

# Sistema EDMO como prototipo para la caracterización de suelos superficiales

Velásquez, C.; Santamaría, C.; Moreno, E.; Miranda, M.; Martínez, J.;  
Martínez, M.; Gómez, C.; Chan, F.; Blanco, R.

Licenciatura en Ingeniería Civil – Facultad de Ingeniería Civil – Universidad Tecnológica de Panamá (Sede Chiriquí)

**Resumen** Actualmente existen varios mecanismos sofisticados para obtener información del subsuelo, la idea consiste en hacer un sistema tipo geófono conformado de placa arduino con sensores por medio del cual podemos adquirir el tiempo en que viaja una onda de Rayleigh (onda superficial) de sensor a sensor, usando la programación como herramienta de interpretación de estos datos, para posteriormente determinar la velocidad en la que viaja la onda de Rayleigh y así poder predecir el tipo de suelo según la velocidad registrada. Este posee la ventajas de ser adaptado para detectar ondas en cualquier eje (eje x, y, z) al mismo tiempo o individualmente. Este sistema resulta novedoso, práctico y económico.

**Palabras Claves:** Suelo, velocidad, onda, arduino, acelerómetro, geófono, estrato.

**Abstract** Actually there are several sophisticated mechanisms subsurface information, the idea is to make a geophone-type system composed of Arduino with sensors by which we can acquire the time when a Rayleigh wave travels from sensor to sensor, using the program as a tool for interpretation of these data, to then determine the speed at which the Rayleigh wave travels so we can predict the type of soil according to the recorded speed. This has advantages of being adapted to detect waves in any axis (x, y and z) simultaneously or individually. This system is new, practical and economical.

**Keywords:** Soil, velocity, wave, arduino, accelerometer, geophone, layer.

## 1. Introducción

El estudio se basa en el diseño de un sistema de caracterización de suelos, utilizando herramientas tecnológicas para los movimientos sísmicos generados. Éste se basa en la recolección de datos sísmicos que son captados a través de acelerómetros y posteriormente interpretados a través de una placa arduino.

Arduino es una plataforma de arquetipos electrónica de código abierto (open-source) basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar [1].

La variedad de las placas crece conforme a la creatividad de los desarrolladores. Cada Placa hasta la fecha creada, cuenta con avances y mejoras en aspectos como la cantidad de memoria disponible, número de puertos, entre otras [2].

El análisis de ondas sísmicas es el principal objetivo para este sistema, utilizando la velocidad de ondas que ocurren a través de los estratos, como la variable para poder apreciar y cuantificar diferencias en los tipos de suelos existentes.

Además de esto, se considera como fundamental la relación de vacíos, porosidad, gravedad específica, densidad del suelo y otras propiedades del suelo que se ven involucradas en la caracterización del mismo.

## 2. Antecedentes

Muchos estudios de caracterización de suelos se han realizado a nivel mundial, con el fin de optimizarse, se han desarrollado nuevos métodos y técnicas en el campo geotécnico. Con el impulso de la tecnología hoy día la ingeniería busca cada vez más el perfeccionamiento óptimo de los métodos. Estos métodos se basan en pruebas realizadas en el campo, que permiten explorar el suelo y obtener informaciones básicas para la utilización y construcción de obras de ingeniería.

Estudios avanzados usan geófonos, elemento que registra cualquier tipo de movimiento de la tierra por medio de una señal eléctrica [3], como herramientas de captación de ondas, que como en la sísmica se obtienen velocidades con las que viaja la misma y de esta manera interpretar el tipo de suelo según un rango de velocidades.

Los geófonos han sido históricamente dispositivos análogos pasivos, y a grandes rasgos es una bobina que cuelga en una perforación desde la superficie, esta interactúa con campos magnéticos producidos por imanes colocados a sus alrededores, para así obtener una señal eléctrica, como lo hace un generador [4].

Buscamos con este proyecto desarrollar un sistema similar al geófono pero con el uso de herramientas mucho más sencillas y prácticas, basados en ciencias como la mecánica y electromecánica, además de la programación como herramienta de la investigación.

### 3. Marco teórico

Busca relacionar la velocidad de propagación de una onda imitando movimientos sísmicos y usando herramientas tecnológicas. Mediante un prototipo de captación de esas vibraciones con sistemas arduino y sensores, este procedimiento de exploración geofísica nos permite obtener una idea general de las características del suelo.

Detectamos las ondas por medio de sensores que captan las vibraciones a través de placas arduino, basados en una data de programación; que serán interpretadas en un software para su posterior análisis.

La propagación de las ondas elásticas en el suelo, causadas por perturbaciones mecánicas, es el principio de las pruebas geofísicas, las cuales buscan mantener las propiedades geotécnicas naturales del suelo [5].

Las ondas elásticas se clasifican en ondas de cuerpo y ondas de superficie. Las ondas de cuerpo se dividen a su vez en ondas de compresión y ondas de corte. Las ondas de superficie son las ondas de Rayleigh y las ondas Love [6].

En el estudio de suelos, una de las ondas de superficie de mayor importancia son las ondas de Rayleigh. Estas son utilizadas en pruebas geofísicas y caracterización de los suelos, puesto que presentan propiedades físicas para la prospección sísmica. Estas ondas son fácilmente medibles desde la superficie del terreno y presentan una relación directa con la velocidad de propagación de ondas de corte [7].

El experimento consiste en obtener la velocidad ( $V_R$ ) en que se propaga la onda de Rayleigh en diferentes suelos.

Las ondas Rayleigh causan un movimiento rodante y sus partículas se mueven en forma elipsoidal en el plano vertical, que pasa por la dirección de propagación. En la superficie el movimiento de las partículas es retrogrado con respecto al avance de las ondas [8].

La velocidad de las ondas de Rayleigh ( $V_R$ ) es menor que la velocidad de las ondas de corte ( $V_S$ ) y es aproximadamente

$$V_R = 0.90 V_S \quad (1) \quad [8]$$

La velocidad de las ondas creadas como resultado de un impacto en un estrato de suelo dado se representa como muestra la ecuación (2). Por tanto podemos representar, entonces la velocidad de propagación de la onda de Rayleigh como se expresa en la ecuación (3).

Con la determinación de la velocidad de propagación de las ondas de Rayleigh se puede determinar el módulo de rigidez al esfuerzo cortante [5]. El módulo de cortante del suelo  $G_s$ , se determina a partir de la relación (4): [9]

$$V_S = \frac{L}{t} = \sqrt{\frac{G_s}{(\gamma/g)}} \quad (2)$$

$$V_R = \frac{L}{t} = \sqrt{\frac{G_s}{(\gamma/g)}} \quad (3)$$

ó

$$G_s = \frac{\left(\frac{V_R}{0.90}\right)^2 \gamma}{g} \quad (4)$$

Donde

$V_R$	= Velocidad de propagación de la onda de Rayleigh
$L$	= Longitud entre sensores
$t$	= Tiempo de viaje de la onda
$G_s$	= Módulo cortante del suelo
$\gamma$	= Peso específico del suelo
$g$	= Aceleración de la gravedad

### 4. Materiales y construcción del sistema

El equipo esencial para obtener los datos, independientemente de cada suelo, consiste en sensores, la unidad para captar los datos, la unidad de almacenamiento de los datos y los cables de conexión. Los datos registrados por cada uno de los sensores brindan la información necesaria de los movimientos que adquiere el suelo en función del tiempo en que se propagan las ondas. Estos datos se analizan con el fin de obtener el tiempo en que llegan las ondas a cada uno de los sensores desde el punto de perturbación [5].

Para la fabricación del sistema de análisis de velocidad de onda se utiliza el siguiente Hardware:

- Sensor: Acelerómetro de 3 ejes ADXL335
- Placa de Arduino UNO
- Cables de red
- Placas Protoboard
- Computadora
- Maso de 8 lb.

La cantidad de sensores nos representan los puntos en los que se procede a obtener la velocidad de onda de corte para un suelo específico.

El Software necesario se resume en:

- Programa Arduino 1.6.4.
- Driver para el Puerto USB de reconocimiento de la Placa Arduino.

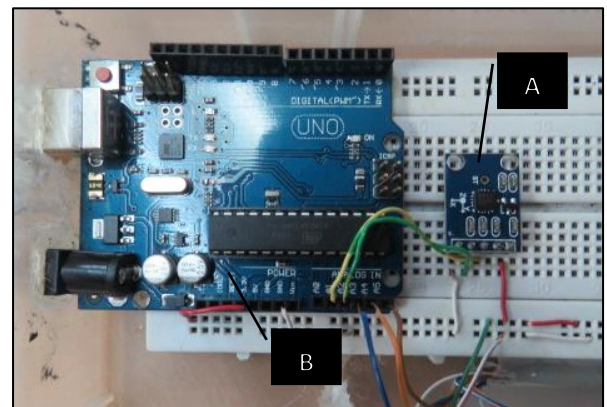
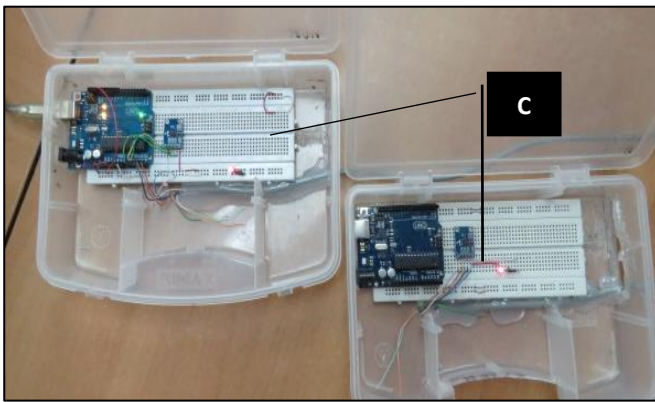


Figura 1. Placa pre-ensamblada Arduino UNO con sensor (A: acelerómetro ADXL335; B: Placa Arduino UNO).



**Figura 2.** Sistema EDMO, la placa protoboard se usa como soporte de los sensores acelerómetros. (C: Placa protoboard)

Para la construcción del Sistema EDMO se programaron los sensores a una sola placa con el fin de sincronizar los datos de cada uno de los sensores, conectándolos por medio de cables de red, pues tienen el diámetro necesario para captar los datos.

El Acelerómetro ADXL335 es el sensor que registra los datos de las aceleraciones, éste responde a una señal eléctrica ante cualquier perturbación. Los datos obtenidos se redujeron a voltajes proporcionales a la aceleración de cada eje en miliVoltios (mV) entre la gravedad de la Tierra (g) [10]. Luego de armado el Sistema de arduino y sensores, se procedió a conectarlos a una computadora, generando finalmente el geófono para captar los datos.

## 5. Programación del sistema

La programación para el sistema en general debe ser lo más sencilla posible, con la finalidad de que se pueda disminuir el tiempo de captación de los datos en los sensores. Como se describió anteriormente se conectarán los sensores a una sola placa Arduino UNO; esta es la placa de Arduino que se conecta al PC a través de un cable USB. Esta conexión permite la alimentación de la placa, además de programarla y utilizarla [4].

Arduino dispone de un terminal para visualizar las peticiones enviadas y recibidas en el momento que se establece una comunicación con dispositivos externos .

El rol de los dispositivos hardware dentro de un sistema está fundamentado en los procesos de captación, procesamiento y respuesta de las señales obtenidas del contexto, definidas como sensores y actuadores. Los sensores definidos como dispositivos encargados de obtener la información del contexto para transmitirla a la unidad de procesamiento, luego, los actuadores, quienes representan las acciones que afectan el ambiente. Los primeros signos son detectados a través de sensores, en este caso de movimiento, capaces de estimar los signos de la perturbación en el suelo [11]. El lenguaje de programación de Arduino será la herramienta para establecer la conexión del Sistema EDMO. (Ver figura 3). La programación en esta ocasión solo se enfoca en obtener los datos de la dirección Z de los tres ejes disponibles para estudio que es capaz de captar cada sensor, se escogió este eje por ser el que más se relaciona con la dirección de propagación de las ondas de Rayleigh.



**Figura 3.** Programación usada para el Sistema EDMO.

## 6. Metodología del Sistema EDMO

### 6.1 Metodología en campo

El sistema EDMO desarrollado constara de un conjunto de sensores, en esta experiencia se emplearon en primera instancia dos sensores para determinar el factor de escala  $F_{\delta t}$ , que se desarrollara posteriormente en este artículo; luego se dotara de un conjunto de seis sensores dispuestos de manera lineal a distancia de 5m entre sensores.

Como la base de este proyecto consiste en la captación de propagación de una onda imitando movimientos sísmicos, como generador de ondas se usa un mazo con peso de 36 N y 89 N, este último se prevé su uso cuando se conecten todos los sensores (ver figura 4).

La cantidad de veces y el tiempo de ejecución de producción de las ondas con el mazo, son factores independientes de los datos obtenidos, las mismas no representan hasta el momento en este proyecto factores a considerar en este estudio; sin embargo para futuro se puede establecer rangos o lapsos de tiempo establecidos para generar las ondas con fines de mayor exactitud de datos.

Después de captada la data necesaria del subsuelo a través del Sistema EDMO, previamente registrada en la computadora y almacenada, se procederá al análisis de la misma.



**Figura 4.** Sistema EDMO, generación de las ondas con un mazo de 36 N.

## 6.2 Metodología analítica de datos

A partir de la data obtenida en campo se procederá a determinar el tiempo en que los sensores captaron la onda, desde el primer sensor hasta el último. Luego de obtenido el tiempo de registro de onda de cada sensor, se procede a determinar la diferencia de tiempo entre sensores (5) de la siguiente manera:

$$\Delta t_i = t_n - t_{n-1} \quad (5)$$

Se procede entonces con el tiempo entre sensores ( $\Delta t_i$ ) y conocida la distancia entre sensores, usando la ecuación (3) de velocidad de las ondas Rayleigh  $V_R$ ; obtendremos la velocidad del suelo en cada tramo:

$$V_{R_i} = \frac{L}{\Delta t_i} \quad (3)$$

Dónde:

- $V_{R_i}$  = Velocidad de la onda de Rayleigh
- $L$  = Longitud entre sensores; 5m
- $\Delta t_i$  = Diferencia de tiempo entre sensores (s)

Posteriormente realizando un promedio de las velocidades obtenidas, tendremos una velocidad media  $\bar{V}_R$ ; la cual representa la velocidad del suelo estudiado. Con el uso de la ecuación (1), podemos la velocidad de onda de corte a partir de la velocidad de onda de Rayleigh determinado y con el uso de la Tabla 5. Buscamos en los rangos de velocidad establecidos, la velocidad obtenida y establecemos el tipo de suelo. Como proyección futura se pretende establecer un rango de velocidades usando este Sistema EDMO para cada suelo.

## 7. Datos obtenidos

### 7.1 Factor escala $F\delta t$

El factor escala consiste en un valor promedio, el cual representa el tiempo que tardan los sensores en captar en ciclos los datos que representan la aceleración del suelo. El mismo fue obtenido en un número de 4 pruebas durante un lapso de tiempo de 1 minuto y 2 minutos con un retardo (delay) de valor 0 para los sensores y una velocidad de entrada (serial begin) de 115200; velocidad de datos en bits por segundo (baudios) para la transmisión de datos en serie para comunicarse con el equipo. (Ver figura 3).

**Tabla 2.** Determinación del factor escala  $F\delta t$

PRUEBA	CANTIDAD DE DATOS	TIEMPO (s)	$F\delta t$ (s/datos)
1	91007	60	0.00065929
2	91975	60	0.00065235
3	180935	120	0.00066322
4	180908	120	0.00066332

Factor de escala:  $F\delta t = 0.00066$  s /datos.

A partir de la data obtenida en campo y con el factor de escala se puede determinar el tiempo en que los sensores captaron la onda, con la siguiente expresión (6):

$$t_n = F\delta t \times N_{datos} \quad (6)$$



**Figura 5.** Sistema EDMO, sondeo en suelo usando dos sensores dispuestos de manera lineal.

Dónde:

- $t_n$  = Tiempo registrado de la onda por sensor (s)
- $F\delta t$  = Factor de escala [0.00066 s /datos]
- $N_{datos}$  = Cantidad de datos (datos)

## 7.2 Pruebas en campo

Realizando la metodología en campo se obtuvo la siguiente data de información para un ensayo en suelo, usando dos sensores a 5m de distancia. (Ver tabla 4)

## 8. Análisis y discusión de resultados

Después de obtenida la data de campo, se procede entonces al análisis de los datos para el sondeo realizado.

### 8.1 Sondeo en suelo.

Calculamos la diferencia de tiempo entre sensores.

$$\Delta t_a = t_2 - t_1 = 3.44850 \text{ s} - 3.43596 = 0.01452 \text{ s.}$$

Conociendo la longitud de separación entre sensores  $L=5\text{m}$  y  $\Delta t_a$ , obtenemos la velocidad de onda de corte para el suelo.

$$V_R = \frac{5 \text{ m}}{0.01452 \text{ s}} = 344 \text{ m/s}$$

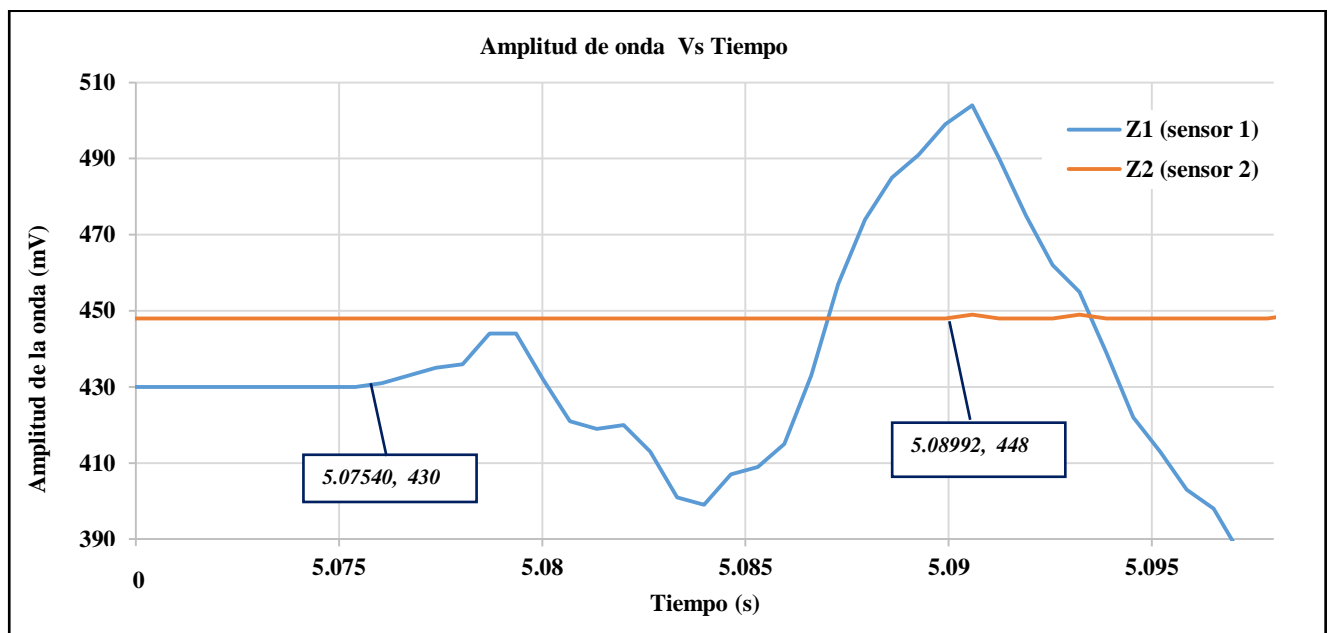
Con la velocidad de onda de Rayleigh de 344 m/s, calculamos la velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) en función de  $V_R$ , así entonces:

$$V_s = \frac{344 \text{ m/s}}{0.90} = 382 \text{ m/s}$$

Clasificándolo así como **Suelo muy denso y roca suave**, según rango de velocidades de la Tabla 5.

Con referencia a la tabla 5. Podemos deducir que según el sistema de clasificación de suelos establecido por la norma REP-04, Reglamento estructural de Panamá, el mismo es un suelo **tipo C**. Como podemos ver el sistema no solo permite establecer el tipo de suelo y sus características; sino además, se determina sin realizar ningún tipo de perforación.

En general los resultados obtenidos demuestran que este sistema al instante en que este armado o disponga de más cantidad de sensores contribuiría al desarrollo de la geotecnia, específicamente en el campo de las exploraciones del subsuelos. A futuro se considera crear un propio rango de valores para este sistema.



**Grafica 1.** Tiempo Vs Amplitud para una prueba realizada durante 15 segundos sobre un suelo usando dos sensores a 5m.

**Tabla 4.** N dato de 19210 por 15 segundos

N dato	Z1 (sensor 1) mV	Z2 (sensor 2) mV	Tiempo (s)
7690	430	448	5.07474
<b>7691</b>	<b>430</b>	448	<b>5.07540</b>
7692	431	448	5.07606
7693	433	448	5.07672
7694	435	448	5.07738
7695	436	448	5.07804
7696	444	448	5.07870
7697	444	448	5.07936
7698	432	448	5.08002
7699	421	448	5.08068
7700	419	448	5.08134
7701	420	448	5.08200
7702	413	448	5.08266
7703	401	448	5.08332
7704	399	448	5.08398
7705	407	448	5.08464
7706	409	448	5.08530
7707	415	448	5.08596
7708	433	448	5.08662
7709	457	448	5.08728
7710	474	448	5.08794
7711	485	448	5.08860
7712	491	448	5.08926
<b>7713</b>	<b>499</b>	<b>448</b>	<b>5.08992</b>
7714	504	449	5.09058

**Tabla 5.** Valores representativos de la velocidad de propagacion de la onda de corte ( $V_s$ ) para el tipo de perfil del suelo.

TIPO DE PERFIL DE SUELO	VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE ( $V_s$ )
<b>A</b>	<b>&gt;1500 m/s</b>
Roca dura	
<b>B</b>	<b>760 a 1500 m/s</b>
Roca	
<b>C</b>	<b>370 a 760 m/s</b>
Suelo muy denso y roca suave	
<b>D</b>	<b>180 a 370 m/s</b>
Suelo rígido	
<b>E</b>	<b>&lt;180 m/s</b>
Suelo blando	

[FUENTE: Noma REP-04, Reglamento estructural de Panamá 2004.]

## 10. Recomendaciones

Se descubrió que los geófonos han de ser colocados a gran distancia puesto que los sensores no consiguen detectar de manera adecuada los movimientos si se encuentran muy cerca; además desarrollando un código con menor cantidad de comandos, el sensor ofreció mejores resultados.

## 11. Conclusiones

Teniendo en cuenta todas las aplicaciones que posee un geófono; el Sistema EDMO diseñado puede servir para detectar la presencia de otras propiedades del suelo que se ven involucradas en la caracterización del mismo; además de poder detectar el agua bajo los estratos de tierra por medio de refracción sísmica, entre otras posibles aplicaciones.

El sistema construido en esta investigación es muy versátil, eficiente y muy económico. Además presenta ventajas como poder ser adaptado mediante programación para detectar ondas en cualquier eje (eje x, y, z) al mismo tiempo o individualmente.

Proyectamos para el futuro establecer rangos de valores propios de este sistema para cada tipo de suelo, con el fin de obtener información mucho más exacta para dicho sistema.

## RECONOCIMIENTO

Esta investigación fue posible gracias a la colaboración del Ingeniero Eloy Lezcano, Ingeniero Electrónico en computadoras; quién con su amplio conocimiento en el área de la electromecánica y programación nos encaminó en el desarrollo del mismo. También a nuestro compañero Juan Carlos Castillo quién aconsejó y proporcionó información de gran valor. Al Magister Luis Gómez por apoyarnos con equipo y asistencia electromecánica. A la Universidad Tecnológica de Panamá sede Chiriquí por todo el apoyo brindado para el desarrollo de la investigación.

## REFERENCIAS

- [1] J. P. L. E. y. T. A. Mayorca, «Pisco earthquake, Perú,» *JSCE/JAEE/UT Investigation Team*, p. 109, 2007.
- [2] C. Acuña, «Proyecto de grado: Sistema de control de bajo costo con arduino para diodos laser,» Universidad de Costa Rica, Costa Rica, 2010.
- [3] C. A. Bautista, «Desarrollo de un arreglo sísmico en base a microcontroladores RFPIC,» 06 abril 2006. [En línea].

Available:

<http://www.bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1940/1/C-D-0170.pdf>. [Último acceso: mayo 2015].

- [4] C. E. y. O. C. Bello, «Geófono, lector de movimiento de la tierra que salva vida,» Universidad Nacional de Colombia, Colombia, 2007.
- [5] J. A. Aponte, «Evaluación de métodos no convencionales de caracterización geotécnica,» Universidad Javeriana, Bogotá, 2011.
- [6] C. J. A., «Medición de módulo de Young y módulo de corte en situ de la formación de Panpeano mediante técnicas Geofísicas,» Colombia.
- [7] J. A. Pérez Santiesban, «Caracterización geotécnica de los suelos de Madrid mediante la técnica REMI,» Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 2011.
- [8] W. y. G. K. S. Griem, «Métodos geofísicos, geología general,» geovirtual2, 1999.
- [9] D. Braja, *Principios de Ingeniería de Cimentaciones*, California: Ceange Learning, 2011.
- [10] «ADXL335 Applications informations,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.analog.com/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL335.pdf>. [Último acceso: abril 2015].
- [11] E. Lledo, «Diseño de un sistema de control domótico basado en la plataforma Arduino,» Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2012.