for each month of the year.

### *2.5.3. Applying the topographic index*

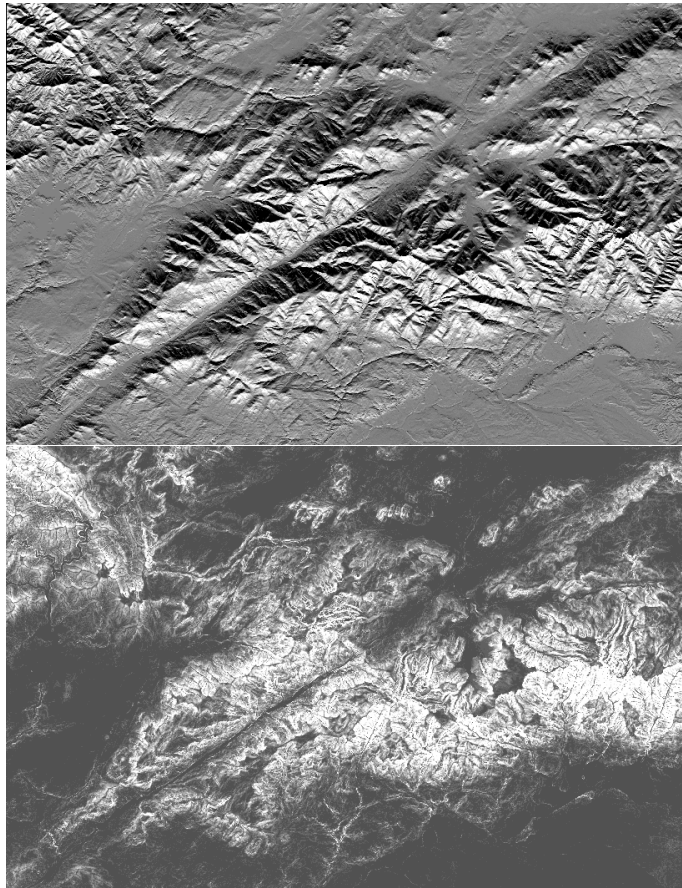
At this stage of the workflow, it is necessary to apply the topographic indexes to the temperature maps. Since these maps have a spatial resolution of 1 km, it is necessary to reduce the cell size to 25 m to make it compatible with the topographic index grids. This procedure is performed by means of spline interpolations, using the centres of each 1 km cell as data points. The result is a set of maps with the same information as the originals but for which the pixellation has disappeared, and transitions between cells are continuous. The last step is to multiply the two map sets (temperature and topographic indexes) for each month to obtain the downscaled temperature maps.

## **3. Results**

### 3.1. Solar radiation maps

Twenty-four maps of solar radiation were calculated by means of Zimmermann routines using direct and diffuse radiation for each month of

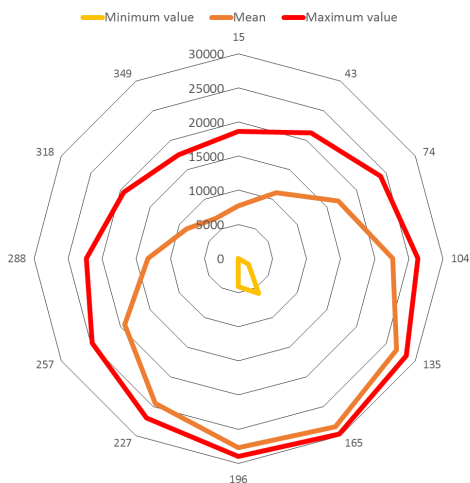
the year, with day 15 of each month as the reference date. The days as Julian dates are 15, 43, 74, 104, 135, 165, 196, 227, 257, 288, 318, and 349. The time interval was 20 minutes. As an example, Figure 3 shows the direct and diffuse solar radiation for day 15.



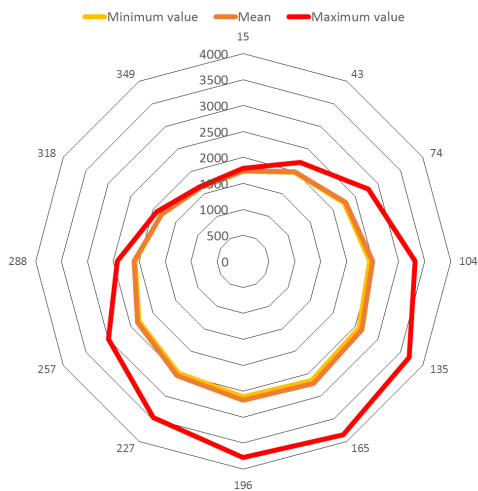
**Figure 3.** Solar direct (above) and diffuse (below) radiation maps corresponding to January (Julian day 15). White and light grey tones represent the most sun exposed areas and dark grey tones the most shaded areas or areas oriented towards the north.

Figure 4 and Figure show the minimum, mean, and maximum values of the direct and diffuse radiation models, respectively. The dates as Julian days are indicated at the external circumference, and the radiation levels in  $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$  are shown on the radial axis. Seasonal patterns are evident, as are the effects of topographic shading, since there are 9 months for which the

minimum direct radiation value is zero, i.e., there are at least some cells that do not receive any direct radiation throughout the day. The ratio diffuse/direct radiation is in the range of 0.10 (summer months) to 0.24 (winter months). All the maps are provided in the supplementary material.



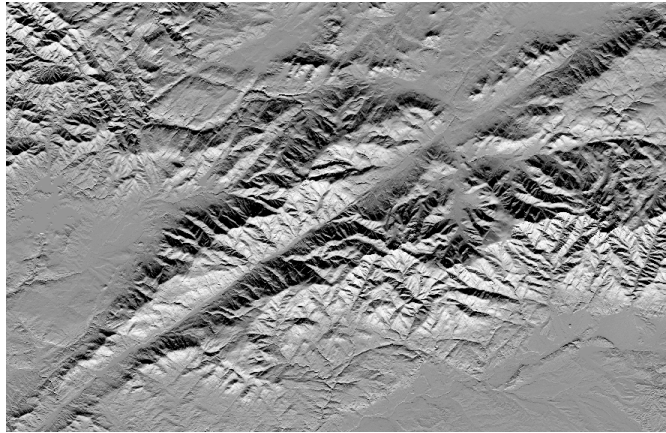
**Figure 4.** Minimum, mean, and maximum direct radiation values across the study zone through the twelve months of the year. Peripheral numbers are the Julian days, and numbers on the radial axis represent radiation values in  $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ .



**Figure 5.** Minimum, mean, and maximum diffuse radiation values across the study zone through the twelve months of the year. Peripheral numbers are the Julian days, and numbers on the radial axis represent radiation values in  $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ .

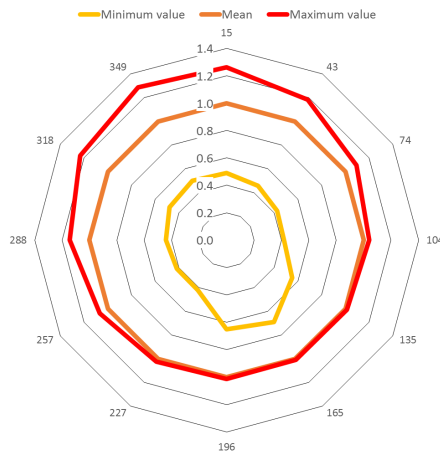
### 3.2. Topographic index

From the total solar radiation estimations and as a function of the solar radiation over a horizontal surface, a set of topographic indexes were calculated, one for each month of the year. Figure 6 shows an example of the index  $\tau$  corresponding to January (Julian day 15).



**Figure 6.** Topographic indexes corresponding to January (Julian day 15). White and light grey tones represent  $\tau > 1$  (oriented to the south), and dark grey tones represent  $\tau < 1$  (shaded or oriented to the north).

Figure 7 shows the minimum, mean, and maximum values of the  $\tau$  index.



**Figure 7.** Minimum, mean, and maximum  $\tau$  values across the study zone through the twelve months of the year. Peripheral numbers are the Julian days, and numbers on the radial axis represent  $\tau$  values.

### 3.3. Downscaled temperature maps

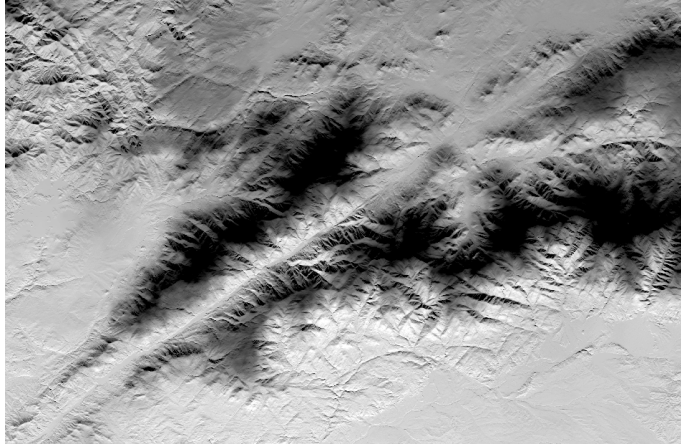
Twenty-four downscaled temperature maps were calculated using the  $\tau$  values to modify the original temperature maps. As explained earlier, temperature maps with a cell size of 1 km were changed by means of spline interpolation to reduce their cell size and to soften the cell borders, thus making continuous frontiers between cells. Figure 8 shows an example of this interpolation for the January temperature map (see the original in Figure 2).



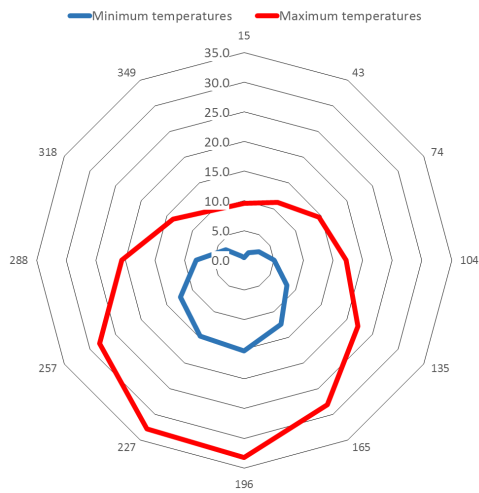
**Figure 8.** January (day 15) temperature map processed to change the cell size and to make continuous transitions between cells.

Finally, the temperature maps with a cell size of 25 m are changed as a function of  $\tau$  values. Figure 9 shows the January example for maximum temperatures, and Figure 10 shows the annual cycle of the mean values for minimum (blue) and maximum (red) temperatures in the study zone.





**Figure 9.** Mean maximum temperature map of January downscaled from a 1 km cell size to 25 m. Low values are in dark grey tones (high elevations), and high temperatures are in light grey.



**Figure 10.** Annual cycle of the mean values for minimum (blue) and maximum (red) temperatures in the study zone. Peripheral numbers are the Julian days, and numbers on the radial axis represent temperatures in °C.

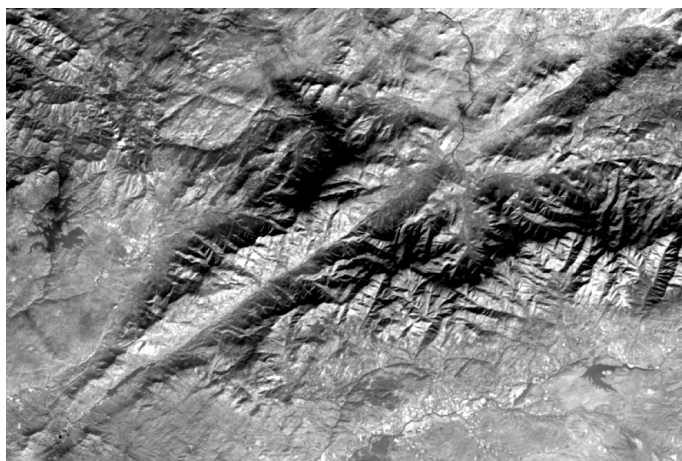
#### 4. Testing the maps

A suitable method for testing the map values calculated herein is to deploy a sensor network for in situ measurement of temperature (Fridley, 2009). Obviously, a huge number of sensors would be necessary to ensure complete coverage of the environmental variability. This procedure is not within our

capacity at this time (see below), and alternative, less exhaustive evidence is therefore sought. An alternative test is to calculate the correlation between the downscaled maps and temperature maps derived from satellite thermal images of the same zone. We use a Landsat 8 image downloaded by means of the USGS Global Visualization Viewer (GloVis). The hypothesis is that if the downscaling method is accurate, the temperatures from the downscaled map will be significantly correlated with the corresponding temperatures derived from the thermal satellite bands. Temperatures derived from satellite data represent only a snapshot of the monthly temperatures, but the relief driven pattern must be similar if the proposed model is adequate.

All images with compatible dates (near day 15 of each month) and cloudless conditions (<10% cloud coverage) were downscaled. A set of 5 representative images of the months of July, August, September, October, and December were processed.

From band 10, we calculated surface temperatures by means of the conventional procedure from digital values to top of atmosphere (TOA) reflectance to at-satellite brightness temperature using the coefficients of the image metadata file. Figure 11 shows the result for the month of October.



**Figure 11.** Temperature map derived from thermal imagery (band 10) of the Landsat 8 satellite. Image date is Oct 31 2014.

The correlation analysis is easily performed using the GIS tools. Table 1 shows the results for the five months with images available. Two series were performed: the first is between the thermal satellite derived temperatures and the original minimum and maximum temperature maps (Non-downscaled maps column), and the second is between the same satellite temperatures and the downscaled minimum and maximum temperature maps (Downscaled maps column). The hypothesis is that if the downscaling procedure is adequate, the correlation will improve significantly.

**Table 3.** Correlation coefficients between satellite thermal-band derived temperatures and climate maps, without and with downscaling. The increase in correlation coefficients is highly significant.

Month	Julian day	Non-downscaled maps		Downscaled maps	
		Tmax	Tmin	Tmax	Tmin
July	196	0.13	0.19	0.45	0.48
August	227	0.17	0.19	0.56	0.53
September	257	0.19	0.21	0.67	0.68
October	288	0.05	0.08	0.71	0.55
December	349	0.17	0.17	0.70	0.45

The result is that all the correlation coefficients increase significantly when the downscaling process is applied, and consequently, the downscaled maps fit much better with the “snapshots” captured in the satellite images.

## 5. Conclusions and discussion

Temperature maps at moderate or low resolution are commonly available but cannot adequately represent microclimates and fauna or vegetation microrefugia, as they are based on climate estimates that are either too coarse or that ignore relevant topographic climate drivers. This problem worsens in mountainous areas where local contrasts are stronger and meteorological stations are sparse. Downscaling procedures attempt to solve this problem using a variety of methods. In this work, a simple geometrical method is proposed. The main advantage is that the method needs only the DEM of the study zone and some freely available code routines. Additionally, the

downscaling takes into account the day of the year and the latitude of the area. The results seem reasonable, and a comparison with thermal satellite images shows that the correction strongly improves the correlation when the downscaling method is applied to conventional temperature maps. The downscaling method is an approximation based on reasonable premises but has certain limitations, the main one being that the applied Zimmermann routines work by default only with clear sky conditions. This may be inappropriate even if we are using average values for many years, but it can be adjusted if we have real data on the direct/diffuse radiation ratio in the zone. Additionally, the distribution of temperatures in mountainous terrains depends not only on terrain geometry but also on soil coverture (forest, rock, pasture, etc.). In our case, this issue can be accommodated because we are working with long-term climate maps. In another case, it may be necessary to make a classification of land uses and assign correction factors.

Overall, our results show that although major limitations remain, climate station data can be used to produce high-resolution temperature maps and, consequently, to model local scale ecological, geomorphological and soil processes over large areas.

Further studies have already been designed. A wide wireless sensor network will be deployed in a mountainous area partially affected by fire, based on a previous study published by the authors (Martín-Tardío & Felicísimo, 2014). The objective is to measure and monitor the spatial and temporal changes in the area over the next several years. Data will be taken hourly, and the results will be compared with satellite images and snapshots taken with a thermal camera to validate this methodology.

# Capítulo 4

---

## Discusión de resultados

## **4.1. Artículo 1**

Este primer trabajo proponía una metodología de diseño para una WSN optimizada a un área de estudio que cubriese el rango de variabilidad ambiental presente, con el mínimo número de nodos compatibles y cumpliera las condiciones técnicas de conectividad para garantizar la disponibilidad. Para ello, esta metodología se dividió en cuatro fases: 1) modelización de la irradiancia potencial, 2) definición y mapeado de las clases homogéneas de temperatura, 3) determinación de los nodos candidatos y, 4) optimización del diseño de la red. Para las fases 1, 2 y 3 se emplearon los sistemas de información geográfica (SIG) ArcInfo y ArcView (ESRI Inc., Redlands, CA, EE.UU.) para el análisis de los mapas climáticos, incluyendo las tareas de modelización de la irradiancia solar, clasificación del terreno, análisis de intervisibilidad y selección de zonas representativas de temperatura. Y para la fase 4, se utilizó la herramienta software LINGO (Cunningham & Schrage, 2013) para construir y resolver el modelo de optimización propuesto basado en la programación lineal entera binaria (PEB), que determina un conjunto adecuado de nodos candidatos que satisfacen los objetivos de diseño. Lo primero fue caracterizar el área de estudio en zonas de clases homogéneas de temperatura considerando que la variable principal que impulsa la temperatura superficial de un área topográficamente compleja es la radiación solar. Lo segundo, desplegar un conjunto de nodos sensores candidatos en el centro de cada zona para

posteriormente reducirlo al mínimo, considerando que de todos los candidatos para cada clase homogénea de temperatura se elegirá: el nodo con el mayor número de conexiones de intervisibilidad con sus vecinos, con menores distancias a los mismos y de forma que todas las clases homogéneas de temperatura estuviesen representadas con al menos un nodo sensor.

El desarrollo de esta metodología de diseño no estuvo exento de dificultades, que a su vez se convirtieron en retos para los autores del trabajo. El primer problema que se presentó fue la necesidad de automatizar la estimación de la irradiancia solar potencial (directa y difusa) para cada celda MDE (5 m) aplicando las ecuaciones de Kumar (Kumar et al., 1997). Y aunque a priori no se trataba de una tarea trivial, una de las razones para emplear la herramienta de SIG ArcInfo es que resolvía este problema mediante las rutinas *shortwavc.aml* y *diffuse.aml* programadas a partir de las ecuaciones anteriores por N. E. Zimmermann en lenguaje de macros AML. Ambas rutinas están disponibles gratuitamente en su sitio Web. Por otro lado, como teníamos la intención de llevar a cabo un ensayo de campo en el futuro, se decidió obtener un total de 20 clases homogéneas de temperatura a partir de los mapas de radiación para mantener el número de sensores dentro de un límite razonable de manejo y presupuesto. Para ello se empleó un algoritmo bien conocido como ISODATA basado en un

procedimiento iterativo que reclasifica los píxeles (celdas en este caso) hasta que se logra una clasificación óptima de un número predefinido de clases. Se empleó este algoritmo porque es ampliamente utilizado en clasificación no supervisada de imágenes de satélite, formas de terreno y reconocimiento de patrones (Calvo, Ciraolo, & Loggia, 2003; Irvin, Ventura, & Slater, 1997; Q. Liu, Zhao, Li, & Li, 2012; Vanderzee & Ehrlich, 1995). El último reto destacable fue cómo reducir el número de nodos candidatos, garantizando la conectividad de la red de forma que todas las clases homogéneas de temperatura en el área de estudio estuviesen representadas. Las principales metodologías propuestas en el campo de la ubicación de nodos en WSNs (R. K. Jena & Mahanti, 2012; Rabrinda K. Jena, 2010; Marks, 2010; Younis & Akkaya, 2008) consideran este escenario como un problema de optimización multiobjetivo con dos enfoques comunes: 1) una metodología metaheurística multiobjetiva pura basada principalmente en algoritmos genéticos y evolutivos, y 2) una metodología multiobjetivo agregada basada en modelos de optimización de programación lineal (LP). En este trabajo se decidió utilizar el segundo de los enfoques porque un modelo basado en una función objetivo, variables y restricciones proporcionaba una mayor simplicidad y facilidad de comprensión. Y además se disponía de varias herramientas software de libre acceso que simplificaban la aplicación de estos modelos a matrices de datos de gran tamaño sin necesidad de realizar un trabajo de desarrollo software ad



hoc. El desarrollo de este modelo de optimización se apoyó en un proceso de optimización de una WSN descrito en (Yick et al., 2004) que aplicaba LP. Precisamente, ese trabajo de investigación sirvió como referencia para su construcción, adaptándolo del modelo de Programación Entera Binaria (PEB) incluido en el mismo. No obstante, existen dos diferencias entre la metodología propuesta y la incluida en la referencia citada: 1) la distribución y ubicación inicial de los nodos se realiza a partir de una caracterización previa del terreno y 2) la construcción de las condiciones en las que se basan las restricciones para determinar si un nodo es candidato a nodo cabecera o no emplea el conocido “problema del conjunto de cobertura” de la investigación de operaciones (Vazirani, 2003).

Las simulaciones de prueba realizadas con esta metodología contaron con un rango entre 5 y 425 nodos candidatos a optimizar, sin que se estableciera desde un principio un valor máximo suficiente para garantizar la calidad de los resultados. Ninguno de los experimentos devolvió errores significativos, y tanto la selección de los nodos candidatos, como la optimización de la ubicación de los mismos resultaron adecuadas. Sin embargo, se considera que el procedimiento propuesto, aunque funcional, debe ser refinado. Un ejemplo de ello es el uso de la clasificación ISODATA para definir las clases homogéneas de temperatura muestreables, que podría revisarse para dar mayor

peso a zonas potenciales de interés y obviar otras que por estar fuertemente intervenidas podrían ser objeto de menos atención.

En cuanto al conjunto técnicas empleadas e integradas en este procedimiento, tanto para el modelado de la irradiancia potencial y mapeado de clases homogéneas, como para la optimización del diseño de red, sólo ha sido validado de forma interna. A priori, el desarrollo de esta metodología se enfocó como una propuesta teórica de un modelo de optimización de red, con la idea de realizar a posteriori un despliegue real para validar los resultados de aplicación de la misma. Sin embargo, esta validación de campo quedó supedita a la disponibilidad de financiación y finalmente no fue realizada. Así, los experimentos consistieron en el desarrollo de simulaciones con datos de zonas geográficas concretas del territorio español, obteniendo resultados que demostraban que los diseños resultantes funcionaban correctamente, cumpliendo los objetivos planteados en esta parte del trabajo. Por otro lado, otra de las cuestiones que también quedó pendiente para trabajos futuros fue la utilización de la banda térmica de satélites Landsat para comparar y analizar los datos de los sensores, teniendo en cuenta que la emisividad del infrarrojo térmico está fuertemente relacionada con la temperatura de la superficie. La principal razón fue que no estaba previsto desde un principio y se decidió continuar con el planteamiento inicial por cuestiones de tiempo.

Para terminar con esta discusión, mencionar que no sería posible hacer un uso de esta metodología de forma completa y generalizada debido a que los procesos correspondientes a los pasos 1) y 2) de esta metodología de diseño generan una forma de caracterizar el terreno muy estrechamente ligada a las variables físicas utilizadas. Aplicar esta metodología a otras variables, por ejemplo, como la humedad o permeabilidad del suelo, requeriría modificar las técnicas empleadas en esos dos primeros pasos. No obstante, los procesos incluidos en los pasos 3) y 4) sí podrían aplicarse en otros contextos, siempre y cuando los mecanismos de caracterización del terreno tengan en consideración la condición de intervisibilidad a la hora de seleccionar los nodos candidatos de la posible red de monitorización a desplegar. La condición de intervisibilidad o línea de visión (LOS) se tuvo en cuenta por ser un factor limitante de las comunicaciones inalámbricas, y aunque existen plataformas WSN con tecnologías de comunicaciones que pueden comunicarse sin visibilidad directa (NLOS) o condiciones mixtas, considerar el factor LOS garantiza la mejor de las coberturas para estos sistemas de comunicaciones.

## **4.2. Artículo 2**

Este segundo trabajo de investigación en el contexto de la tesis, tuvo como objetivo general evaluar la exactitud y la incertidumbre de medida de los sensores digitales de temperatura, concretamente de los modelos DHT22, DS18B20 y TMP102 que fueron seleccionados como candidatos, según una serie de criterios establecidos previamente (véase artículo 2). La parte fundamental de este trabajo consistió en el diseño de los experimentos que permitiesen comparar el funcionamiento de los modelos de sensores seleccionados, un banco de pruebas adecuado para ese fin y un sistema de captura de datos encargado de registrar las medidas para su posterior análisis, todo bajo el denominador común del bajo coste.

Las mayores dificultades aparecieron durante el diseño del banco de pruebas para evaluar el funcionamiento de los sensores. Según los experimentos diseñados, los mismos consistirían en capturar una serie completa de temperaturas para un rango entre  $-15\sim 50$  °C con una frecuencia de muestreo de aproximadamente 1 minuto, y una propuesta inicial de variación controlada de temperatura con una cadencia de 1 °C cada 2 minutos como máximo. Como el tiempo de respuesta de los modelos de sensores utilizados (incluida la sonda Pt100 del sistema patrón) era igual o inferior a 3 segundos, esta transición lenta permitiría a los sensores estabilizar sus medidas evitando

la distorsión producida por la inercia térmica. Teniendo en cuenta que estos sensores serían utilizados para medir la temperatura del aire, para el primer diseño se optó por construir en el entorno de laboratorio un “túnel del viento”. Se emplearon ventiladores interiores para crear un flujo de aire homogéneo y continuo dentro de un circuito cerrado que permitiese enfriar y calentar aire. Sin embargo, fueron numerosos los problemas y limitaciones que este diseño tenía, entre los más relevantes: nunca se consiguieron temperaturas por debajo de los  $-4^{\circ}\text{C}$ , los incrementos de temperatura eran difíciles de controlar con la cadencia deseada y estaban influidos por la temperatura ambiente, los sensores más cercanos a la entrada del túnel mostraban medidas de temperatura con variaciones iguales o mayores de  $+1^{\circ}\text{C}$  con respecto a los situados a la salida, y además no podía ser calibrado.

Después de lo anterior, se optó por una estrategia totalmente opuesta que consistió en sumergir los sensores dentro de una cubeta termostática con control de temperatura mediante un termostato de inmersión por microprocesador (véase artículo 2). Además, el dispositivo permitía ajustar la calibración de fábrica del sensor de referencia Pt100 que se usaría como sistema patrón. Para ello, se comparó su funcionamiento con un termómetro analógico con calibración certificada por un laboratorio externo, con una precisión  $0.1^{\circ}\text{C}$  y un rango de medida entre  $-15\sim 50^{\circ}\text{C}$ . Los resultados obtenidos no mostraron

diferencias que sugiriesen una necesidad de recalibrado del termostato de inmersión. De esta forma se resolvían la mayoría de los problemas que aparecieron con el primer diseño. Sin embargo, este segundo diseño planteó dos nuevas inquietudes: 1) qué tipo de fluido sería el más adecuado respecto a sus características termodinámicas para que facilitase la realización de los experimentos diseñados y, 2) la necesidad del encapsulamiento de los sensores en función del fluido elegido y cómo podría influir el mismo en las medidas de los sensores. Para resolver la primera de las cuestiones se realizaron ensayos con agua, aceite vegetal (girasol), aceite mineral (5W40) y etelenglicol 30%, en ese orden. Finalmente, el fluido con un comportamiento más adecuado para el rango de temperaturas de operación entre  $-15\sim 50$  °C fue el etelenglicol 30%. Sin embargo, al tratarse de un fluido conductor obligó a dotar a los sensores de un encapsulamiento estanco antes de sumergirlos. Este encapsulado se realizó aplicando a cada sensor una capa de silicona neutra de 1-2 mm de espesor. El resultado fue una estanqueidad absoluta con un error inferior a 0.05 °C, que en un contexto relacionado con la monitorización ambiental donde las diferencias de temperatura están en torno a  $\pm 0.5$  °C, se consideraron que no falsearían las medidas de temperatura. Por tanto, puede decirse que los resultados obtenidos para los modelos de sensores comparados con este segundo diseño del banco de prueba, tienen un alto grado de fiabilidad después de resolver todos los problemas aparecidos en el primer diseño.

Existen muy pocas referencias bibliográficas respecto a estándares que deberían seguirse para el diseño de estos sistemas de captura de datos para la medida de temperatura con el objetivo de garantizar la calidad de los resultados. Destaca el estándar internacional ISO/IEC 17025:2005 (International Standards Organization, 2005) donde se incluye un conjunto de siete directrices que un sistema de monitorización de la temperatura del aire debería seguir para ser fiable, y que se podrían utilizar como referencia para el diseño de esos sistemas también en entornos medioambientales. En el caso del sistema diseñado en este trabajo de investigación, sólo cumplía cuatro de ellas. De las otras tres, la relacionada con el formato de salida de los datos se podría conseguir fácilmente realizando una modificación simple en el sistema de captura de datos, pero no se consideró relevante. Sin embargo, las otras dos restantes, que están relacionadas con probar el sistema monitorización en condiciones representativas a las que pudieran darse en el medio, no se realizaron. La razón es que, una vez elegido el modelo de sensor con mejores prestaciones habría que implementarlo junto con el despliegue de una WSN según el diseño propuesto en el artículo 1, pero por los motivos indicados en la discusión de los resultados del artículo anterior no se ha realizado.

Durante los experimentos, se pudieron realizar series completas en el rango de temperaturas de operación  $-15\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  de forma satisfactoria. Los datos obtenidos se consideraron

suficientes y fiables para poder realizar un estudio y análisis del funcionamiento de los modelos de sensores evaluados según el objetivo general de este trabajo de investigación. En relación a la metodología empleada, puede afirmarse que ha sido adecuada desde el momento en que tanto el banco de pruebas definitivo, como el sistema de captura, no han generado errores significativos proporcionando un registro de datos correcto y válido para cada experimento realizado. No obstante, algunas partes de este procedimiento podrían ser mejoradas y hacerse más eficientes, por ejemplo, incluyendo una unidad enfriadora que pudiese bajar la temperatura del fluido hasta  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  directamente en la propia cubeta, o bien un sistema de captura de datos que integrase en un sólo equipo tanto las medidas enviadas por los sensores, como las enviadas por el sistema patrón, tal y como se propone en (Martínez Bohórquez et al., 2009) pero considerándose una modificación del diseño para un menor coste de la solución mediante el uso de open hardware (Opensource.com, 2017).

El banco de pruebas y el sistema de captura de datos empleados sólo han sido validados de forma interna por los autores de este trabajo, realizando varias pruebas piloto que comparaban las medidas de los modelos de sensores de temperatura y del sistema patrón (sonda Pt100 incluida en el termostato de inmersión) con las de un termómetro analógico con calibración certificada por un laboratorio externo (modelo



JP SELECTA 1001267). En todas ellas, las diferencias resultantes estuvieron por debajo de la décima de grado, por lo que se consideraron despreciables en el contexto de esta tesis.

En cuanto a los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio han sido completos y suficientes para, a partir de los mismos, realizar un análisis de repetibilidad y otro de exactitud del comportamiento de los tres modelos de sensores candidatos. Para el análisis de repetibilidad, que evalúa la consistencia de las medidas “intramodelos”, se compararon las medidas simultáneas de cinco unidades del mismo modelo para cada uno de los tres tipos. Para el análisis de exactitud, que evalúa la capacidad de los sensores para proporcionar medidas ajustadas a los valores verdaderos, se compararon las medidas de dos unidades del mismo modelo para cada uno de los tres tipos con respecto al sistema patrón calibrado. Además, se han realizado dos simulaciones de comportamiento (con 1000 réplicas en cada una) para cada uno de los modelos seleccionados a partir de las distribuciones de probabilidad. Estas simulaciones han servido para evaluar de forma completa el efecto de los errores sistemáticos, incertidumbre y repetibilidad en los resultados de las medidas de los sensores. Pero estos resultados no podrían generalizarse para otros modelos de sensores, ni siquiera a otros conjuntos de sensores distintos de los mismos modelos evaluados, debido principalmente a la heterogeneidad de los sensores en los procesos de fabricación y/o calibración en origen.

El principal motivo es que, según una estimación realizada a partir de estas simulaciones, más del 75% de las diferencias significativas de repetibilidad “intramodelo” pueden atribuirse a la variabilidad en el proceso de fabricación. Sin embargo, tanto la metodología como la instrumentación desarrollada para medir el funcionamiento de los sensores, sí que podrían emplearse para evaluar el comportamiento de otros modelos de sensores de temperatura basados en estado sólido (CMOS) con salida digital.

Por último, la falta de otros trabajos similares al realizado en esta tesis e independientes de los fabricantes, y más particularmente para los tres modelos de sensores seleccionados, no permite realizar una comparación objetiva entre resultados. Por ejemplo, en (Martínez Bohórquez et al., 2009) los autores realizan una evaluación independiente sólo del sensor DS18B20 desde el punto de vista de la exactitud, obteniendo para ese parámetro valores muy próximos a los obtenidos en este trabajo. Sin embargo, no tuvieron en consideración el grado de incertidumbre introducido por la repetibilidad. Por otro lado, si se comparan los resultados de los experimentos realizados con lo declarado en las hojas de especificaciones técnicas de los respectivos fabricantes para el parámetro exactitud, el comportamiento de los tres modelos de sensores es similar en valores de desviación estándar con los obtenidos en las pruebas realizadas. Para este parámetro los tres fabricantes publican

datos y/o gráficas de la exactitud de los sensores en esas hojas. Pero respecto al parámetro repetibilidad, sólo el fabricante del sensor DHT22 publica ese dato, que para este sensor concretamente coincide en valor con los resultados de las pruebas realizadas en este trabajo.

### 4.3. Artículo 3

Con este tercer trabajo de investigación se pretendió materializar la idea original que impulsó el desarrollo de esta tesis. Se trataba del diseño y desarrollo de una nueva metodología de reducción de escala (*downscaling*) de mapas de temperaturas considerando la variable topografía para el modelado de zonas de relieve complejo. La hipótesis en la que se basa el procedimiento es que la energía solar es un factor principal que impulsa la variabilidad de la temperatura local. Obviamente, bajo el mismo entorno, la ladera frente al sol tiene una temperatura más alta que la de la sombra. El objetivo es estimar un índice topográfico ( $\tau$ ) derivado de la radiación solar incidente que se pudiese aplicar a cada celda MDE (25 m) para aumentar o disminuir la temperatura de cada celda (1 km) del mapa climático. El flujo de trabajo de este procedimiento será: 1) calcular la irradiancia solar potencial (directa y difusa) para cada celda MDE (25 m), 2) estimar el índice topográfico ( $\tau$ ) de la radiación solar previamente estimada en base la ley de Stefan-Boltzmann, 3) reducir el tamaño de la celda de los mapas de temperaturas a 25 m para que sea compatible con las cuadrículas de índice topográfico mediante interpolaciones *spline* y, 4) multiplicar los dos conjuntos de mapas, temperaturas e índices topográficos para cada mes, obteniendo los mapas de temperaturas a escala reducida.

ArcInfo también ha sido la herramienta de SIG empleada para desarrollar este método de reducción de escala.

Varias fueron las dificultades y retos que el desarrollo de este procedimiento planteó a los autores del trabajo, sin embargo, para alguno de ellos se pudieron emplear soluciones ya aplicadas con anterioridad. Este fue el caso para la automatización de la estimación de la irradiancia solar potencial (directa y difusa) para cada celda MDE (25 m) aplicando las ecuaciones de Kumar (Kumar et al., 1997). Para ello, tal y como ya se comentó en la discusión del artículo 1 se empleó la herramienta ArcInfo mediante las rutinas AML programadas por N. E. Zimmermann. El siguiente problema fue encontrar una forma para llevar a cabo la estimación del índice topográfico ( $\tau$ ) a partir de la radiación solar previamente estimada. El objetivo era que los valores de  $\tau$  indicasen cuánto debía modificarse la temperatura de cada celda en función de su exposición a la radiación solar. Por ejemplo, si  $\tau = 0.85$ , el procedimiento para la celda será multiplicar el valor general de la temperatura de la celda de 1 km para este índice, resultando un valor topográficamente corregido como  $20.0\text{ }^{\circ}\text{C} \times 0.85 = 17.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Considerando que la irradiancia solar potencial se calculó a partir de las celdas del MDE (25 m), se necesitaba buscar una relación entre esa energía y la temperatura de la superficie. Pensar en una solución llevó su tiempo porque además no se encontraron referencias que planteasen otras alternativas. Por

tanto, una solución viable fue la basada en la aplicación casi directa de la ley de Stefan-Boltzmann ( $E = \sigma \cdot T^4$ ), que muestra una relación entre la energía radiada por unidad de superficie ( $E$ ) y la temperatura absoluta ( $T$ ) de la superficie, que se puede utilizar para estimar los valores de  $\tau$ . Pero a su vez, la solución anterior generó un nuevo problema justo antes del paso 4) del procedimiento, cuando se aplican los índices topográficos ( $\tau$ ) a los mapas de temperaturas. Como estos mapas tienen una resolución espacial de 1 km, se necesitaba reducir el tamaño de las celdas de cada mapa de 1 km a 25 m para que fuesen compatibles con las cuadrículas del índice topográfico. La solución fue realizar a su vez una reducción de escala común mediante interpolaciones tipo *spline*. Se decidió por este tipo de método de interpolación porque se usa habitualmente en climatología y permite convertir superficies discretas en continuas.

El método de reducción de escala propuesto en este trabajo de investigación es una aproximación basada en premisas razonables, pero tiene ciertas limitaciones. La principal es que las rutinas de Zimmermann aplicadas funcionan por defecto sólo con condiciones de cielo despejado. Esto puede ser inadecuado incluso si estamos usando valores promedio durante muchos años, pero puede ser ajustado si tenemos datos reales sobre la relación de radiación directa/difusa en la zona. Además, la distribución de las temperaturas en terrenos montañosos

depende no sólo de la geometría del terreno, sino también de la cobertura del suelo (bosques, rocas, pastos, etc.). En este caso, ese problema puede ser acomodado porque se está trabajando con mapas climáticos a largo plazo. En otros casos, podría ser necesario hacer una clasificación de los usos de la tierra y asignar factores de corrección.

El resultado fue un conjunto de mapas de temperaturas con la misma información que los originales, sin pixelación y con transiciones continuas entre celdas puesto que este método minimiza la curvatura general de la superficie. Para probar el funcionamiento de este método de reducción de escala, se decidió realizar una muestra con una zona de estudio que debía caracterizarse por ser un “terreno complejo”, es decir, disponer de fuertes gradientes de temperatura altitudinal y una elevada heterogeneidad de los patrones de temperaturas locales debido a una topografía accidentada, así como muy diferentes exposiciones a la radiación solar y sombreado. Para ello se eligió una zona montañosa de España, cuya principal estructura geológica es una falla en dirección NE-SW formando el Valle del Jerte (Extremadura). Como muestra, se empleó un amplio conjunto de mapas generados (mensuales desde 1950 a 2007) con un tamaño de celda de 1 km para las variables de temperaturas mínima y máxima, y precipitación. Los resultados obtenidos de la muestra fueron 12 mapas de temperaturas máximas y 12 mapas de temperaturas mínimas de alta

resolución (tamaño de celda de 25 m), que mejoraban cualitativamente a los mapas de temperaturas anteriores derivados de las imágenes del satélite para la misma zona de estudio. Por tanto, puede afirmarse que toda la muestra pudo ser completada sin errores de aplicación y que este método de reducción de escala es adecuado. No obstante, aunque esta forma de validación interna está bien para comprobar qué el método funciona y qué no es un sinsentido, se necesita de un mecanismo de validación externo que verifique los resultados. En el apartado Trabajos futuros de este documento de tesis ya se ha diseñado un experimento para ello. Además, en ese mismo trabajo se quiere comprobar si la hipótesis de la relación entre temperatura e irradiancia deducida de la ley de Stefan-Boltzmann para estimar los índices topográficos es suficiente y estudiar las posibilidades de mejora.

Por otro lado, si se compara el uso de la variable topografía en este artículo con el empleado en otros trabajos citados de la bibliografía, ninguno lo hace como en esta metodología propuesta. Como ejemplo, un análisis breve de dos de los trabajos que mejor describen el uso de esta variable. En (Fridley, 2009) se empleaba una red de 120 sensores de temperatura desplegados *in situ* sobre la zona de estudio. Al vincular los datos de la matriz de sensores a 10 estaciones meteorológicas regionales y a las variables topográficas que describen la carga de radiación y el contenido de humedad del sitio, se



construyeron modelos espaciales multinivel de 30 m de resolución para hacer un mapa de las temperaturas diarias de un parque natural de 2090 km<sup>2</sup> validado con una red independiente de 50 sensores. Este estudio sugiere una fuerte interacción entre el calor cercano al suelo y los equilibrios hídricos e indica que la influencia de los cambios pasados y futuros en las temperaturas de la zona pueden ser amortiguados por la humedad del suelo proveniente de las altas precipitaciones regionales. Para ello, los autores se basaron en análisis preliminares que describen la distribución de la temperatura en función del nivel de agua del terreno y los flujos de aire, y exploraron la capacidad predictiva de una serie de índices topográficos e hidrológicos estándar derivados del MDE, que estiman el potencial hídrico del sitio calculando el área de captación y corrigiendo la pendiente local. En comparación, en este trabajo de tesis el índice topográfico ( $\tau$ ) es una variable estimada a partir de la irradiancia potencial calculada de forma histórica sobre cada celda de la zona de estudio, y aunque parte también de un MDE, su cálculo no tiene nada que ver con la estimación del nivel hídrico del sitio. Sin embargo, el grado de afinamiento es similar en resolución y con resultados satisfactorios según los autores que mejoran la cartografía climática existente. En (Feidas et al., 2014) se presenta una metodología para modelar y cartografiar las temperaturas estacionales y anuales del aire y las precipitaciones sobre Grecia. Se utilizan series de datos sobre la temperatura del aire y la precipitación de 84 estaciones meteorológicas, junto

con un conjunto de parámetros topográficos y geográficos estándar a partir de un MDE. También se utiliza como parámetro geográfico el índice de vegetación normalizado (NDVI) obtenido de los datos del satélite Aqua MODIS. En primer lugar, se investigó la relación de los dos elementos climáticos con los parámetros topográficos y geográficos sobre la base del coeficiente de correlación de Pearson para identificar los parámetros que afectan principalmente a la variabilidad espacial de la temperatura del aire y la precipitación. Luego se aplicó una regresión múltiple por pasos hacia atrás para agregar parámetros topográficos y geográficos como variables independientes en una ecuación de regresión y desarrollar modelos de estimación lineal para ambos parámetros climáticos. Estos modelos se someten a corrección residual utilizando diferentes métodos de interpolación local en un intento de refinar los valores estimados. Según los autores, los resultados revelaron un rendimiento desigual del modelo respecto a la distribución espacial de precipitaciones y temperatura a lo largo de un año, debido probablemente a la naturaleza altamente variable de la precipitación en comparación con la relativamente baja variabilidad espacial de la variable temperatura del aire. En comparación con el método propuesto en esta tesis, aunque también sigue un enfoque estadístico y emplea una relación “lineal” para la estimación del índice topográfico ( $\tau$ ), se diseñó considerando únicamente la variable temperatura del suelo, con

resultados que a priori (a falta de una validación de campo) sí mejoran los mapas de temperaturas tradicionales.

Por otro lado, este método de reducción de escala, tal y como está diseñado el procedimiento, no se podría generalizar para otras variables climáticas que no fuesen la temperatura.



# **Capítulo 5**

---

## **Conclusiones**

En el artículo 1 se presentó una propuesta de metodología de diseño para redes WSNs con la idea de utilizar esta tecnología con dos fines: 1) la monitorización de la temperatura del aire en una zona de relieve complejo y 2) validar con pruebas de campo la metodología de reducción de escala (*downscaling*) que se desarrolla en el artículo 3. Por tanto, el objetivo era desplegar una red de vigilancia ambiental con un diseño óptimo y adaptado perfectamente a la topografía y a las especificaciones técnicas de los sensores, que cubriese completamente la variabilidad ambiental en términos de exposición al sol. Para ello debía ser reducida con un único nodo sensor representante para cada clase homogénea de temperatura, con redundancia mínima para proporcionar tolerancia a fallos; y contar con una topología de red robusta basada en el análisis de intervisibilidad que tiene en cuenta las propiedades técnicas de los nodos sensores. Según las pruebas de simulación realizadas, y tal como se comentó en el apartado anterior de la discusión, los resultados obtenidos mostraron un correcto funcionamiento cumpliendo, a priori, los objetivos de diseño previstos. Por otro lado, esta metodología tiene algunas otras características que le proporcionan gran flexibilidad y capacidad de adaptación. Por ejemplo, la posibilidad de utilizar nodos sensores con diferentes rangos y ángulos de dispersión de propagación de la señal de radio porque estas propiedades son totalmente configurables

para cada nodo en el propio análisis de visibilidad; o también que los modelos de sensores de temperatura utilizados pueden ser sustituidos para reducir el coste utilizando dispositivos más baratos sin implicar un rediseño del sistema.

El artículo 2 mostró un análisis del rendimiento de tres modelos de sensores de temperatura con salida digital de bajo coste para su uso en redes de vigilancia ambiental, como las que se presentaban en el artículo anterior. Los resultados obtenidos confirman que son una alternativa confiable para reemplazar otros modelos más caros con regímenes de mantenimiento más complejos que se usan a menudo en este contexto. Los sensores de temperatura con salidas analógicas se han utilizado típicamente en *dataloggers* y estaciones meteorológicas debido a su alta precisión, como termistores, termopares y resistencias dependientes de la temperatura (RTDs). Sin embargo, el coste de un sistema basado en RTD con una sonda Pt100 más el cableado y la tarjeta de adquisición de datos puede ascender a cientos de euros. Los resultados mostraron un intervalo de confianza (95%) de exactitud inferior a  $\pm 0.5$  °C para todos los modelos de sensores analizados. Este valor es adecuado para la monitorización ambiental de áreas protegidas, parques nacionales o redes extensas de áreas naturales. Los resultados también verificaron que la información de error proporcionada por los fabricantes era correcta. Sin embargo, si que aparecieron diferencias significativas de repetibilidad "intramodelo". Se

estima que el 75% de la incertidumbre de la temperatura se puede atribuir a variabilidades en los procesos de fabricación. El modelo DHT22 era el que mostraba un mejor rendimiento en los parámetros de precisión y repetibilidad. Sin embargo, se recomienda realizar un control individual para cada unidad de sensor antes de su integración en una WSN, lo que puede reducir, por ejemplo, la incertidumbre del sensor DHT22 hasta en un 19%. En cuanto al uso de estos modelos de sensores en un ambiente exterior, se aconseja que tanto para el sensor DHT22 como el TMP102, se emplacen dentro de una garita protectora en lugar de encapsulaciones aplicadas directamente al módulo del sensor que, por ejemplo, en el caso de DHT22 impediría el uso del otro sensor de humedad incluido también en el mismo módulo. En la actualidad, solamente el modelo DS18B20 se vende con algún tipo de encapsulación específica para este propósito. Por último, se considera que los resultados de las pruebas proporcionadas en ese trabajo pueden servir de ayuda en el diseño de futuros sistemas de monitorización ambiental, asegurando así que las características son adecuadas para los requisitos de exactitud, precisión y estabilidad a un menor coste.

Finalmente, el artículo 3 presentó una metodología de reducción de escala para mapas climáticos especialmente útiles en la monitorización ambiental de zonas de relieve complejo. Precisamente, encontrar una forma para validar esta



metodología fue el origen de los trabajos desarrollados en los dos artículos anteriores y, por ende, del desarrollo de este trabajo de tesis. Los mapas de temperaturas con una resolución moderada o baja están comúnmente disponibles, pero no pueden representar adecuadamente microclimas y microrefugios de fauna y vegetación ya que se basan en estimaciones climáticas demasiado groseras o que ignoran factores climáticos relevantes como la topografía. Este problema empeora en las zonas montañosas donde los contrastes locales son más fuertes y las estaciones meteorológicas más escasas. Los métodos de reducción de escala intentan resolver este problema usando una variedad de procedimientos diferentes, en concreto, en este trabajo se propuso un método geométrico simple. La principal ventaja de este método es la reducida cantidad de datos de entrada que necesita, concretamente necesita el MDE de la zona de estudio, algunas rutinas software de código de libre disposición y, adicionalmente, el día del año de referencia y la latitud del área de estudio. Los resultados obtenidos parecen razonables si se comparan con imágenes térmicas de satélite, y muestran que la corrección mejora fuertemente la correlación cuando el método de reducción de escala se aplica a los mapas de temperaturas convencionales. Por tanto, y aunque subsisten limitaciones que ya se comentaron en el apartado de discusión, los datos de las estaciones climáticas pueden utilizarse para producir mapas de temperaturas de alta resolución y, por

consiguiente, de utilidad para modelar procesos ecológicos, geomorfológicos y del suelo a gran escala para grandes áreas.

Como conclusión final, puede afirmarse que técnicas como la modelización con SIG, el uso de imágenes de satélite, imágenes de cámaras térmicas y las redes inalámbricas de sensores para supervisión medioambiental serán las nuevas formas de aproximarse a la cartografía climática en un futuro no muy lejano.

# **Capítulo 6**

---

## **Trabajo futuro**

El autor de esta tesis y su director tienen diseñado la realización de un trabajo futuro cuyo objetivo general es monitorizar y medir los cambios espaciales y temporales de temperatura en un área de estudio de relieve complejo durante los próximos años. En cuanto a los objetivos específicos son: 1) diseñar y desplegar una WSN para la caracterización de la diversidad microclimática de un área de estudio con terreno complejo, 2) elaborar los mapas de temperaturas empleando el método de *downscaling* propuesto en esta tesis y, 3) validar esta metodología con mediciones *in situ*. Como área de estudio se ha seleccionado una zona de la comarca de Sierra de Gata afectada por los incendios de 2016 y otra sin quemar en la misma zona, que servirán además para comparar los contrastes térmicos producidos. La WSN tomará datos cada hora y los resultados serán comparados con las imágenes de satélite e instantáneas tomadas con una cámara térmica sobre el terreno para validar esta metodología de reducción de escala.

En el momento de escribir este apartado, aún no se dispone del material y equipos necesarios para el desarrollo de la WSN, aunque si está concedida una ayuda para este equipamiento a través de la convocatoria de infraestructura científico-tecnológica 2015. Por tanto, debido al condicionante de los plazos establecidos por el procedimiento administrativo hasta la

resolución definitiva del concurso de provisión, se ha realizado la siguiente planificación provisional del trabajo:

- i. obtener los mapas de temperaturas de la zona para el segundo semestre de 2017,
- ii. realizar una prueba del sistema y un primer despliegue (15-20 nodos) en la zona durante ese mismo semestre y,
- iii. un segundo despliegue (hasta 40 nodos totales) durante el primer semestre de 2018.

De esta forma, se estima que a finales del segundo semestre de 2018 se dispondría de series de datos completas de temperaturas de varios meses para realizar un primer análisis de idoneidad de la solución.



# Referencias

---

Abbasi, A. A., & Younis, M. (2007). A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks. *Computer Communications*, *30*(14–15), 2826–2841. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2007.05.024>

Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, *38*(4), 393–422. [https://doi.org/10.1016/S1389-1286\(01\)00302-4](https://doi.org/10.1016/S1389-1286(01)00302-4)

Alam, S. A., & Starr, M. (2013). Impacts of climate change on savannah woodland biomass carbon density and water-use: a modelling study of the Sudanese gum belt region. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, *18*(7), 979–999. <https://doi.org/10.1007/s11027-012-9403-5>

Amaldi, E., Capone, A., Cesana, M., Filippini, I., & Malucelli, F. (2008). Optimization models and methods for planning wireless mesh networks. *Computer Networks*, *52*(11), 2159–2171. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2008.02.020>

Antoine-Santoni, T., Santucci, J.-F., de Gentili, E., Silvani, X., & Morandini, F. (2009). Performance of a protected wireless sensor network in a fire. Analysis of fire spread and data transmission. *Sensors*, *9*(8), 5878–93. <https://doi.org/10.3390/s90805878>

Aosong Electronics Co., L. (2014). DHT22 Datasheet. Retrieved February 22, 2016, from <http://www.aosong.com/en/products/details.asp?id=117>

Arduino. (2014). Arduino UNO. Retrieved June 29, 2016, from <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>

Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, *54*(15), 2787–2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>

Ayday, C., & Safak, S. (2009). Application of Wireless Sensor Networks with GIS on the Soil Moisture Distribution Mapping. In *Proceedings of International Symposium GIS Ostrava 2009* (pp. 1–6). Ostrava, Czech Republic.



Baggio, A. (2005). Wireless sensor networks in precision agriculture. In *Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks* (pp. 107–108). Stockholm, Sweden.

Bainbridge, S., Eggeling, D., & Page, G. (2011). Lessons from the Field—Two Years of Deploying Operational Wireless Sensor Networks on the Great Barrier Reef. *Sensors*, *11*(12), 6842–6855. <https://doi.org/10.3390/s110706842>

Ball, G. H., & Hall, D. J. (1965). Isodata, a novel method of data analysis and pattern classification. Menlo Park, California: Stanford Research Institute.

Baronti, P., Pillai, P., & Chook, V. (2007). Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15. 4 and ZigBee standards. *Computer Communications*, *30*(7), 1655–1695. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.comcom.2006.12.020>

Barrenetxea, G., Ingelrest, F., Schaefer, G., Vetterli, M., Couach, O., & Parlange, M. (2008). SensorScope: Out-of-the-Box Environmental Monitoring. In *Information Processing in Sensor Networks, 2008. IPSN '08. International Conference on* (pp. 332–343). <https://doi.org/10.1109/IPSN.2008.28>

Bedia, J., Herrera, S., & Gutiérrez, J. M. (2013). Dangers of using global bioclimatic datasets for ecological niche modeling. Limitations for future climate projections. *Global and Planetary Change*, *107*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.04.005>

Beier, C. M., Signell, S. A., Luttman, A., & DeGaetano, A. T. (2012). High-resolution climate change mapping with gridded historical climate products. *Landscape Ecology*, *27*(3), 327–342. <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9698-8>

Benestad, R. E., Hanssen-Bauer, I., & Chen, D. (2008). *Empirical-statistical downscaling*. New Jersey: World Scientific Publishers.

- Bigg, G. (1991). Kriging and intraregional rainfall variability in England. *International Journal of Climatology*, 11(6), 663–675. <https://doi.org/10.1002/joc.3370110608>
- Blain, S., Guillou, J., Tréguer, P., Woerther, P., Delauney, L., Follenfant, E., ... Vuillemin, R. (2004). High frequency monitoring of the coastal marine environment using the MAREL buoy. *Journal of Environmental Monitoring*, 6(6), 569–575. <https://doi.org/10.1039/B314073C>
- Britton, M., & Sacks, L. (2004). The SECOAS Project: Development of a Self-Organising, Wireless Sensor Network for Environmental Monitoring. In *2nd Workshop on Sensor and Actor Network Protocols*. Boston, Massachusetts, USA. Retrieved from <http://www.cs.kent.ac.uk/projects/secoas/papers/SANPA-2004-Britton.pdf>
- Buratti, C., Conti, A., Dardari, D., & Verdone, R. (2009). An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and Evolution. *Sensors*, 9(9), 6869–6896. <https://doi.org/10.3390/s90906869>
- Caillouet, L., Vidal, J.-P., Sauquet, E., & Graff, B. (2016). Probabilistic precipitation and temperature downscaling of the Twentieth Century Reanalysis over France. *Climate of the Past*, 12(3), 635–662. <https://doi.org/10.5194/cp-12-635-2016>
- Calvo, S., Ciraolo, G., & Loggia, G. La. (2003). Monitoring Posidonia oceanica meadows in a Mediterranean coastal lagoon (Stagnone, Italy) by means of neural network and ISODATA classification methods. *International Journal of Remote Sensing*, 24(13), 2703–2716. <https://doi.org/10.1080/0143116031000066882>
- Cano, A., Lopez-Baeza, E., Anon, J. L., Reig, C., & Millan-Scheding, C. (2007). Wireless Sensor Network for Soil Moisture Applications. In *2007 International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM 2007)* (pp. 508–513). Valencia, SPAIN: IEEE. <https://doi.org/10.1109/SENSORCOMM.2007.4394971>

- Cardell-Oliver, R., Kranz, M., Smettem, K., & Mayer, K. (2005). A Reactive Soil Moisture Sensor Network: Design and Field Evaluation. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 1(2), 149–162. <https://doi.org/10.1080/15501320590966422>
- Chavan, S. B., Kadam, P. A., & Sawant, S. R. (2009). Embedded web server for monitoring environmental parameters. *INSTRUMENTS AND EXPERIMENTAL TECHNIQUES*, 52(6), 784–787. <https://doi.org/10.1134/S0020441209060050>
- Choi, S., Kim, N., Cha, H., & Ha, R. (2009). Micro sensor node for air pollutant monitoring: hardware and software issues. *Sensors*, 9(10), 7970–87. <https://doi.org/10.3390/s91007970>
- Collins, F. C., & Bolstad, P. V. (1996). A comparison of spatial interpolation techniques in temperature estimation. In *NCGIA Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modelling*. Retrieved from [http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA\\_FE\\_CD-ROM/sf\\_papers/collins\\_fred/collins.html](http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/collins_fred/collins.html)
- Collins, F. C., & Bolstad, P. V. (1996). A comparison of spatial interpolation techniques in temperature estimation. In *NCGIA Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*. Santa Fe, NM, USA: US National Center for Geographic Information and Analysis.
- Corke, P., Wark, T., Jurdak, R., Hu, W., Valencia, P., & Moore, D. (2010). Environmental Wireless Sensor Networks. *Proceedings of the IEEE*, 98(11), 1903–1917. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2068530>
- Coulibaly, P., Dibike, Y. B., & Anctil, F. (2005). Downscaling Precipitation and Temperature with Temporal Neural Networks. *Journal of Hydrometeorology*, 6(4), 483–496. <https://doi.org/10.1175/JHM409.1>
- Cunningham, K., & Schrage, L. (2013). *LINGO: The modeling language and optimizer*. LINDO Systems, Chicago, Illinois. Chicago, Illinois, USA: Lindo

Systems Inc. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:LINGO.+The+Modeling+Language+and+Optimizer#0>

Delin, K. a., Jackson, S. P., Johnson, D. W., Burleigh, S. C., Woodrow, R. R., McAuley, J. M., ... Baker, V. R. (2005). Environmental Studies with the Sensor Web: Principles and Practice. *Sensors*, 5(1), 103–117. <https://doi.org/10.3390/s5010103>

Dingman, S. L., Seely-Reynolds, D. M., & Reynolds, R. C. (1988). Application of kriging to estimating mean annual precipitation in a region of orographic influence. *Journal of the American Water Resources Association*, 24(2), 329–339. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1988.tb02991.x>

Dubois, G., Malczewski, J., & De Cort, M. J. M. R. (1998). Spatial interpolation comparison 97: Foreword and introduction. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 2(1–2).

Duhan, D., & Pandey, A. (2015). Statistical downscaling of temperature using three techniques in the Tons River basin in Central India. *Theoretical and Applied Climatology*, 121(3–4), 605–622. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1253-5>

Feidas, H., Karagiannidis, A., Keppas, S., Vaitis, M., Kontos, T., Zanis, P., ... Anadranistakis, E. (2014). Modeling and mapping temperature and precipitation climate data in Greece using topographical and geographical parameters. *Theoretical and Applied Climatology*, 118(1–2), 133–146. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-1052-4>

Felicísimo, A. M., Muñoz, J., Villalba, C. J., & Mateo, R. G. (2011). *Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático de la biodiversidad española. 1. Flora y vegetación*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

Felicísimo Pérez, A. M., Morán López, R., Sánchez Guzmán, J. M., & Pérez Mayo, D. (2001). Elaboración del atlas climático de Extremadura mediante

un Sistema de Información Geográfica. *International Review of Geographical Information Science and Technology*, 1, 17–23.

Fernández Cepedal, G., & Felicísimo, A. M. (1987). Método de cálculo de la radiación solar incidente en áreas con apantallamiento topográfico. *Revista de Biología de La Universidad de Oviedo*, 5, 109–119.

Fridley, J. D. (2009). Downscaling Climate over Complex Terrain: High Finescale (<1000 m) Spatial Variation of Near-Ground Temperatures in a Montane Forested Landscape (Great Smoky Mountains)\*. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(5), 1033–1049. <https://doi.org/10.1175/2008JAMC2084.1>

Gandham, S. R., Dawande, M., Prakash, R., & Venkatesan, S. (2003). Energy efficient schemes for wireless sensor networks with multiple mobile base stations. In *GLOBECOM '03. IEEE Global Telecommunications Conference* (Vol. 1, pp. 377–381). San Francisco, CA, USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2003.1258265>

Gao, Z., Jia, Y., Zhang, H., & Li, X. (2012). A Design of Temperature and Humidity Remote Monitoring System Based on Wireless Sensor Network Technology. In *2012 International Conference on Control Engineering and Communication Technology* (pp. 896–899). 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCECT.2012.223>

Gerelchuluun, B., & Ahn, J.-B. (2014). Air temperature distribution over Mongolia using dynamical downscaling and statistical correction: MONGOLIAN TEMPERATURE REPRODUCTION USING WRF AND A CORRECTION METHOD. *International Journal of Climatology*, 34(7), 2464–2476. <https://doi.org/10.1002/joc.3853>

Gerlitz, L. (2015). Using fuzzified regression trees for statistical downscaling and regionalization of near surface temperatures in complex terrain: A case study from Khumbu Himal. *Theoretical and Applied Climatology*, 122(1–2), 337–352. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1285-x>

Gobbett, D., Handcock, R., Zerger, A., Crossman, C., Valencia, P., Wark, T., & Davies, M. (2013). Prototyping an Operational System with Multiple Sensors for Pasture Monitoring. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 2(3), 388–408. <https://doi.org/10.3390/jsan2030388>

Guerra Álvarez, N., & Crawford Labrín, B. (2006). Optimización de funciones a través de Optimización por Enjambre de Partículas y Algoritmos Genéticos. In *32a Conferencia Latinoamericana de Informática*. Santiago, Chile. Retrieved from [http://pitagoras.usach.cl/~gfelipe/clei/sesiones/sesion\\_6/Pdf\\_6/254.pdf](http://pitagoras.usach.cl/~gfelipe/clei/sesiones/sesion_6/Pdf_6/254.pdf)

Hakala, I., Tikkakoski, M., & Kivela, I. (2008). Wireless Sensor Network in Environmental Monitoring - Case Foxhouse. In *Sensor Technologies and Applications, 2008. SENSORCOMM '08. Second International Conference on* (pp. 202–208). <https://doi.org/10.1109/SENSORCOMM.2008.27>

Hart, J. K., & Martinez, K. (2006). Environmental Sensor Networks: A revolution in the earth system science? *Earth-Science Reviews*, 78(3–4), 177–191. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.05.001>

Hatfield, J. L. (2001). Upscaling and Downscaling Methods for Environmental Research. *Journal of Environment Quality*, 30(3), 1100. <https://doi.org/10.2134/jeq2001.3031100x>

Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965–1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>

Hillier, F. S., & Liberman, G. J. (2010). *Introducción a la Investigación de Operaciones* (9th ed.). McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.

Holon, F., Mouquet, N., Boissery, P., Bouchoucha, M., Delaruelle, G., Tribot, A.-S., & Deter, J. (2015). Fine-Scale Cartography of Human Impacts along French Mediterranean Coasts: A Relevant Map for the Management

- of Marine Ecosystems. *PLOS ONE*, 10(8), e0135473. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135473>
- Hou, X. Q., & Wang, X. D. (2013). Wireless Data Transmission Based on GPRS in Greenhouse Monitoring System. *Applied Mechanics and Materials*, 303–306, 2054–2057. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.303-306.2054>
- Hou, Y. T., Sherali, H. D., & Midkiff, S. F. (2005). On energy provisioning and relay node placement for wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 4(5), 2579–2590. <https://doi.org/10.1109/TWC.2005.853969>
- Hu, F., Chen, C. R., & Li, X. (2013). Design of Wireless Water-Saving Irrigation Controller. *Applied Mechanics and Materials*, 278–280, 1577–1580. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.278-280.1577>
- Hulea, M., Mois, G., Folea, S., Miclea, L., & Biscu, V. (2013). Wi-sensors: A low power Wi-Fi solution for temperature and humidity measurement. In *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 4011–4015). 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/IECON.2013.6699777>
- Hutchinson, M. F. (1991a). Climatic analyses in data sparse regions. *Climatic Risk in Crop Production. Models and Management for the Semiarid Tropics and Subtropics*, 55–71.
- Hutchinson, M. F. (1991b). The application of thin plate smoothing splines to continentwide data assimilation. *BMRC Research Report*, 27, 104–113.
- International Standards Organization. (2005). ISO/IEC 17025:2005. Retrieved December 11, 2015, from <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:17025:ed-2:v1:es>
- Irvin, B. J., Ventura, S. J., & Slater, B. K. (1997). Fuzzy and isodata classification of landform elements from digital terrain data in Pleasant

Valley, Wisconsin. *Geoderma*, 77(2–4), 137–154.  
[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00019-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00019-0)

Jankovec, M., & Topič, M. (2013). Intercomparison of Temperature Sensors for Outdoor Monitoring of Photovoltaic Modules. *Journal of Solar Energy Engineering*, 135(3), 31012. <https://doi.org/10.1115/1.4023518>

Jena, R. K. (2010). Multi-Objective Node Placement Methodology for Wireless Sensor Network. *International Journal of Computer Applications. Special Issue on MANETs*, 2, 84–88. <https://doi.org/10.5120/1017-58>

Jena, R. K., & Mahanti, P. K. (2012). Node Placement for Wireless Sensor Network Using Multi-objective. In *2012 International Conference on Computer Technology and Science* (Vol. 47, pp. 53–58). Singapore, INDIA: IACSIT Press. <https://doi.org/10.7763/IPCSIT.2012.V47.11>

Jia, J., Chen, J., Chang, G., Wen, Y., & Song, J. (2009). Multi-objective optimization for coverage control in wireless sensor network with adjustable sensing radius. *Computers & Mathematics with Applications*, 57(11–12), 1767–1775. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2008.10.037>

John G. Webster. (1998). *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*. (C. Press, Ed.). IEEE Press.

Jourdan, D. B., & de Weck, O. L. (2004). Layout optimization for a wireless sensor network using a multi-objective genetic algorithm. In *IEEE 59th Vehicular Technology Conference* (Vol. 5, pp. 2466–2470). IEEE. <https://doi.org/10.1109/VETECS.2004.1391366>

JP Selecta. (2014). Precision Thermometer 1001267. Retrieved June 26, 2015, from [http://www.grupo-selecta.com/en/catalogo/productos/145/GLASS\\_THERMOMETERS](http://www.grupo-selecta.com/en/catalogo/productos/145/GLASS_THERMOMETERS)

JP Selecta. (2015). Immersion Thermostats and Dry-Blocks. Retrieved September 23, 2015, from [http://www.grupo-selecta.com/en/catalogo/subcategorias/10/immersion\\_thermostats\\_and\\_dry\\_blocks](http://www.grupo-selecta.com/en/catalogo/subcategorias/10/immersion_thermostats_and_dry_blocks)



- Kotamäki, N., Thessler, S., Koskiahho, J., Hannukkala, A. O., Huitu, H., Huttula, T., ... Järvenpää, M. (2009). Wireless in-situ Sensor Network for Agriculture and Water Monitoring on a River Basin Scale in Southern Finland: Evaluation from a Data User's Perspective. *Sensors*, *9*(4), 2862–83. <https://doi.org/10.3390/s90402862>
- Kumar, L., Skidmore, A. K., & Knowles, E. (1997). Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment. *International Journal of Geographical Information Science*, *11*(5), 475–497. <https://doi.org/10.1080/136588197242266>
- Kumarawadu, P., Dechene, D. J., Luccini, M., & Sauer, A. (2008). Algorithms for Node Clustering in Wireless Sensor Networks: A Survey. In *2008 4th International Conference on Information and Automation for Sustainability* (pp. 295–300). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIAFS.2008.4783999>
- Lam, N. S.-N., Qiang, Y., Arenas, H., Brito, P., & Liu, K. (2015). Mapping and assessing coastal resilience in the Caribbean region. *Cartography and Geographic Information Science*, *42*(4), 315–322. <https://doi.org/10.1080/15230406.2015.1040999>
- Landgraf, M., Matulla, C., & Haimberger, L. (2015). Statistically downscaled projections of local scale temperature in the topographically complex terrain of Austria up to the end of the 21st century. *Meteorologische Zeitschrift*, *24*(4), 425–440. <https://doi.org/10.1127/metz/2015/0620>
- Larios, D. F., Barbancho, J., Sevillano, J. L., Rodríguez, G., Molina, F. J., Gasull, V. G., ... León, C. (2013). Five years of designing wireless sensor networks in the doñana biological reserve (Spain): an applications approach. *Sensors (Basel, Switzerland)*, *13*(9), 12044–69. <https://doi.org/10.3390/s130912044>

Lennon, J. J., & Turner, J. R. G. (1995). Predicting the Spatial Distribution of Climate: Temperature in Great Britain. *Journal of Animal Ecology*, *64*(3), 370–392.

Li, C., Chen, D., Wu, D., & Su, X. (2015). Design of an EIoT system for nature reserves: a case study in Shangri-La County, Yunnan Province, China. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, *22*(2), 184–188. <https://doi.org/10.1080/13504509.2014.943329>

Li, J., & Sheng, Y. (2012). An automated scheme for glacial lake dynamics mapping using Landsat imagery and digital elevation models: a case study in the Himalayas. *International Journal of Remote Sensing*, *33*(16), 5194–5213. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.657370>

Li, M., & Liu, Y. (2009). Underground coal mine monitoring with wireless sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, *5*(2), 1–29. <https://doi.org/10.1145/1498915.1498916>

Li, X., Cheng, X., Yan, K., & Gong, P. (2010). A monitoring system for vegetable greenhouses based on a wireless sensor network. *Sensors*, *10*(10), 8963–80. <https://doi.org/10.3390/s101008963>

Liu, Q., Zhao, Z., Li, Y.-X., & Li, Y. (2012). Feature selection based on sensitivity analysis of fuzzy ISODATA. *Neurocomputing*, *85*, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2012.01.005>

Liu, S., Yuan, Z., & Chen, Y. (2016). Design of Wireless Temperature Measuring System Based on the nRF24101. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, *7*(2), 314–317. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2016.070244>

Lobo, A., & Rebollar, J. L. G. (2010). Model-based discriminant analysis of Iberian potential vegetation and bio-climatic indices. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, *35*(1–2), 52–56. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.03.010>

- Lopes Pereira, R., Trindade, J., Gonçalves, F., Suresh, L., Barbosa, D., & Vazão, T. (2014). A wireless sensor network for monitoring volcano-seismic signals. *Natural Hazards and Earth System Science*, *14*(12), 3123–3142. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-3123-2014>
- López, J. a., Garcia-Sanchez, A.-J., Soto, F., Iborra, A., Garcia-Sanchez, F., & Garcia-Haro, J. (2010). Design and validation of a wireless sensor network architecture for precision horticulture applications. *Precision Agriculture*, *12*(2), 280–295. <https://doi.org/10.1007/s11119-010-9178-1>
- Marks, M. (2010). A Survey of Multi-Objective Deployment in Wireless Sensor Networks. *Journal of Telecommunications and Information Technology*, *3*, 36–41. Retrieved from <http://www.nit.eu/czasopisma/JTIT/2010/3/36.pdf>
- Martín-Tardío, M., & Felicísimo, Á. (2014). Design of a WSN for the Sampling of Environmental Variability in Complex Terrain. *Sensors*, *14*(11), 21826–21842. <https://doi.org/10.3390/s141121826>
- Martin Tardio, M. A. (2010). *Estudio de los sistemas de apoyo a la decisión en el ámbito de la viticultura de precisión*. Mérida, Badajoz (SPAIN).
- Martinez, K., Riddoch, A., Hart, J., & Ong, R. (2006). A Sensor Network for Glaciers. In Mi. (2) Alan Steventon BSc, MTech, PhD, CPhys & M. Steve Wright MA, PhD, CEng (Eds.), *Intelligent Spaces* (pp. 125–139). London: SPRINGER. [https://doi.org/10.1007/978-1-84628-429-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-1-84628-429-8_9)
- Martínez Bohórquez, M. A. (2009). *Aportaciones a la instrumentación electrónica en la optimización de sistemas basados en energía solar*. Universidad de Huelva. Retrieved from [http://files.bartolomevazquezbernal.webnode.es/200000081-2d54f2e4df/BVB\\_IICVFP.pdf](http://files.bartolomevazquezbernal.webnode.es/200000081-2d54f2e4df/BVB_IICVFP.pdf)
- Martínez Bohórquez, M. A., Andújar Márquez, J. M., & Enrique Gómez, J. M. (2014). Temperature Measurement in PV Facilities on a Per-Panel Scale. *Sensors*, *14*(8), 13308–13323. <https://doi.org/10.3390/s140813308>

Martínez Bohórquez, M. A., Enrique Gómez, J. M., & Andújar Márquez, J. M. (2009). A new and inexpensive temperature-measuring system: Application to photovoltaic solar facilities. *Solar Energy*, *83*(6), 883–890. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.12.007>

Mateo, R. G., de la Estrella, M., Felicísimo, Á. M., Muñoz, J., & Guisan, A. (2013). A new spin on a compositionalist predictive modelling framework for conservation planning: A tropical case study in Ecuador. *Biological Conservation*, *160*, 150–161. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.01.014>

Maxim Integrated. (2014). Guidelines for Reliable Long Line 1-Wire Networks. Retrieved February 10, 2016, from <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/148>

Maxim Integrated. (2015). DS18B20 Datasheet. Retrieved February 4, 2016, from <https://www.maximintegrated.com/en/products/analog/sensors-and-sensor-interface/DS18B20.html>

Meineri, E., & Hylander, K. (2016). Fine-grain, large-domain climate models based on climate station and comprehensive topographic information improve microrefugia detection. *Ecography*. <https://doi.org/10.1111/ecog.02494>

Molina, G., Alba, E., & Talbi, E.-G. (2008). Optimal Sensor Network Layout Using Multi-Objective Metaheuristics. *Journal of Universal Computer Science*, *14*(15), 2549–2565.

Nadimi, E. S., Jørgensen, R. N., Blanes-Vidal, V., & Christensen, S. (2012). Monitoring and classifying animal behavior using ZigBee-based mobile ad hoc wireless sensor networks and artificial neural networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, *82*, 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.12.008>

National Instruments. (2010). NI FP-1001. Retrieved June 29, 2016, from <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/2181#>

Ninyerola, M. (2000). *Modelització climàtica mitjançant tècniques SIG i la seva aplicació a l'anàlisi quantitativa de la distribució d'espècies vegetals a l'Espanya peninsular*. Universitat Autònoma de Barcelona.

Ninyerola, M., Pons, X., & Roure, J. M. (2000). A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques. *International Journal of Climatology*, 20, 1823–1841.

O'Flynn, B., Martinez, R., Cleary, J., Slater, C., Regan, F., Diamond, D., & Murphy, H. (2007). SmartCoast: A Wireless Sensor Network for Water Quality Monitoring. In *Local Computer Networks, 2007. LCN 2007. 32nd IEEE Conference on* (pp. 815–816). <https://doi.org/10.1109/LCN.2007.34>

Oliveira, L. M., & Rodrigues, J. J. (2011). Wireless Sensor Networks: a Survey on Environmental Monitoring. *Journal of Communications*, 6(2), 143–151. <https://doi.org/10.4304/jcm.6.2.143-151>

Opensource.com. (2017). What is open hardware? Retrieved February 1, 2017, from <https://opensource.com/resources/what-open-hardware>

Pearce, J. M. (2012). Building Research Equipment with Free, Open-Source Hardware. *Science*, 337(6100), 1303–1304. <https://doi.org/10.1126/science.1228183>

Pellissier, L., Litsios, G., Fiedler, K., Pottier, J., Dubuis, A., Pradervand, J.-N., ... Guisan, A. (2012). Loss of interactions with ants under cold climate in a regional myrmecophilous butterfly fauna. *Journal of Biogeography*, 39(10), 1782–1790. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2012.02743.x>

Polastre, J., Szewczyk, R., Mainwaring, A., Culler, D., & Anderson, J. (2004). Analysis of Wireless sensor Networks for Habitat Monitoring. In C. S. Raghavendra, K. M. Sivalingam, & T. Znati (Eds.), *Wireless Sensor Networks* (pp. 399–423). Norwell, MA, USA: Kluwer Academic Publishers. Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1013825.1013844>

Porter, J., Arzberger, P., Braun, H.-W., Bryant, P., Gage, S., Hansen, T., ... Williams, T. (2005). Wireless Sensor Networks for Ecology. *BioScience*,

55(7), 561. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2005\)055\[0561:WSNFE\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2005)055[0561:WSNFE]2.0.CO;2)

Qian, Y., Luo, Z., Liu, Z., Zhao, H., Li, C., Song, Y., ... Wei, J. (2014). Application of RTD Sensor in the Real Time Measurement and Wireless Transmission. In *2014 Fourth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control* (pp. 658–662). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IMCCC.2014.140>

Saveliev, A. A., Mucharamova, S. S., & Piliugin, G. A. (1998). Modeling of the daily rainfall values using surfaces under tension and kriging. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, *2*(2), 58–71.

Saveliev, A. A., Mucharamova, S. S., & Piliugin, G. A. (1998). Modeling of the daily rainfall values using surfaces under tension and kriging. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, *2*(2), 58–71.

SBS. (2015). Termostado de Inmersión TI-07. Retrieved June 29, 2016, from <http://www.ictsl.net/productos/aparatos/termostatodeinmersionti7sbs.html>

Seders, L. A., Shea, C. A., Lemmon, M. D., Maurice, P. A., & Talley, J. W. (2007). LakeNet: An Integrated Sensor Network for Environmental Sensing in Lakes. *Environmental Engineering Science*, *24*(2), 183–191. <https://doi.org/10.1089/ees.2006.0044>

Seoane, J., Viñuela, J., Díaz-Delgado, R., & Bustamante, J. (2003). The effects of land use and climate on red kite distribution in the Iberian peninsula. *Biological Conservation*, *111*(3), 401–414. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(02\)00309-9](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(02)00309-9)

Sharma, G., & Bhattacharjee, D. (2016). Optimization of Sensor and Wireless Network for Forest Fire Detection. *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, *9*(3), 47–56. <https://doi.org/10.14257/ijfgcn.2016.9.3.05>

Slavich, E., Warton, D. I., Ashcroft, M. B., Gollan, J. R., & Ramp, D. (2014). Topoclimate versus macroclimate: how does climate mapping methodology

affect species distribution models and climate change projections? *Diversity and Distributions*, 20(8), 952–963. <https://doi.org/10.1111/ddi.12216>

Texas Instruments. (2014). TMP102 Datasheet. Retrieved February 7, 2016, from <http://www.ti.com/product/tmp112>

Tolle, G., Polastre, J., Szewczyk, R., Culler, D., Turner, N., Tu, K., ... Hong, W. (2005). A macroscope in the redwoods. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems* (pp. 51–63). San Diego, CA, USA: ACM. <https://doi.org/10.1145/1098918.1098925>

Torán, F., Ramírez, D., Navarro, A. E., Casans, S., Pelegrí, J., & Espí, J. M. (2001). Design of a virtual instrument for water quality monitoring across the Internet. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 76(1–3), 281–285. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(01\)00584-6](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(01)00584-6)

Trzaska, S., & Schnarr, E. (2014). *A Review of Downscaling Methods for Climate Change Projections*. (P. Caffrey & A. Farmer, Eds.). Burlington, Vermont: United States Agency for International Development by Tetra Tech ARD.

Vairamani, K., Mathivanan, N., Venkatesh, K. A., & Kumar, U. D. (2013). Environmental parameter monitoring using wireless sensor network. *INSTRUMENTS AND EXPERIMENTAL TECHNIQUES*, 56(4), 468–471. <https://doi.org/10.1134/S0020441213040118>

Valverde, J., Rosello, V., Mujica, G., Portilla, J., Uriarte, A., & Riesgo, T. (2012). Wireless Sensor Network for Environmental Monitoring: Application in a Coffee Factory. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 8(1), 638067. <https://doi.org/10.1155/2012/638067>

Vanderzee, D., & Ehrlich, D. (1995). Sensitivity of ISODATA to changes in sampling procedures and processing parameters when applied to AVHRR time-series NDV1 data. *International Journal of Remote Sensing*, 16(4), 673–686. <https://doi.org/10.1080/01431169508954433>

Vazirani, V. V. (2003). Set Cover. In *Approximation Algorithms* (pp. 15–26). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-04565-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-662-04565-7_2)

Wang, H., Zhang, T., Quan, Y., & Dong, R. (2013). Research on the framework of the Environmental Internet of Things. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 20(3), 199–204. <https://doi.org/10.1080/13504509.2013.783517>

Wark, T., Hu, W., Corke, P., Hodge, J., Keto, A., Mackey, B., ... Brunig, M. (2008). Springbrook: Challenges in developing a long-term, rainforest wireless sensor network. In *2008 International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing* (pp. 599–604). Sydney, Australia: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISSNIP.2008.4762055>

Watson, J.-P., Greenberg, H. J., & Hart, W. E. (2004). A multiple-objective analysis of sensor placement optimization in water networks. In *Proceedings of the World Water and Environment Resources Congress* (pp. 1–10). Salt Lake City, UT, USA: American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/40737\(2004\)456](https://doi.org/10.1061/40737(2004)456)

Werner-Allen, G., & Lorincz, K. (2006). Deploying a wireless sensor network on an active volcano. *IEEE Internet Computing ...*, 10(April), 18–25. Retrieved from [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=1607983](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1607983)

Yick, J., Bharathidasan, A., Pasternack, G., Mukherjee, B., & Ghosal, D. (2004). Optimizing placement of beacons and data loggers in a sensor network - a case study. In *2004 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (IEEE Cat. No.04TH8733)* (pp. 2486–2491). Atlanta, GA, USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/WCNC.2004.1311479>

Yick, J., Mukherjee, B., & Ghosal, D. (2008). Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 52(12), 2292–2330. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2008.04.002>



- Yick, J., Pasternack, G., Mukherjee, B., & Ghosal, D. (2006). Placement of network services in a sensor network. *International Journal of Wireless and Mobile Computing*, 1(2), 101–112. <https://doi.org/10.1504/IJWMC.2006.012469>
- Younis, M., & Akkaya, K. (2008). Strategies and techniques for node placement in wireless sensor networks: A survey. *Ad Hoc Networks*, 6(4), 621–655. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2007.05.003>
- Zhang, C., He, X.-F., Li, S.-Y., Cheng, Y.-Q., & Rao, Y. (2015). A Wind Energy Powered Wireless Temperature Sensor Node. *Sensors*, 15(3), 5020–5031. <https://doi.org/10.3390/s150305020>
- Zimmermann, N. E., & Kienast, F. (1999). Predictive mapping of alpine grasslands in Switzerland: Species versus community approach. *Journal of Vegetation Science*, 10, 469–482.