

Conclusiones

El centrarnos en el desarrollo de un sistema que permita contar y obtener características de los árboles ubicados en los parques urbanos de Cuenca es el objetivo principal de este proyecto; así, se muestra a la ciudadanía el tipo de árboles con los que se cuenta, la cantidad de individuos forestales por especie y su estado de vigorosidad, características que son una fuente de información para concientizar sobre el cuidado de la importancia del árbol en la calidad ambiental de la ciudad. Los análisis que se hacen en base a todos los individuos dentro del inventario forestal ayudan tanto a ciudadanos como a autoridades para tomar acciones y formar parte de mejoramientos de nuestras áreas verdes, así como lo ha aplicado el proyecto mencionado del Ayuntamiento de Madrid, en el cual los ciudadanos, a través de este portal web, pueden solicitar nuevas plantaciones o sugerencias de mantenimiento, algo que permite la interacción directa de la ciudadanía con los responsables de las áreas verdes.

Uno de los limitantes encontrados es que al estar en una ciudad con clima muy variable la captura de fotografías aéreas con drones se hace más complicado y por consiguiente el desarrollo de los productos como ortofotografías requieren mayor tiempo. De igual manera sucede con el levantamiento de información de campo.

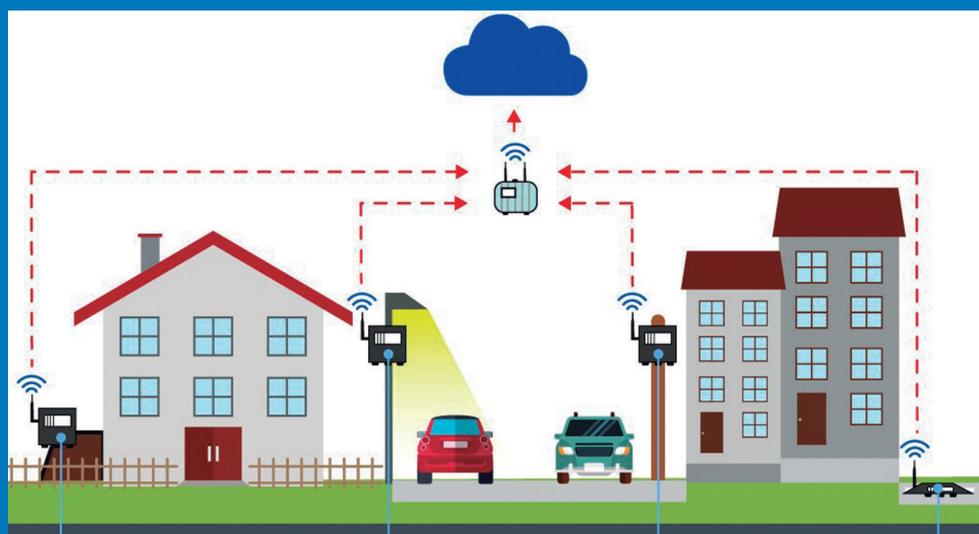
En base a todas las experiencias y requerimientos durante el desarrollo de este sistema consideramos importante que se pueda realizar un estudio más detallado de cada individuo forestal y agregar la longevidad entre las características a inventariar. Sin duda un aporte importante sería el poder investigar con base en la información recolectada la cantidad de oxígeno que proporciona este conjunto de árboles o cada uno de ellos a la ciudad; estudios de cómo o en qué cantidad pueden ayudar a disminuir el ruido en el ambiente son aplicaciones o investigaciones de alto impacto que se deberían considerar a futuro.

Bibliografía

- Ayuntamiento de Madrid. (2007). *Un Alcorque, un árbol*. Obtenido de <http://unalcorqueunarbol.cloudapp.net/indexplain.html>
- Cuenca, GAD Municipal Cantón. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Cuenca 2015*. Cuenca.
- Delgado Inga, O. (2013). *Sistemas de control y gestión de parques, jardines y áreas verdes administrados por la EMAC - EP para la ciudad de Cuenca*. Cuenca.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca. (2010-2014). *SIGTIERRAS*. Obtenido de www.sigtierras.gob.ec
- Quezada Jara, P. (2015). *Ubicación óptima de parques zonales en el área urbana de la ciudad de Cuenca a través de evaluación multicriterio*. Cuenca.

REVISTA DE LA UNIVERSIDAD DEL AZUAY

universidad verdad



7 Sistema de monitoreo de la calidad del aire y ruido ambiental para la determinación de índices referenciales de contaminación basado en sensores remotos

Salgado Castillo, Francisco¹; Carranco Zumba, Santiago²; Sellers Walden, Chester³; Martínez Gavilanes, Julia⁴

Ingeniero de Sistemas y Telemática e Ingeniero Electrónico por la Universidad del Azuay, investigador en el IERSE de la Universidad del Azuay, en el área de la determinación de patrones de distribución espacial de contaminantes atmosféricos de la ciudad de Cuenca.

f.d.salgado@ieee.org

Francisco Salgado Castillo¹

Ingeniero Electrónico por la Universidad del Azuay, investigador en el IERSE de la Universidad del Azuay, en el área de la determinación de patrones de distribución espacial de contaminantes atmosféricos de la ciudad de Cuenca.

Santiago Carranco Zumba²

Ingeniero de Sistemas por la Universidad del Azuay, Master Universitario en Gestión Sostenible de la Tierra y Territorio por la Universidad Santiago de Compostela, Magister en Geomática con mención en Ordenamiento Territorial por la Universidad del Azuay. Docente e Investigador en el IERSE de la Universidad del Azuay.

Chester Sellers Walden³

Ingeniera Civil por la Universidad de Cuenca, Especialista en sistemas de información geográfica, aplicados a la gestión territorial y ambiental por la Universidad del Azuay, Master en Desarrollo Local con mención en formulación y evaluación de proyectos de desarrollo endógeno por la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca. Docente e Investigadora en el IERSE de la Universidad del Azuay.

Julia Martínez Gavilanes⁴

Resumen

Este trabajo comprende la implementación de equipos de bajo costo, siguiendo los conceptos de las redes inalámbricas, de sensores para consulta, monitoreo y visualización continua de variables atmosféricas, ruido, gases contaminantes y cálculo referencial del índice de calidad del aire (ICA); información que luego es presentada en una plataforma web para consulta y visualización gráfica del comportamiento de las variables en el tiempo. Los datos fueron

comparados y ajustados con base en los equipos de la estación de monitoreo automático de la EMOV-EP y del Sistema de Observación Meteorológica Automatizado (AWOS) del Aeropuerto Mariscal Lamar de Cuenca.

Palabras clave:

Índice de calidad del aire, estación de monitoreo automático, contaminación del aire, ruido ambiental.

Abstract

This work includes the implementation of low cost equipment following the concepts of wireless sensor networks for the consultation, monitoring and continuous visualization of atmospheric variables, noise, pollutant gases and reference calculation of the Air Quality Index (AQI); This Information that is later presented on a web platform for inquiries and graphical visualization of the variables behavior over

time. Data were compared and adjusted based on equipment from the EMOV-EP's automatic monitoring station and the Automated Meteorological Observation System (AWOS) from Mariscal Lamar Airport of Cuenca.

Keywords:

Air quality index, automatic monitoring station, air pollution, environmental noise.

1. Introducción

Las ciudades están cambiando hacia lo que se conoce como ciudades inteligentes, éstas son ciudades que se caracterizan por el uso intensivo de las tecnologías de la información y comunicaciones (TIC) en la creación y mejoramiento de los sistemas que componen la ciudad. Esto permite mejorar la calidad de vida de la población, mediante el uso eficiente de sus recursos. Estas ciudades comienzan a ser vistas como entornos innovadores que ayudan al desarrollo y al progreso de la población logrando así una integración de los diversos elementos componentes de las mismas. Para este propósito se combina el software

con las redes de telecomunicaciones digitales, la inteligencia integrada, y los sensores (Mitchell, 2007).

Actualmente, la EMOV-EP cuenta con una red de monitoreo de la calidad del aire de Cuenca, la cual tiene 20 puntos de vigilancia localizados en diferentes sitios de la ciudad. Existe únicamente una estación automática como se ilustra en la figura 1, que permite registrar en tiempo real las concentraciones de CO, SO₂, NO₂, O₃ y MP2.5 con un radio de cobertura de medición de aproximadamente 4 Km. La figura 2 indica las ubicaciones de los puntos en la ciudad.



Figura 1. Estación para el monitoreo automático de calidad del aire, localizada en el Municipio (estación MUN en Figura 2) **Fuente:** (Municipalidad de Cuenca, 2015)

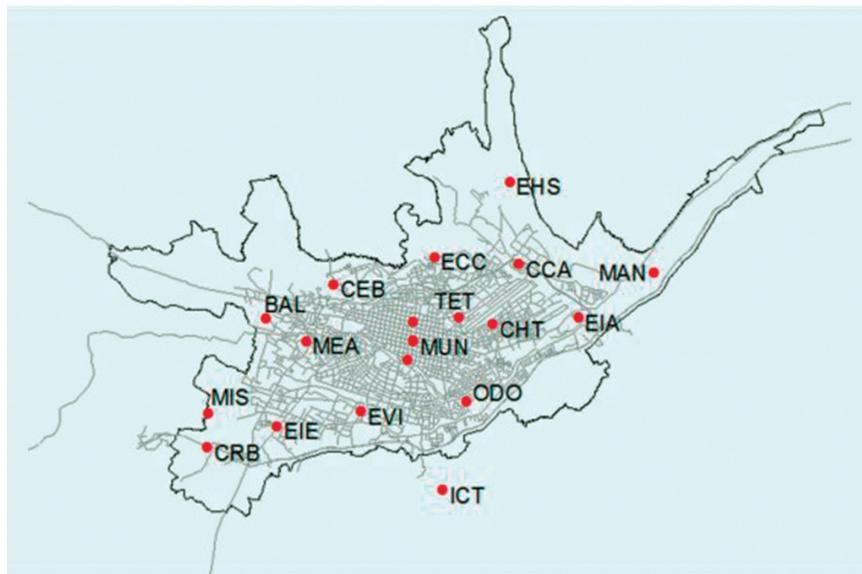


Figura 2. Localización de las estaciones de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Cuenca **Fuente:** (Municipalidad de Cuenca, 2015)

Las 19 estaciones restantes conforman una red pasiva y su muestreo se realiza en promedio 2 veces al mes con un análisis efectuado en laboratorio (Municipalidad de Cuenca, 2015). Todo este proceso requiere de personal presente en cada punto, lo

cual incrementa los gastos operativos y el tiempo de ejecución, además de no mostrar resultados en tiempo real. En la figura 3 se presentan las unidades utilizadas en la medición de gases.



Figura 3. Dispositivos empleados en el muestreo pasivo de contaminantes gaseosos **Fuente:** (Municipalidad de Cuenca, 2015)

La estación de monitoreo automático tiene un costo de implementación y mantenimiento, que se estima supera los \$250.000 (Balarezo & Tapia, 2011), además del recurso humano que ejecuta la calibración de los sensores, al menos una vez por mes y que son técnicos calificados.

Por otro lado, en cuanto a la contaminación acústica, el Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador, IERSE, ha realizado levantamientos de datos de ruido ambiente desde el año 2009, información

que ha contribuido para conocer los niveles de dicha contaminación en la ciudad de Cuenca en los años 2009, 2012, 2014, 2015 y 2016 (Martínez Gavilanes, 2017). Debido al crecimiento de la ciudad y las obras realizadas, las dinámicas de la población varían continuamente, por lo que los datos levantados son estáticos (sin variación temporal) mediante un sonómetro manipulado por un operador, como se ilustra en la figura 4, y no reflejan los cambios en la medida que éstos se presentan.



Figura 4. Operador de sonómetro en proceso de medición

Por estas razones, se propone diseñar e implementar un sistema de monitoreo de calidad del aire y ruido para la estimación de índices referenciales de contaminación basado en redes inalámbricas de sensores. El sistema se evalúa inicialmente en el campus de la Universidad del Azuay. Luego de estas pruebas se contrastará la información adquirida con la Estación de Monitoreo Automático de Calidad del Aire de la EMOV, y con el Sistema de Observación Meteorológica Automatizado (AWOS) del Aeropuerto Mariscal Lamar de Cuenca.

2. Sensores de bajo costo

Los sensores empleados en este trabajo para la medición de gases y posterior cálculo del índice de calidad del aire (ICA), son de bajo costo comparándolos con estaciones automáticas y equipos certificados por agencias de regulación ambiental.

Los sensores de calidad de aire portables y de bajo costo proporcionan una oportunidad para que se utilice esta tecnología en una amplia gama de aplicaciones, más allá del tradicional monitoreo regulatorio o equivalente. Los sensores de contaminación atmosférica aún están en una etapa temprana de desarrollo, y muchos sensores no han sido evaluados para determinar la exactitud de sus mediciones. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, EPA por sus siglas en inglés, tiene pautas específicas que debe usar para establecer monitoreos de aire de grado regulatorio (U.S. Environmental Protection Agency, 2014).

Si bien los sensores de bajo costo no poseen certificación, pueden ser utilizados como complemento a las mediciones actuales y para la determinación de fuentes de contaminación y otros fines informativos.

3. Sensores empleados

Para este trabajo se adquirieron dos nodos (dispositivos electrónicos que transmiten los datos medidos por los sensores) y de un *gateway* central para la recepción. El nodo de la figura 5 se compone de una robusta carcasa impermeable con zócalos externos específicos para conectar los sensores, panel solar, antena, y cable USB para reprogramar el módulo.

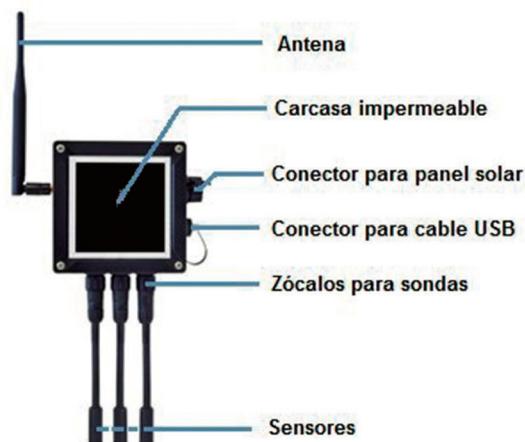


Figura 5. Distribución de componentes del nodo sensor

Cada nodo cuenta con sus respectivos sensores detallados a continuación:

El primer nodo (A) contiene 4 sensores para la medición de:

- Temperatura, humedad y presión atmosférica.
- Monóxido de carbono (sensor electroquímico de CO calibrado en fábrica).
- Dióxido de nitrógeno (sensor electroquímico de NO₂ calibrado en fábrica).
- Dióxido de azufre (sensor electroquímico de SO₂ calibrado en fábrica).

El segundo nodo (B) contiene 4 sensores para la medición de:

- Temperatura.
- Humedad.
- Luminosidad.
- Ruido.

La tabla 1 resume las unidades en que los sensores registran cada parámetro

comparados con la norma ecuatoriana en el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA), siendo necesario en algunos parámetros la transformación de unidades (Ministerio del Ambiente, 2015). Es importante destacar que el cálculo es diferente para los gases contaminantes, pues varían según la masa molecular de cada uno.

Tabla 1. Unidades de medición de los sensores y el indicado en la norma TULSMA

Parámetro	Sensor	Norma	Transformación a unidades norma
Temperatura	°C	°C	-
Humedad	%HR	%HR	-
Luminosidad	% Luz		-
Presión	Pa	mmHg	1 Pa = 0.0075 mmHg
Ruido	dBA	dB (FFR) dBA (FMR)	-
CO	ppm	µg/m ³	1 ppm = 1230 µg/m ³
NO2	ppm	µg/m ³	1 ppm = 2030 µg/m ³
SO2	ppm	µg/m ³	1 ppm = 2280 µg/m ³

Por otro lado, el *gateway* empleado de la figura 6 es un enrutador Linux que funciona como enlace para las redes de nodos sensores. Puede contener 6 interfaces de radio diferentes: WiFi 2.4GHz, WiFi 5GHz, 3G/GPRS, Bluetooth, XBee y LoRa. En este caso, la comunicación inalámbrica entre nodo y gateway se realiza por medio de XBee.

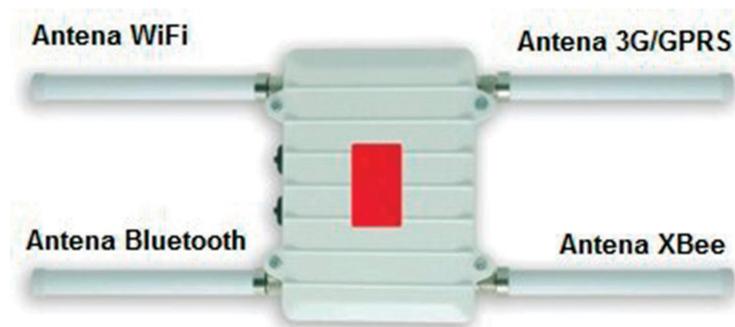


Figura 6. Gateway e interfaces de radio

4. Diseño y desarrollo

La figura 7 ilustra el esquema en el que se enmarca el desarrollo del modelo. El diseño del mismo comprende los nodos portátiles, basados en redes inalámbricas de sensores, que recopilan mediciones de variables meteorológicas, ruido y gases contaminantes; datos que son enviados mediante comunicación inalámbrica ha-

cia un *gateway*, que a su vez se comunica con un servidor de base de datos, almacenando los registros generados de manera continua, en intervalos de 2 minutos para el nodo A, y de 1 minuto para el B. Adicionalmente, se implementa una plataforma web para la consulta y visualización de registros, y el cálculo referencial del ICA.

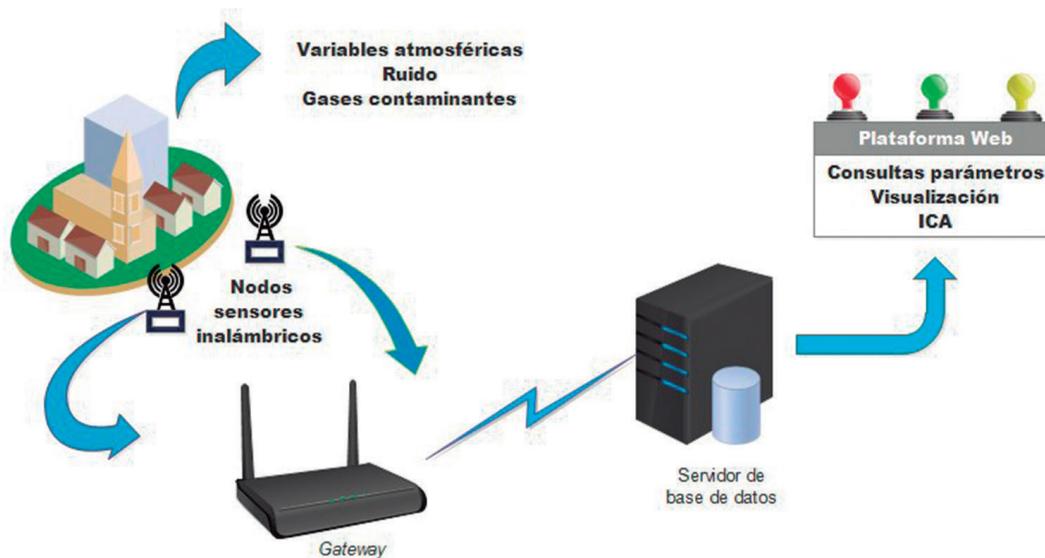


Figura 7. Esquema del diseño del modelo

El flujo general del sistema de los sensores para recolección de datos, transmisión, almacenamiento y visualización de la información se presenta en la figura 8.

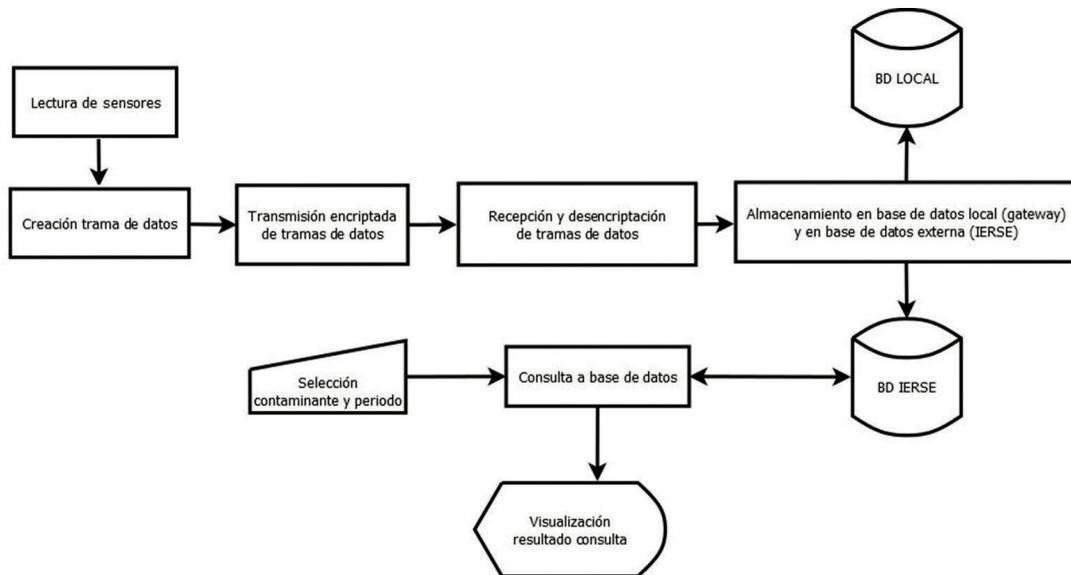


Figura 8. Diagrama de flujo general del sistema

5. Pruebas de cobertura y adecuación de equipos

Las primeras pruebas de recolección de datos de los sensores se las realizan en el campus de la Universidad del Azuay para comprobar la sensibilidad de los mismos y determinar las condiciones de transmisión y recepción de los datos. Se determinaron los puntos en los que existe cobertura, indicados en la figura 9, donde, en el punto amarillo en el edificio del vicerrectorado de investigaciones, se ubica el *gateway*.

En las figuras 10 y 11 se muestran las adecuaciones realizadas a los nodos sensores para su instalación, incluyendo los paneles solares para proveer de energía autónomamente.

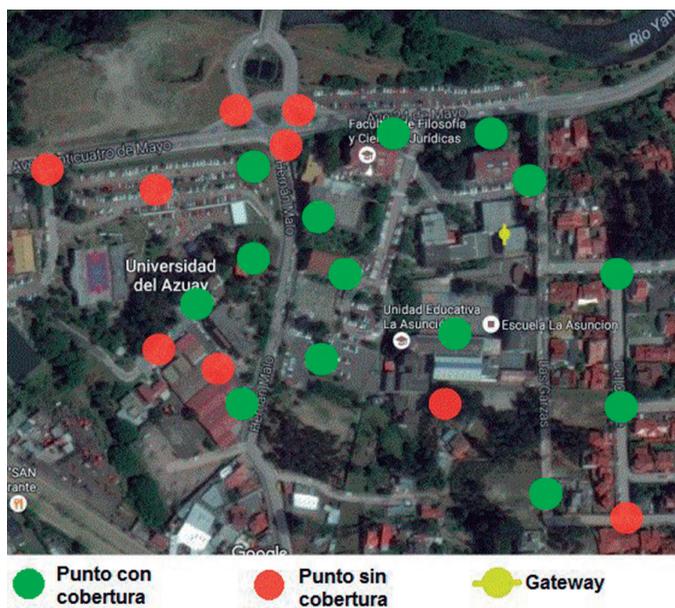


Figura 9. Mapa de puntos cobertura en el campus universitario



Figura 10. Implementación de paneles solares, vista inferior



Figura 11. Implementación de paneles solares, vista superior

6. Pruebas en la calidad de mediciones

Luego de las pruebas realizadas en el campus universitario se procede a comparar las mediciones de variables meteorológicas y gases contaminantes entre los sensores empleados con equipos y las estaciones certificadas.

6.1. Comparación de valores de variables meteorológicas y ruido

La comparación de datos meteorológicos se la realizó con la información generada por el Sistema de Observación Meteorológica Automatizado, AWOS por sus siglas en inglés, de la Dirección General de Aviación Civil situada en el Aeropuerto Mariscal Lamar de la ciudad de Cuenca.



Figura 12. Estación AWOS ubicada en el Aeropuerto Mariscal Lamar

A continuación se presentan las comparaciones de los valores medidos durante 4 días, de temperatura (figura 13), humedad (figura 14), y presión atmosférica (figura 15). Cabe destacar que para cada paráme-

tro se calculó un valor de corrección constante, de manera que las mediciones de los sensores empleados se aproximen a la de la estación AWOS.

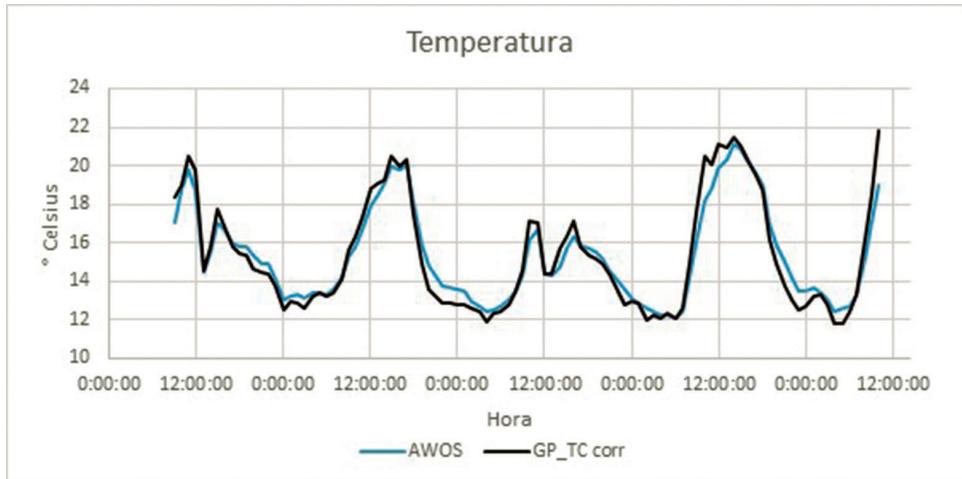


Figura 13. Curva corregida del sensor de temperatura con la estación AWOS

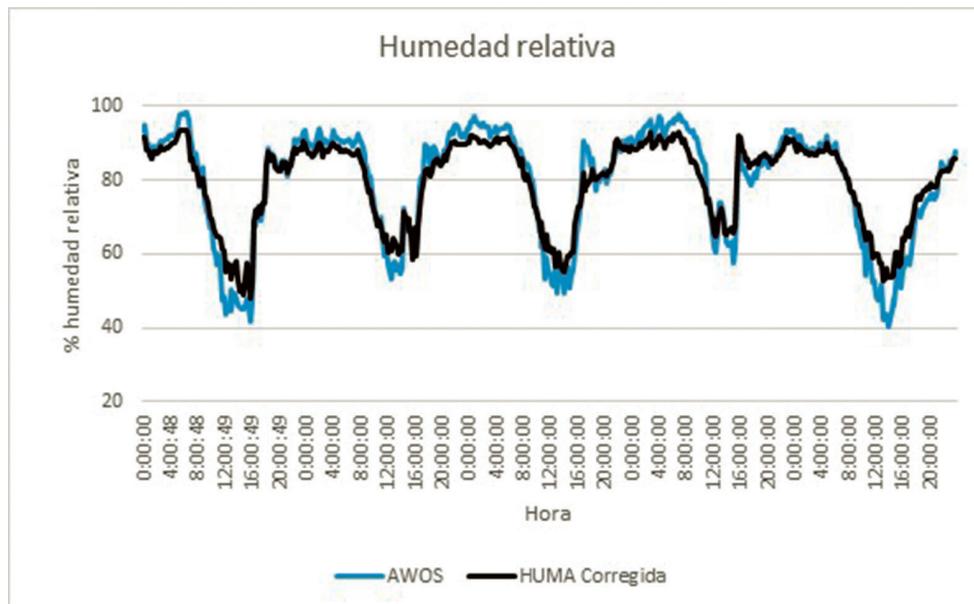


Figura 14. Curva corregida del sensor de humedad relativa con la estación AWOS

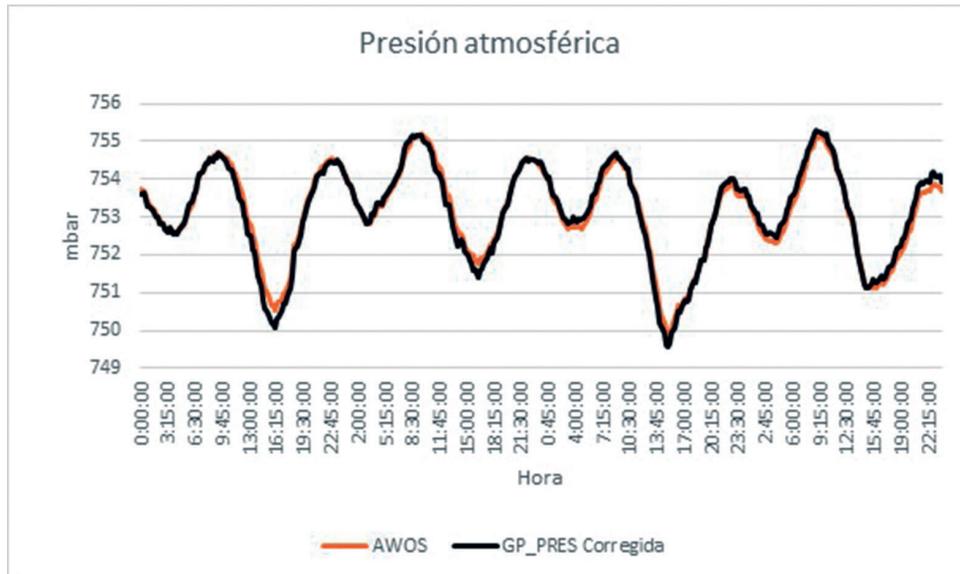


Figura 15. Curva corregida del sensor de presión atmosférica con la estación AWOS

En el caso del ruido, la comparación de registros se la realizó con un sonómetro calibrado, midiendo particularmente ambientes con un nivel de ruido medio (figura

16) y alto (figura 17). En cada figura se presenta la medición nominal del sensor de bajo costo y la corrección aplicada a estos valores para su debida aproximación.

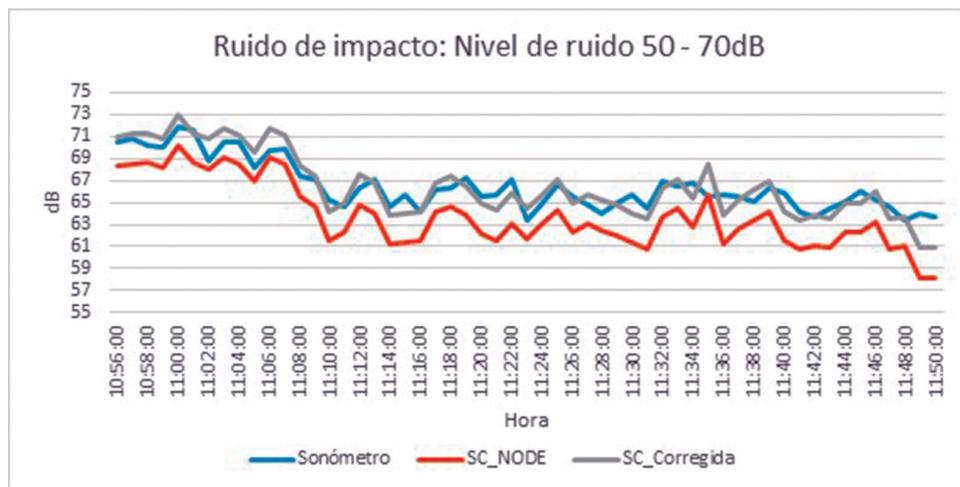


Figura 16. Ruido de impacto: Nivel de ruido 50 – 70dB

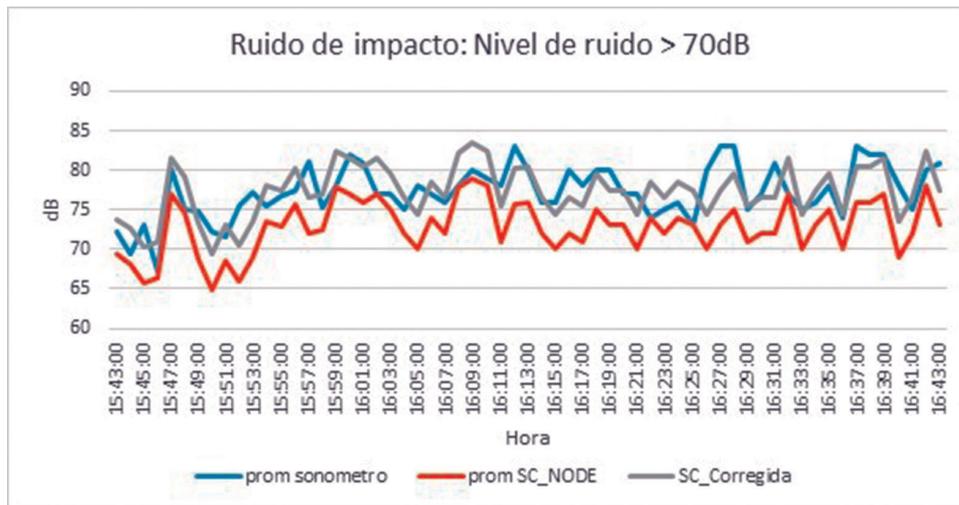


Figura 17. Ruido de impacto: Nivel de ruido mayor a 70dB

Al aplicar las correcciones a los valores registrados por los sensores, como se pudo observar, los porcentajes aumentan considerablemente, como se aprecia en la figura 18.

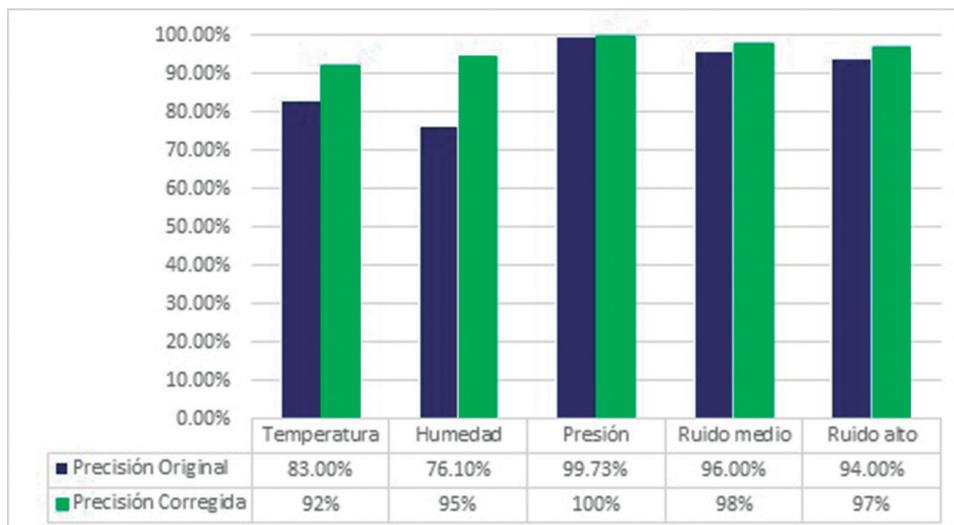


Figura 18. Porcentaje de precisión del dato medido

6.2. Comparación de valores de contaminantes gaseosos

Para la comparación de información de los datos de los contaminantes gaseosos generados por los sensores empleados se instalaron los equipos junto a la estación de monitoreo automático de calidad del aire de la EMOV-EP.



Figura 19. Disposición de los nodos sensores

Una vez realizada la instalación de los nodos sensores se procede a recolectar la información de la calidad del aire, de forma continua; luego, estos datos son comparados con los generados por la estación automática proporcionando los resultados que se exponen a continuación.

6.2.1. Cálculo del ICA

Con base en la información levantada se calculó el ICA para la primera semana del mes de marzo de 2017. En las tabla 2, 3 y 4 se presentan los índices de cada gas contaminante, obtenidos con los datos de la estación y lo registrado por los sensores.

Tabla 2. Promedios de concentración e ICA diario del dióxido de nitrógeno

Dióxido de nitrógeno (NO₂)				
Día	Promedio EMOV [ppb]	Promedio Sensor [ppb]	ICA EMOV	ICA Sensor
1	12.105	0.000	Bueno n/a	Bueno n/a
2	11.330	1.204	Bueno n/a	Bueno n/a
3	11.330	0.008	Bueno n/a	Bueno n/a
4	11.523	3.552	Bueno n/a	Bueno n/a
5	6.366	0.980	Bueno n/a	Bueno n/a
6	6.102	0.385	Bueno n/a	Bueno n/a

Tabla 3. Promedios de concentración e ICA diario del dióxido de azufre

Dióxido de azufre (SO₂)				
Día	Promedio EMOV [ppb]	Promedio Sensor [ppb]	ICA EMOV	ICA Sensor
1	1.152	1.038	1.69	1.53
2	1.610	0.988	2.37	1.45
3	2.886	1.338	4.24	1.97
4	2.948	0.717	4.33	1.05
5	2.761	1.473	4.06	2.17
6	3.988	2.661	5.87	3.91

Tabla 4. Promedios de concentración e ICA diario del monóxido de carbono

Monóxido de carbono (CO)				
Día	Promedio EMOV [ppm]	Promedio sensor [ppm]	ICA EMOV	ICA Sensor
1	0.671	0.824	8.39	10.30
2	0.504	0.779	6.30	9.74
3	0.600	0.840	7.50	10.50
4	0.426	0.620	5.32	7.75
5	0.619	0.804	7.74	10.04
6	0.504	0.801	6.30	10.02

7. Plataforma desarrollada

La Figura 20 muestra la interfaz completa de la plataforma desarrollada e indica a su izquierda el menú de consultas y visualizaciones.



Figura 20. Interfaz completa de visualización

La plataforma desarrollada calcula el índice de calidad del aire y en la interfaz se lo visualiza en el ejemplo de la figura 21. Siendo este ICA determinado por el índice más alto de los gases contaminantes, y en este ejemplo, el monóxido de carbono (CO) con un índice de 13.4.



Figura 21. Visualización del ICA en la plataforma web

En el mismo sitio web se indica el nivel de batería de ambos nodos y el comportamiento de carga de las últimas 8 horas, como se muestra en la figura 22.



Figura 22. Niveles de carga de los nodos en la plataforma web

7.1. Consultas de registros

Dentro de la plataforma es posible consultar gráficamente los niveles de gases contaminantes, ruido y variables meteorológicas por hora, día, y valores de concentración actuales (ICA) indicados anteriormente. Además, para los gases contaminantes existe la opción de buscar por octohorarios en un día específico.

En la figura 23 se ejemplifica una consulta de los niveles de CO para el 21 de febrero de 2017 a las 12H00. Se indica, además, los niveles máximo, mínimo y promedio a esa hora.

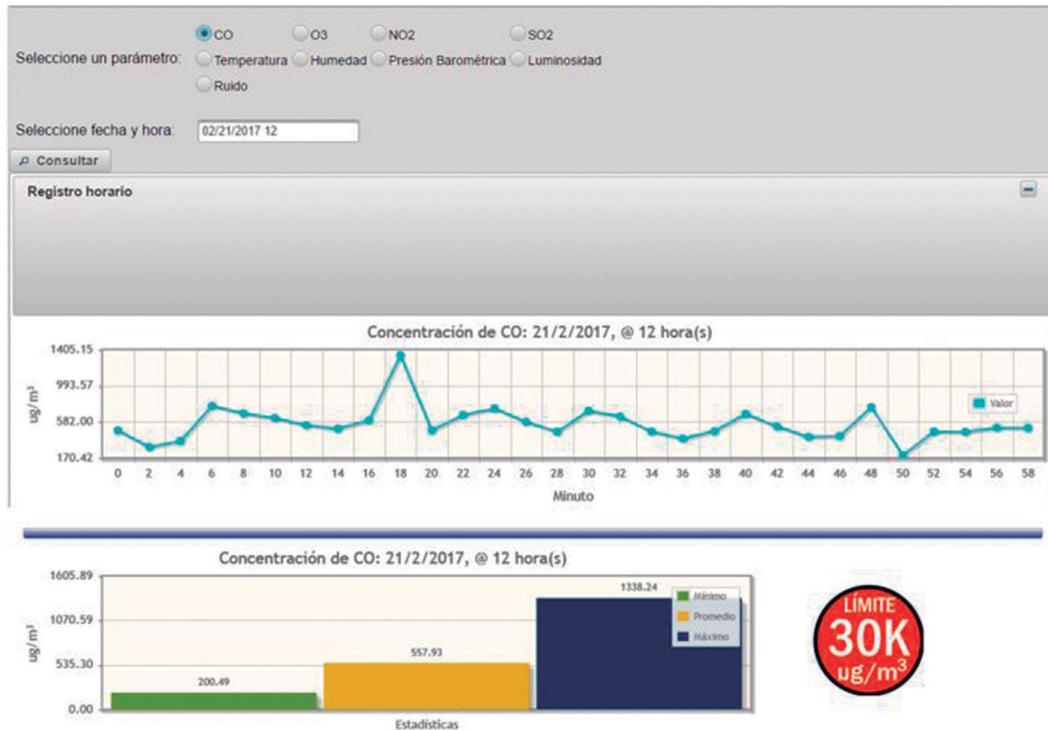


Figura 23. Interfaz para la consulta por fecha y hora de los diferentes parámetros

En la figura 24 se ejemplifica una consulta mixta de los niveles de temperatura, humedad, luminosidad y ruido para el 21 de febrero de 2017.



Figura 24. Interfaz para la consulta por fecha para el cruce de los diferentes parámetros

8. Conclusiones

Los sensores de bajo costo empleados en la medición de niveles de contaminación del aire, actualmente no se encuentran validados por entidades de regulación ambiental pues su uso está mayormente orientado a una presentación referencial o una; caracterización de lo que otros equipos certificados pueden registrar. Sin embargo, contando solamente con la estación automática de la EMOV-EP, no sería posible determinar la ubicación de las fuentes de contaminación en tiempo real, pues su amplio rango de medición (4 Km aproximadamente) no lo permitiría. Es por eso que el uso extensivo de sensores remotos de bajo costo, desplegados como nodos en una

red, podría mejorar la percepción inicial de dichas fuentes y facilitar su detección para que, una vez identificadas por estos sensores, las entidades pertinentes pudieran proceder al análisis aplicando las normas o regulaciones ambientales correspondientes.

En cuanto a las pruebas realizadas en las mediciones de variables meteorológicas y ruido de impacto, fue posible calcular un valor de corrección de los datos registrados, los cuales se ajustaron adecuadamente a las mediciones de equipos certificados y calibrados.

Se obtuvo una plataforma web funcional para la consulta de registros y visualización de datos.

lización gráfica del comportamiento de los niveles medidos de gases contaminantes, variables meteorológicas y ruido. Datos almacenados de manera continua en una base de datos.

Este trabajo reflejó un potencial servicio de la Universidad a los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD) mediante la investigación y ejecución de proyectos, propiciando convenios con empresas municipales, con la finalidad de difundir información de interés público relacionada con el estado de la calidad del aire, variables meteorológicas, y ruido de manera continua.

Bibliografía

- Balarezo, P., & Tapia, E. (9 de Agosto de 2011). *Nueva estación de monitoreo ambiental*. Obtenido de Sitio web de Diario El Tiempo: <http://www.eltiempo.com.ec/noticias-cuenca/75245-nueva-estacion-de-monitoreo-ambiental/>
- Martínez G., J., & Delgado I., O. (2015). *Registro de Ruido Ambiente 2015, en los 30 sitios de monitoreo de la ciudad de Cuenca*. Obtenido de IERSE: PROGRAMAS Y PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN: http://gis.uazuay.edu.ec/ide2015/monitoreo_ruido.php
- Martinez Gavilanes, J. (2017). Publicación digital de la Universidad San Francisco de Quito. Evaluación de ruido en Cuenca a 2015. *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 9(15).
- Ministerio del Ambiente. (4 de Noviembre de 2015). Registro Oficial N° 387. Quito, Ecuador.
- Mitchell, W. J. (2007). Ciudades inteligentes. *La Sociedad del Conocimiento*(5), 4-9. Obtenido de <http://www.uoc.edu/uocpapers/5/dt/esp/mitchell.pdf>
- Municipalidad de Cuenca. (2015). *Informe de Calidad Aire Cuenca- 2015*. Obtenido de Sitio web de la EMOV: http://www.emov.gob.ec/sites/default/files/Calidad%20del%20Aire%20final%202015_0.pdf
- Pacheco, D., & Samaniego, P. (2014). *Publicación en IDE de los registros de medición de ruido ambiente a través de dispositivos móviles*. Obtenido de IERSE: PROGRAMAS Y PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN: http://gis.uazuay.edu.ec/ide2015/fortalecimiento_infraestructura.php
- Sellers W., C., Pacheco, D., & Delgado I., O. (2015). *Patrones de distribución espacial de contaminantes atmosféricos en el perímetro urbano de la ciudad de Cuenca*. Obtenido de IERSE: PROGRAMAS Y PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN: http://gis.uazuay.edu.ec/ide2015/patrones_distribucion.php
- U.S. Environmental Protection Agency. (Junio de 2014). *Air Sensor Guidebook*. Obtenido de Air Quality Sensors: <https://developer.epa.gov/air-quality-sensors/>