

DESARROLLO DE UN SENSOR MÓVIL PARA LA MEDICIÓN DE RUIDO AMBIENTAL
DEVELOPMENT OF A MOBILE SENSOR FOR MEASUREMENT OF ENVIRONMENTAL NOISE

(Recibido el 26-02-2016. Aprobado el 14-05-2016)

PhD. Jaime Alberto Guzmán Luna
Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Grupo de Investigación
SINTELWEB.
Medellín, Colombia
jaguzman@unal.edu.co

Est. Jennifer Cartagena Orrego
Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Grupo de Investigación
SINTELWEB.
Medellín, Colombia
jcartagena@est.colmayor.edu.co

Est. José David Restrepo Duque
Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Grupo de Investigación SINTELWEB.
Medellín, Colombia
jodrestrepodu@unal.edu.co

Resumen: La contaminación por ruido es un problema que se evidencia diariamente en las grandes ciudades trayendo como consecuencia enfermedades que afectan a la salud pública y que son clasificadas en dos grandes categorías: auditivas y no auditivas. Con base a lo anterior, se propone el desarrollo de una aplicación móvil cuya principal función es realizar mediciones georreferenciadas de señales de ruido, a partir de las cuales se hace el estudio de las zonas con alta contaminación acústica para que el usuario conozca el estado real y actualizado sobre algún sitio en particular. No obstante, esta herramienta también puede ser utilizada por los entes gubernamentales ya que proporciona la construcción de los mapas de ruido tomando como base este sistema cooperativo por los ciudadanos.

Los datos arrojados por los distintos usuarios son analizados y corregidos mediante la técnica de fusión de datos con la finalidad de dar un valor con mayor precisión sobre las mediciones realizadas, para posteriormente generar los mapas de ruido que indican las condiciones diarias y reales del ruido ambiental tanto en el día como en la noche.

Palabras clave: aplicación móvil, contaminación acústica, fusión de datos, ruido ambiental.

Abstract: The noise pollution is a problem that is evidenced daily in the big cities consequently resolute disease affecting public health and they are classified into two broad categories: hearing and no hearing. Based on the foregoing, the development of a mobile application is proposed whose main function is to georeferenced measurement of noise signal, from which it is made is studying areas with high noise pollution for the user to know the real state and updated on a particular site. However, this tool can also be used by government agencies because it provides the construction of noise maps based on this cooperative system by citizens. The data produced by different users are analyzed and corrected by the technique of data fusion in order to give a more accurate value on the measurements taken, to then generate maps indicating the daily noise and actual conditions of environmental noise both day and night.

Keywords: mobile application, noise pollution, data fusion, environmental noise.

1. INTRODUCCIÓN

Los altos niveles de ruido ambiental provocan lo que se conoce como contaminación acústica. El exceso de ruido es uno de los problemas ambientales que se ha reconocido en los últimos años por las autoridades ambientales y el gobierno. Dicha contaminación se da como consecuencia al exceso de sonido proveniente de diferentes fuentes emisoras, las cuales alteran las condiciones normales del ambiente en un área de influencia delimitada.

Como medida de control, en Colombia se crea la resolución 0627 de 2006 que establece primeramente los criterios para la medición y monitoreo del ruido ambiental, seguido de la construcción de mapas de ruido como medida de análisis de los niveles sonoros de distintos puntos de la ciudad para identificar zonas críticas y posibles contaminadores por emisión de ruido. Sin embargo, la creación de mapas de ruido con los métodos convencionales resulta inexacta o muy costosa y es allí en donde regiones que cuentan con escasos recursos no pueden realizar el análisis sonoro y mucho menos generar mapas acertados o con valores reales.

De este modo se propone el desarrollo de una aplicación móvil para la medición georreferenciada de ruido ambiental que se basa principalmente en la geolocalización, grabación de audio, acceso a internet y pre-procesamiento de datos como la eliminación de datos atípicos. El proceso de recolección de datos se hace con el registro participativo de los ciudadanos. Es decir, se toma como sensor ciudadano a los habitantes de la ciudad.

No obstante, esos valores tienen un margen de error puesto que cada dispositivo cuenta con diferentes micrófonos para la adquisición del sonido y es ahí en donde juega un papel fundamental la técnica de fusión de datos, ya que recoge los datos censados por los distintos usuarios y los corrige para dar un valor más exacto y así reducir el margen de error. Este artículo se enfoca principalmente en mostrar el desarrollo de la aplicación móvil.

Este documento está organizado de la siguiente manera: la siguiente sección presenta el marco teórico que soporta este trabajo. En la sección 3 se presentan los diferentes trabajos relacionados con la temática propuesta.

En la sección 4 se presenta la arquitectura propuesta. En la sección 5 se describen los casos de aplicación. En la sección 6 se detallan las conclusiones referentes a esta propuesta de investigación.

2. MARCO TEÓRICO

A continuación se describen los principales conceptos que soportan este documento.

2.1. Contaminación por ruido

La contaminación por ruido puede ser denominada como contaminación acústica, que básicamente es el exceso o aumento del ruido ambiental. Una definición más acertada la da Echeverri (et al., 2007), quien define la contaminación por ruido como cualquier situación en la que una emisión de sonido afecte adversamente la salud, el confort o la seguridad de los seres humanos, la propiedad o el disfrute de la misma. Por otra parte, el Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA) define el ruido ambiental como cualquier sonido no deseado o aquel calificado como desagradable o molesto por quien lo percibe (2012). En relación a lo anterior, es indiscutible que la percepción del ruido es subjetiva al usuario. Es decir, el ruido puede ser percibido de diferentes formas y puede tener efectos distintos sobre las personas. En efecto, el Ministerio de Ambiente (2006) establece que los resultados obtenidos en las mediciones de ruido ambiental deben ser utilizados para realizar el diagnóstico del ambiente y debe llevarse a la creación de mapas de ruido, los cuales permiten visualizar la realidad en lo que concierne a ruido ambiental, identificar zonas críticas y posibles contaminadores por emisión de ruido, entre otros.

2.2. Aplicación móvil

Las aplicaciones también llamadas apps están presentes en los teléfonos celulares desde hace varios años y cada vez se mejoran o se actualizan por diferentes versiones. En esencia, las aplicaciones móviles son softwares para el manejo exclusivo de los dispositivos móviles. Talent (2015) especifica que existen tres tipos de aplicaciones móviles. La primera, la aplicación nativa, que se desarrolla de forma específica para un determinado sistema operativo. La segunda, la aplicación web, que se desarrolla con lenguajes muy conocidos por los programadores. La tercera es una aplicación híbrida que combina las dos anteriores; se podría decir que recoge lo mejor de cada una de ellas.

La aplicación móvil que se presenta en este artículo se crea bajo la modalidad híbrida ya que se construye con la finalidad de monitorear el ruido ambiental presente en determinado sitio, pero teniendo herramientas que facilitan el acceso a gran parte de las características del hardware en el dispositivo y a su vez distribuirla en la app store.

2.3. Fusión de datos

Linás y Hall (1998) mencionan que la fusión de datos permite combinar la información censada de todos los dispositivos móviles y obtener mediciones más precisas del ruido, así como realizar inferencias más específicas que si se hubiera usado un solo sensor.

En general, los sensores son dispositivos que proporcionan medidas con incertidumbre asociada (Castanedo, 2010). Estos errores pueden ser corregidos o reducidos utilizando las técnicas y métodos de fusión de datos. Para realizar la fusión de los datos de una forma coherente, los distintos sensores involucrados deben ser coordinados y gestionados. Esto se conoce como sensor management (Manyika y Durrant, 1995).

3. TRABAJOS RELACIONADOS

García *et al.* (2010) presenta el desarrollo de una aplicación móvil para recoger el ruido ambiental de diferentes zonas. Esta aplicación se diseña siguiendo la técnica de Gamification para animar al usuario a participar utilizando sus propios smartphones personales.

Quintero (2013) desarrolla la tesis de maestría en el diseño, implementación y utilización de un sistema automático de medición de contaminantes acústicos, que tiene como principal función la realización de mediciones georreferenciadas de señales de ruido, para posteriormente realizar un análisis que muestra el comportamiento del ruido, y genera los mapas de contaminación acústica de manera automática. Utiliza como software base el LabVIEW y lo combina con herramientas para el diseño de GIS.

En Schweizer *et al.* (2006) se presenta un prototipo basado en detección participativo que conduce al ruido en tiempo real para la construcción de mapas de ruido. Básicamente crean la aplicación NoiseMap que puede ser utilizada en teléfonos Android. NoiseMap reúne los datos de sonoridad y lo transfiere a la plataforma de detección urbana abierta que permite a los usuarios acceder y controlar sus datos, generar mapas de ruido en tiempo real y gráficos de datos.

En Maisonneuve *et al.*, (2009) se presenta un nuevo enfoque para la evaluación de la contaminación acústica que involucra al público en general. El objetivo de este proyecto es convertir a los teléfonos móviles con el GPS en sensores de ruido que permiten a los ciudadanos medir su exposición personal al ruido en su entorno cotidiano.

Así, generan la aplicación móvil Noise Tube que hace posible compartir sus mediciones geolocalizadas para producir un mapa de ruido colectivo.

En términos generales, se puede decir que los trabajos mencionados anteriormente utilizan aspectos como la georreferenciación, la captura de datos con el sensor del dispositivo móvil y la generación casi automática de los mapas de ruido. Pero en cuanto a la calidad de los datos, no presentan interés. Es por esto que el aporte de este sistema está enfocado específicamente en la corrección y calibración de los datos para generar un resultado más acertado y direccionado a la realidad del sonido capturado mediante la utilización de la técnica de fusión de datos.

4. ARQUITECTURA PROPUESTA

La aplicación móvil desarrollada se basa principalmente en la geolocalización, grabación de audio, y acceso a internet como muestra la Figura 1. Esta se desarrolla inicialmente para la plataforma Android, la cual permite a través del micrófono del dispositivo obtener la amplitud de onda de un sonido que posteriormente define el nivel de presión sonora medida en decibelios (dB).

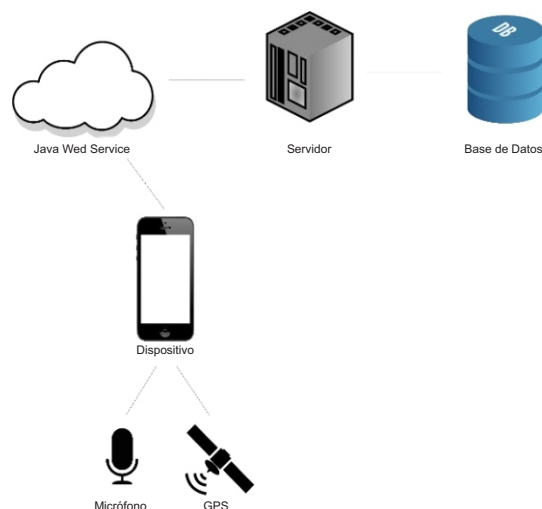


Fig. 1. Arquitectura general del dispositivo móvil

Las características que conforman el diseño de la aplicación móvil están dadas en primer lugar por el tipo de versión soportada, que básicamente está diseñada para los dispositivos Android 5.1 - LOLLIPOP_MR1 (versión objetivo) y como mínima versión soportada Android 4.1- JELLY_BEAN. No obstante, el dispositivo móvil

requiere algunos permisos de privacidad y de acceso al dispositivo. Los requisitos de privacidad están dados por la grabación de audio, ubicación precisa (según el GPS y la red) y modificar/suprimir el contenido de la tarjeta SD. En cuanto al acceso al dispositivo, debe contar con acceso a una red y probar la capacidad de almacenamiento protegido.

4.1. Ecuación utilizada en la medición del ruido ambiental

La captura del sonido esta expresada por la amplitud de onda y el nivel de presión sonora. A continuación se definen estos conceptos:

- **Amplitud:** La amplitud es la magnitud con que se expresan las variaciones de presión de una onda sonora y es la responsable de la sensación sonora de intensidad o volumen de un sonido (CTE, 2009); a mayor amplitud, mayor intensidad.
- **Nivel de presión sonora (LP):** Es la cantidad expresada en decibeles (dB) y varía entre 0 dB (umbral de audición) y 120 dB (umbral de dolor). (Ministerio de Ambiente, 2006). Determina la intensidad del sonido que genera una presión sonora; es decir, del sonido que alcanza a una persona en un momento dado.

En relación a los conceptos mencionados anteriormente, se desarrolla la aplicación móvil teniendo como base una escala logarítmica a partir de un nivel de referencia. Dicho nivel es la presión sonora que se considera inaudible por la especie humana a una frecuencia de 1000 Hz. Mediante la siguiente ecuación se puede calcular el nivel de presión sonora que representa el grado de intensidad tomado sobre el ruido ambiental

$$L_p = 20 \times \log P_i / P_0 \quad (1)$$

Donde P = valor cuadrático medio de la presión sonora. P₀ = Es el valor de referencia de la presión acústica que representa la menor presión acústica que el oído humano puede percibir (2x10⁻⁵ Pascales).

4.2. Geolocalización del sensor ciudadano

Es importante obtener la posición en la que un usuario se encuentra midiendo el ruido ambiental. Esto con el objetivo de fusionar las mediciones que se encuentren cercanas bajo un criterio de distancia espacial y temporal, mediante la técnica de fusión de datos. Para obtener el posicionamiento del ciudadano, Android dispone de un interesante sistema que combina varias tecnologías:

- Sistema de localización global basado en GPS. Este sistema puede funcionar sólo si disponemos de visibilidad directa en los satélites (Gironés, 2013).
- Sistema de localización basado en la información recibida de las torres de telefonía celular y de puntos de acceso Wi-Fi. Funciona al interior de los edificios (Gironés, 2013).

Estos servicios están integrados en el sistema y son usados por gran variedad de aplicaciones. En este proyecto se retoman esos sistemas de posicionamiento ya que cada dispositivo móvil cuenta con especificaciones distintas en cuanto al GPS incorporado. Dicho dispositivo funciona sólo cuando tenga visión directa de los satélites y se logra con ayuda de las aplicaciones de Android que combina la información recibida en las torres de telefonía celular y los puntos de acceso Wi-Fi.

4.3. Aplicación móvil en funcionamiento

La figura 2 detalla la aplicación móvil en funcionamiento, en donde básicamente muestra los valores máximos, mínimos y promediados que son captados por el sensor del dispositivo móvil. Por lo tanto, estos valores son calculados mediante la ecuación (1) que representa el nivel de presión sonora tipo A.



Fig. 2. Aplicación móvil como sensor ciudadano

Cuando el usuario presiona el botón “Iniciar” se instancia un objeto de tipo Controlador/Medición, que se encarga de iniciar el rastreo con el GPS y la grabación de audio del dispositivo. Esto se hace instanciando un objeto de tipo RastreadorGPS y otro de tipo Grabadora/Multimedia respectivamente. Por otra parte, se instancia un objeto de tipo Medición que contendrá todos los registros por segundo que

son medidos con el sensor. Una vez hecho lo anterior, se lanza un hilo que repite la siguiente secuencia cada segundo hasta que el usuario presione el botón “Detener”. Este proceso se puede visualizar fácilmente en el diagrama de clases que se muestra en la figura 3.

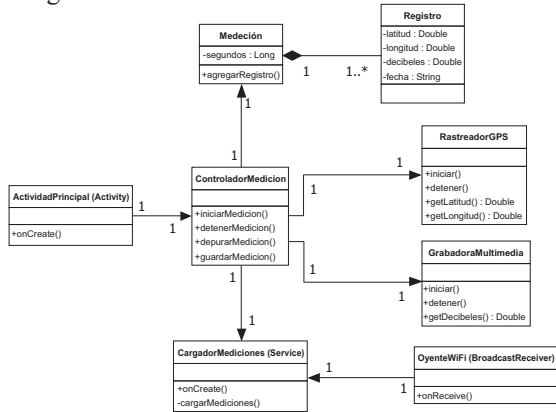


Fig. 3. Diagrama de clases

A continuación, se detalla el proceso llevado a cabo en la medición del ruido ambiental mediante la aplicación desarrollada:

1. Se obtiene la latitud y longitud actual ejecutando los métodos `getLatitud()` y `getLongitud()` del objeto de la clase `RastreadorGPS`.
2. Se obtienen los decibeles ejecutando el método `getDecibeles()` del objeto de la clase `GrabadoraMultimedia`. Android proporciona a través de su API la clase `MediaRecorder`, la cual, al instanciar un objeto de esta, ejecuta un método llamado `getMaxAmplitude()`, el cual retorna la máxima amplitud medida desde la última vez que se llamó este método. Una vez se obtiene la amplitud, se procede a calcular los decibeles y este valor es el que retorna este método.
3. Se ejecuta el método del objeto de la clase `Medición` `agregarRegistro()` enviando como parámetro una nueva instancia de la clase `Registro`, la cual se construye a partir de la latitud, longitud, y decibeles medidos anteriormente.
4. Por último, se ejecuta el método `depurarMedicion()` de la clase `ControladorMedicion`, el cual se encarga de eliminar los registros atípicos en la medición actual aplicando el criterio de Chauvenet.

5. Si la medición fue depurada en el paso anterior, se ejecuta el método `guardarMedición()` de la clase `ControladorMedicion`, enviando como parámetro la medición actual. Este método se encarga de almacenar los datos obtenidos por la medición en el dispositivo móvil en forma de archivo Json para enviarlo al servidor. Si la medición es guardada exitosamente, se instancia un nuevo objeto de la clase `Medición` y a este se le siguen agregando registros.

6. Por otra parte, se genera un `BroadcastReceiver` llamado `OyenteWiFi`, el cual es el encargado de recibir notificaciones por parte del sistema operativo acerca del cambio del estado de conexión a la red Wi-Fi. Si se detecta la existencia de conexión, se invoca el servicio `CargadorMediciones`; esto con el fin de cargar la información al servidor. Esta función se realiza sólo cuando el dispositivo se encuentre con acceso a internet a través de la red WiFi.

4.4. Criterios para el censado de datos

En el capítulo II de la resolución 0627 de 2006 “Procedimientos para la medición del ruido ambiental” establece que cada medición debe efectuarse con un tiempo de 15 minutos, según se estipula en el Artículo 5º de la misma resolución.

Básicamente los 15 minutos deben ser repartidos equitativamente en cinco mediciones, es decir cada medición parcial debe tener una duración de 3 min. En efecto, el sistema es amplio en cuanto a la captura de datos ya que le permite al usuario capturar el tiempo que desee, ya que este sistema es colaborativo y lo que se quiere es recopilar datos de emisión de ruido en la medida en que el usuario se desplaza en el territorio.

4.5. Eliminación de datos atípicos

El dispositivo móvil tiene la importante tarea de eliminar los valores o datos atípicos que haya capturado el usuario. Es decir, elimina datos que no corresponden a la muestra real y que pueden generar valores extremos en la medición.

Esto con la finalidad de enviar un dato depurado de posibles errores en la captura. Este procedimiento se explica en el siguiente algoritmo.

```

Inicio
  coeficiente=2.81;
  Repetir
    atipicos=0;
    promedioDecibeles=calcularPromedio(Registros.decibeles);
    desviacionEstandar=calcularDesviacion(Registros.decibeles);
    Para i=1 Hasta Total (Registros)
      Si (ValorAbsoluto(Registros[i].decibeles-
        promedioDecibeles)>coeficiente*
        desviacionEstandar)Entonces
        Borrar(Registros[i]);
        atipicos=atipicos + 1;
      Fin Si
    Fin Para
  Hasta Que atipicos = 0
Fin
    
```

Fig. 4. Algoritmo para la eliminación de datos atípicos

Para la eliminación de valores atípicos se utiliza la ecuación estadística criterios de rechazo de Chauvenet (López, 2011), en donde básicamente consiste en rechazar todas aquellas medidas cuya probabilidad de aparición sea inferior a $\alpha = 1/2n$, siendo n el número de reiteraciones de la medida. Esto supone que se deben rechazar aquellas medidas cuya desviación a la media sea superior a un determinado valor (función de la desviación típica muestral). Por lo tanto, el criterio se simplifica con la siguiente expresión:

$$|x_i - \bar{x}| > k(n) s \quad (2)$$

Donde $k(n) = k\alpha=1/2n$ se obtiene a partir de la distribución normal.

Tabla 1: Coeficientes de Chauvenet

n	k_n	n	k_n	n	k_n
2	1.15	8	1.86	30	2.40
3	1.35	9	1.92	40	2.48
4	1.54	10	1.96	50	2.57
5	1.65	15	2.13	100	2.81
6	1.73	20	2.24	300	3.14
7	1.80	25	2.33	500	3.29
-	-	-	-	1000	3.48

Dependiendo del tamaño de la muestra se comparan con la tabla de criterios de Chauvenet.

4.6. Fusión de datos

Los datos que se envían al servidor ya tienen un pre-procesado como la eliminación de datos atípicos, pero en esencia no están corregidos. Es por esto que el principal aporte de este sistema está centrado en la calibración de los datos mediante la técnica de fusión de datos utilizando los filtros de kalman.

Para cargar los archivos al servidor se crea un servicio llamado Cargador/Mediciones, el cual se encarga de enviar todas las mediciones presentes en el dispositivo, y luego se eliminan del mismo.

En el contexto de la fusión de varios sensores, los filtros de Kalman proporcionan un enfoque de estimación clásico: el Filtro de Kalman estima el estado x de un proceso en tiempo discreto, y se utiliza principalmente para fusionar datos redundantes de bajo nivel. Si el sistema se puede describir como un modelo lineal, y el error se puede modelar como ruido Gaussiano, el Filtro de Kalman recursivo obtiene estimaciones estadísticas óptimas (Luo y Kay, 1992).

5. CONCLUSIONES

En general, los aspectos que diferenciarán la aplicación desarrollada con el resto de aplicaciones existentes que cumplen la misma función son: en primer lugar, la realización de una fusión de datos a partir de muestras tomadas por diferentes usuarios que se encuentren cercanos bajo un criterio de distancia espacial y temporal. En segundo lugar, antes de cargar cualquier muestra al servidor, se realizará el proceso de depuración de datos usando el método llamado el Criterio de Chauvenet para calcular si existen valores atípicos en los datos tomados.

Como trabajo futuro, se propone mejorar la interfaz de la aplicación móvil para llevar a cabo las pruebas de validación del mismo, que serán comparadas con un sonómetro que cumple con las especificaciones reales en la medición del ruido ambiental. Por otra parte, se debe realizar la fusión de datos bajo el modelo JDL, en donde el sistema abarca los niveles 0 (pre-procesado de las fuentes), 1 (valoración de objetos) y 2 (valoración de la situación).

REFERENCIAS

Castanedo, F., Patricio M.A. y García. J. (2010). *Fusión de datos distribuida en redes de sensores visuales utilizando sistemas multi-agente* (tesis doctoral). Universidad Carlos III. Madrid, España.

- Ministerio de Vivienda de España. (2009). *Protección frente al ruido*. Recuperado de: <http://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/proteccionRuido/DBHR.pdf>
- Cuello, J., y Vittone, J. (2014). *Diseñando apps para móviles*. Barcelona, España.
- Echeverri L, C. (2007). *Diagnóstico de la exposición y efecto del ruido en la población que frecuenta establecimientos nocturnos de la ciudad de Medellín*. Medellín, Colombia.
- García, I., R. (2010). *Aplicación móvil para la monitorización de la contaminación acústica en entornos urbanos a través de técnicas de Gamification*. Universitat Jaume I (UJI), Castellón de la Plana, España.
- Gironés, J. (2013). *El gran libro de Android*. En J. T. Gironés, *El gran libro de Android*. Barcelona, España: Marcombo.
- Linás, J., y Hall, D. (1998). IEE Explore Digital Library. En Circuits and Systems, 1998. ISCAS '98. Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on (págs. 537-540). Monterrey: IEEE, de An introduction to multi-sensor data fusion.
- López R, J. (2011). *Fundamentos Básicos de Metodología Dimensional*. Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, Colombia.
- Luo, R., y Kay, M. (1992). Data fusion and sensor integration: State-of-the-art 1990s. En G. Maurant, *Data Fusion in Robotics & Machine Intelligence* (pág. 135). Academic Press.
- Maisonneuve, N. (2009). "NoiseTube: Measuring and mapping noise pollution with mobile phones". *information technologies in environmental engineering*.
- Manyika, J., y Durrant Whyte, H. (1995). *Data Fusion and Sensor Management: A Decentralized Information-Theoretic Approach*. USA: Prentice Hall PTR Upper Saddle River, NJ, USA.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 0627 de 2006 **por la cual se establece la norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental**. Recuperado el 9 de Noviembre de 2015. <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=19982>
- SINIA (2012). Ruido ambiental. Recuperado el 9 de noviembre de 2015. <http://www.sinia.cl/1292/w3-propertyvalue-15491.html>.
- Schweizer, I. (2006). "NoiseMap - Real-time participatory noise maps". Hochschulstrasse 10.
- Talent, L. (2015). Los 3 tipos de aplicaciones móviles: ventajas e inconvenientes. Recuperado el 9 de noviembre de 2015. <http://www.lancetalent.com/blog/tipos-de-aplicaciones-moviles-ventajas-inconvenientes>