

No. 24

ISSN No. 1390-8766

# GALILEO



Diciembre - 2014

"Galileo: Órgano Informativo de la Facultad de Ingeniería" editado por la Universidad de Cuenca

FACULTAD DE  
**INGENIERÍA**

---

**75**  
AÑOS

---

UNIVERSIDAD DE CUENCA

605

U48g

Si 9886



**EL CONCEJO CANTONAL DE CUENCA Y MARCELO CABRERA PALACIOS, SU ALCALDE**

**CONSIDERANDO:**

Que, la Ordenanza para el discernimiento de preseas a ciudadanos y entidades que se hayan destacado o que hubieren realizado aportes importantes a la Ciudad, las que se entregaran en las fiestas de Fundación y de Independencia de Cuenca, dispone que el Tres de Noviembre de cada año se otorgue la insignia "MUNICIPALIDAD DE CUENCA", a la persona o entidad que haya prestado trascendentales servicios a la ciudad o que hubiere ofrecido importante colaboración a la Municipalidad.

**RESUELVE:**

1.- Otorgar la Insignia "MUNICIPALIDAD DE CUENCA", a la

**FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA**

Por cumplir su Septuagésimo Quinto Aniversario de Fundación y como un reconocimiento a su labor de formación académica y humana de profesionales que aportan activamente al desarrollo de la ciudad y el país.

2.- Hacer entrega de la Insignia, junto con este acuerdo, en la Sesión Solemne de conmemoración del CXCIV Aniversario de la Independencia de Santa Ana de los Ríos de Cuenca, el Tres de Noviembre del año dos mil catorce.

Dado en la Sala de Sesiones del Concejo Cantonal, a los veinte y nueve días del mes de octubre del año dos mil catorce.

*[Handwritten signatures]*  
Ing. Marcelo Cabrera Palacios  
ALCALDE DE CUENCA  
CPA. Ruth Valdés  
VICEALCALDESA DE CUENCA

**LOS CONCEJALES**

- Dr. Marco Ávila Rodas
- Dr. Xavier Barrera Vidal
- Sra. Gabriela Brito Andrade
- Eco. Martha Castro Espinoza
- Sra. Paola Flores Jaramillo
- Dra. Narcisca Gordillo Cárdenas
- Dr. Iván Granda Molina
- Dra. Norma Illares Muñoz
- Tnlg. Carolina Martínez Ávila
- Ing. Dora Ordoñez Cueva
- Dr. Carlos Orellana Barros
- Lcdo. Lauro Pesantez Maxi
- Mgt. Monserath Tello Astudillo
- Dr. Cristian Zamora Matute
- Dr. Diego Monsalve Tamariz  
SECRETARIO DEL CONCEJO CANTONAL

*[Handwritten note]*  
Escriba 161879 (ms)

**194** AÑOS DE INDEPENDENCIA

8A-40.2



Ing. Felipe Cisneros, PhD.

**EDITOR**

## CONSEJO EDITORIAL

### INGENIERÍA CIVIL

Ing. Enrique Acosta, PhD., Universidad de Cuenca, Ecuador

Ing. Daniela Ballari, PhD., Universidad de Cuenca, Ecuador

Geó. Fulgencio Cánovas, PhD., Universidad de Cuenca, Ecuador

Ing. Juan Carrión, PhD., Universidad de Cuenca, Ecuador

Ing. Esteban Pacheco PhD., Universidad de Cuenca, Ecuador

### INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Ing. Eliezer Colina, PhD., Universidad de Los Andes, Venezuela

Ing. Luis González, PhD., Universidad de Los Andes, Venezuela

Ing. Alexandra La Cruz, PhD., Universidad Simón Bolívar, Venezuela

Ing. Hernando Merchán, MSc., Universidad de Cuenca Ecuador

Ing. Danny Ochoa, MSc., Universidad de Cuenca, Ecuador

Ing. Kenneth Palacio, MSc., Universidad de Cuenca, Ecuador

Ing. Fernando Mato, PhD., Universidad de Vigo, España,

Ing. Lisandro Solano, PhD., Universidad de Cuenca, Ecuador

### CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

Ing. Mauricio Espinoza, PhD., Universidad de Cuenca, Ecuador

Ing. Villie Morocho, PhD., Universidad de Cuenca, Ecuador

Ing. Diego Ponce, PhD., Universidad de Cuenca, Ecuador

Ing. Pablo Vanegas, PhD., Universidad de Cuenca, Ecuador

Ing. Lucía Lupercio, MSc., Universidad de Cuenca, Ecuador

### COORDINACIÓN GENERAL

Lcda. Rosa Ávila, Mag., Universidad de Cuenca, Ecuador





## CONTENIDO

Pags.

3

Consejo Editorial

7

Trascendencia de Galileo Galilei en el siglo XXI

8

Editorial: 75 Años de la Facultad de Ingeniería

### DEPARTAMENTOS DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA QUE COLABORAN CON LA FACULTAD DE INGENIERÍA

11

Coefficiente de conductividad hidráulica para un suelo heterogéneo mediante el método de pozo invertido

*ref. 161898*

14

Redes Eléctricas Inteligentes: Un nuevo modelo de red para alcanzar la eficiencia energética

*ref. 161899*

19

Implementación de software para EWBS con GINGA en TDT para Alertas Tempranas

29

Determinación de la altura de afloramiento en el talud de un canal no revestido: estudio analítico de la ecuación de Dupuit

*ref. 161909*

32

Aplicación del concepto de fuerza tractiva para el diseño de canales no revestidos

*ref. 161910*

35

Descripción del aforador trapezoidal Standard S359.1 para medición de flujo subcrítico

*ref. 161911*

39

Aforador Trapezoidal de Flujo Supercrítico







## CONTENIDO

43

Ensayos para la obtención de mapas de precipitación y temperatura de la cuenca del Paute a partir de datos de estaciones meteorológicas y técnicas de interpolación espacial y geoestadística

51

Revisión de Estado del Arte en Convertidores de Potencia Aplicado a "Calentamiento por Inducción"

### ARTICULISTAS INVITADOS

63

Publicación de contaminantes atmosféricos de la estación de monitoreo de la EMOV-EP de Cuenca, utilizando servicios estándares OGC

72

Estudio de comportamiento hidráulico de Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial

78

Sistema de monitoreo hidrometeorológico de ETAPA EP

84

Gestión de los Desechos Infecciosos en el cantón Cuenca

90

Aprovechamiento del biogás del relleno sanitario de Pichacay para la generación de energía eléctrica

96

Cuenca Ciudad Digital

107

Movilidad del Cantón Cuenca

## Trascendencia de Galileo Galilei en el Siglo XXI



El 15 de febrero de 2014, se cumplió, exactamente, 450 años del natalicio de GALILEO GALILEI, considerado el padre de la ciencia, la astronomía y la física moderna. Galileo nació el 15 de febrero de 1564 y falleció en 1642.

“Quizá sea porque su luz se refracta en la humedad que cubre la pupila, o porque se refleja desde los bordes de los párpados y luego estos rayos se difunden sobre la pupila, o por alguna otra razón”, sentenció Galileo. Al respecto un equipo de investigadores de la Universidad Estatal de Nueva York descubrió que una respuesta neuronal diferente a los colores claros y oscuros está detrás de la ilusión óptica, resolviendo así la hipótesis del matemático, físico, astrónomo y filósofo Galileo Galilei, de quien, este año, se conmemora el 450 aniversario de su natalicio.

Sus biógrafos aseguran que en 1585 comenzó su producción científica, realizando teoremas acerca del centro gravitatorio de algunos materiales sólidos, además de reconstruir la balanza hidrostática de Arquímedes, estudiar las oscilaciones del péndulo e inventar el pulsímetro. Durante este mismo período trabajó como profesor de matemáticas en la Universidad de Pisa. Paralelo a su labor docente escribió un texto sobre la caída libre de los cuerpos y el movimiento de los proyectiles, contraponiéndose a la postura de Aristóteles. En su último libro, “Discursos sobre dos nuevas ciencias”, estableció la mecánica como nueva ciencia y marcó el fin de la física aristotélica.



## EDITORIAL

Patricio Guerrero Villavicencio  
Ex Decano de la Facultad de Ingeniería  
de la Universidad de Cuenca

## ¿TORRES DE BABEL?

La Biblia, en uno de sus más conocidos pasajes, cuenta la historia del ambicioso proyecto que tenía por objeto construir una torre tan alta que llegara hasta el cielo: la Torre de Babel. Dios vio con desagrado este plan, pues lo consideró una muestra de la soberbia del ser humano, y decidió impedir su culminación para lo cual hizo que cada uno de los diferentes grupos de personas que participaban empezaran a hablar en idiomas diferentes, haciendo imposible la comunicación entre ellos y causando con ello el fracaso del proyecto.

Obviamente, el lenguaje metafórico de esta historia bíblica no puede ser entendido de manera literal; sin embargo, es evidente el mensaje que se transmite: ningún proyecto puede culminar exitosamente si no existe entre los participantes un nivel adecuado de comunicación.

Es una creencia arraigada que los ingenieros somos malos para comunicar nuestras ideas, tanto en forma oral como por escrito. Se dice que nuestra formación profesional enfatiza en el manejo de los números y las ecuaciones y, por su intensidad, asfixia otros talentos como el que se refiere al buen uso del lenguaje. Algo de esto es cierto pues, si tomamos en cuenta los contenidos y los objetivos de

las asignaturas que se enseñan en las carreras de ingeniería, muy pocas de ellas apuntan a cultivar las habilidades de comunicación de los estudiantes. Aún entre los docentes, hasta hace poco tiempo no existía una cultura generalizada de hacer buen uso del idioma para la comunicación.

En la vida profesional muy frecuentemente se deben redactar informes o propuestas, se deben hacer presentaciones en público, se tiene que participar en reuniones de trabajo en las que hay que defender criterios técnicos o mantener puntos de vista para una negociación o se tiene que trabajar en equipos multidisciplinarios con el fin de ejecutar proyectos de gran complejidad. En este entorno, disponer de destrezas adecuadas de comunicación viene a ser una necesidad imperiosa y, al hablar de este tema, no podemos en la época actual referirnos solamente al idioma español sino también, de manera obligatoria, a la lengua inglesa que se ha convertido, de facto, en un lenguaje universal, especialmente en las áreas técnicas.

De allí que quienes trabajamos en el mundo académico debemos preocuparnos de cultivar estas habilidades, sea cual sea la carrera en la que nos desenvolvamos y, particularmente, en las áreas de la ingeniería y dado que la práctica es la mejor for-

ma de adquirir tales destrezas, estamos obligados a generar los espacios en los que nuestros alumnos, bajo la guía de sus profesores, practiquen la escritura, diserten en público y ganen seguridad en el uso del idioma. En lo que concierne a los profesores, se debe fomentar la práctica de la escritura y la expresión oral y crear los instrumentos de difusión adecuados.

Es por eso que, como un esfuerzo de las autoridades de la Facultad de Ingeniería para fomentar la práctica de la escritura y la publicación de trabajos técnicos, temas sociales, etc., se creó "Galileo", la revista de difusión de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca.

El nombre "Galileo" empezó a usarse en el año 2001, en el Decanato del Ing. Hernando Merchán; sin embargo, antes de ello, existió un período de formación en el que se empezaron a hacer publicaciones (en forma bastante precaria, pues las condiciones técnicas y económicas disponibles eran muy reducidas) en las que los estudiantes y los profesores de la Facultad pudieran publicar sus escritos, sus ideas, sus poemas, etc. (De todo ha habido en más de 15 años transcurridos desde aquellas primeras épocas). Indisolublemente unida a la historia de estas publicaciones está la docente Rosita Ávila que llegó a la Facultad a fines de la década de los 90 y con quien, en esa época dialogamos sobre la importancia de crear un órgano de difusión. Yo por esa época desempeñaba las funciones de Director de la Escuela de Informática y, a partir de aquellos diálogos con Rosita, salieron las primeras ediciones de aquella publicación sin nombre que unos años después adoptó el nombre de "Galileo".

Ahora que ha pasado el tiempo, podríamos preguntarnos: ¿Ha sido "Galileo" una solución para superar aquella atávica deficiencia de habilidades de comunicación en nuestra Facultad? ¿Es razonable continuar con su publicación? ¿Cuál debe ser su futuro? Respondiendo a estas interrogantes, debemos decir que nunca se había pensado que la simple publicación de la revista pueda corregir de manera radical los problemas de comunicación. Sin embargo, es necesario continuar y robustecer esta iniciativa pero, adicionalmente, generar otros espacios con este mismo propósito para avanzar hacia el objetivo soñado de que los graduados de nuestra Facultad posean las destrezas indispensables en materia de comunicación.

Desde luego, "Galileo" ha tenido muchos méritos pero también un desarrollo menor al que se podría haber llegado. ¿Falta de recursos? ¿Falta de percepción sobre la importancia de los temas de comunicación? ¿Falta de una masa crítica de personas que puedan dar el impulso necesario? No importa la causa; el hecho es que las condiciones adversas van cambiando y que, poco a poco, "Galileo" y otros medios de comunicación van encaminándose hacia un fortalecimiento cada vez mayor.

Recordando el pasaje bíblico mencionado al inicio de este artículo, debemos reconocer la necesidad de trabajar de manera intensa para conseguir un manejo fluido de las técnicas de comunicación por parte de nuestros estudiantes y profesores para eviten que los proyectos en los que trabajen se conviertan en modernas Torres de Babel. Hace 17 años escribí un artículo parecido a éste, inspirado en este fragmento de la Biblia, que apareció como editorial en el primer ejemplar de aquella publicación sin nombre que fue la precursora de lo que hoy es la revista "Galileo". Ya no recuerdo lo que escribí en esa ocasión y, lamentablemente, parece que no se han conservado ejemplares de esa edición pero supongo que los conceptos serían más o menos los mismos.

Fue un honor para mí participar en aquella etapa inicial de la que pocos guardamos recuerdos; también es un honor para mí que, en los últimos días de mi carrera académica pues me jubilaré en muy pocos días, se me dé la oportunidad de escribir estas líneas que espero que sirvan para incentivar el trabajo en esta materia indispensable para los ingenieros: la comunicación.

En la presente edición se incluyen varios artículos, algunos de los cuales tienen como autores a profesores de la Facultad pero, la mayoría han sido elaborados por estudiantes:

#### En la rama de la Hidráulica aparecen los siguientes:

- "Coeficiente de conductividad hidráulica para un suelo heterogéneo mediante el método del pozo invertido", cuyos autores son los Ingenieros Guillermo Martínez y Carlos Romero, del Grupo de Matemáticas de la Facultad de Ingeniería y el Ing. Esteban Pacheco, del Departamento de Ingeniería Civil



- "Determinación de la altura de afloramiento en el talud de un canal no revestido: estudio analítico de la ecuación de Dupuit", cuyo autor es el Sr. David Durán, de la carrera de Ingeniería Civil, desarrollado bajo la responsabilidad de los profesores Guillermo Martínez y Esteban Pacheco.
- "Aplicación del concepto de fuerza tractiva para el diseño de canales no revestidos", cuyos autores son los estudiantes Ma. Fernanda Espinoza y Manuel Campoverde, de la carrera de Ingeniería Civil.
- "Descripción del aforador trapezoidal Standard S359.1 para medición de flujo subcrítico", escrito por los estudiantes Pedro José Castro Serrano, Eduardo José Moreno Carvallo y Juan José Vintimilla Sánchez, de la carrera de Ingeniería civil.
- "Aforador trapezoidal de flujo supercrítico", escrito por los estudiantes Byron Parra, Cristian Pinos y Daniel Rodríguez, de la carrera de Ingeniería Civil.

Los tres últimos trabajos mencionados, han sido desarrollados bajo la responsabilidad del Ing. Esteban Pacheco, Msc., Director del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca. Creo que es oportuno dejar sentado el reconocimiento para este catedrático que está contribuyendo de una forma tan entusiasta y comprometida a la difusión de estos temas.

#### En la rama de la Ingeniería eléctrica, aparecen:

- "Redes eléctricas inteligentes (smart grids): un nuevo modelo de red para alcanzar la eficiencia energética", cuyo autor es el Ing. Danny Ochoa Correa, profesor de la Facultad y miembro del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.
- "Revisión del estado del arte en convertidores de potencia, aplicado al calentamiento por inducción", elaborado por los estudiantes Kevin Chaca, Fabián Naula, Gino Jaramillo, Felipe Torres y Mateo Zúñiga, estudiantes de la Facultad, bajo la responsabilidad del Ing. Luis González, PhD, Profesor Prometeo que ejerce la docencia en la carrera de Ingeniería Eléctrica.

#### En el área de la Geomántica:

- "Ensayos para la obtención de mapas de precipitación y temperatura de la cuenca del Paute a partir de datos de estaciones meteorológicas y técnicas de interpolación espacial y Geoestadística", elaborado por los estudiantes Nazareth Puga, John Jiménez, David Solís, Eduardo Cabrera, Jorge Durán, Tomás Salamea y Andrés Zalamea, de la Facultad de Ingeniería, bajo la responsabilidad del docente Enrique Acosta, PhD.

#### En el área de Software:

- "Implementación de software para EWBS con GINGA en TDT para alertas tempranas", de los investigadores Sonia Barreto Barros y Villie Morochó Zurita del Departamento de Ciencias de la Computación de la Universidad de Cuenca.

Se cuenta también con la colaboración de los investigadores Chester Andrew Sellers Walden, del Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador, adscrito a la Universidad del Azuay y Josué Bernardo Larriva Vázquez, de la Gerencia de Agua Potable y Saneamiento de la empresa ETAPA EP. Del primero de ellos, el artículo "Publicación de contaminantes atmosféricos de la estación de monitoreo de la ciudad de Cuenca, utilizando servicios estándares OGC" y, del segundo, los artículos "Estudio del comportamiento hidráulico de humedales artificiales de flujo subsuperficial" y "Sistema de monitoreo hidrometeorológico de ETAPA EP".

¿Les parece ésta una buena selección de artículos?

¿Estamos contribuyendo a la divulgación científica y fomentando la utilización del idioma para este propósito? ¿Está cumpliendo "Galileo" las finalidades para las que fue creada? Mi respuesta es sí; luego, sigamos adelante.

## Coeficiente de conductividad hidráulica para un suelo heterogéneo mediante el método de pozo invertido

GUILLERMO MARTÍNEZ L., Grupo de Matemáticas de la Facultad de Ingeniería  
CARLOS ROMERO J., Grupo de Matemáticas de la Facultad de Ingeniería  
ESTEBAN PACHECO T., Departamento de Ingeniería Civil

Fecha de recepción: septiembre 15, 2014  
Fecha aceptación: noviembre 20, 2014

### Resumen

Como un aporte para la aplicación de métodos que permitan la caracterización in situ de las propiedades hidrofísicas de suelos, se indica el desarrollo analítico de una ecuación que establece la conductividad hidráulica saturada, para un ensayo de medición con el método de pozo invertido en un suelo heterogéneo con dos estratos. Se parte de los principios físicos y ecuaciones que gobiernan el flujo de agua en un medio poroso, y en consideración del procedimiento establecido para el método de medición, se establece una relación general para la estimación del coeficiente de conductividad hidráulica saturada del estrato inferior de un suelo heterogéneo. El presente trabajo es un ejemplo de aplicación y desarrollo de conceptos teóricos para el estudio de un fenómeno físico particular, por lo que se constituye en un documento de revisión y consulta para apoyar la práctica docente en las áreas de las Matemáticas Aplicadas, Ingeniería de Irrigación y Drenaje, así como para fomentar la lectura académica en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca.

Palabras Clave: Coeficiente de conductividad hidráulica, Ensayo de pozo invertido

### Abstract

As a contribution to the characterization of hydro-physical soil properties, An analytical equation, which establishes the saturated hydraulic conductivity for reverse the auger hole method in a heterogeneous soil with two layers has been developed. Based on the physical principles and equations governing the flow of water in a porous medium, and in consideration to the procedure for the measurement methods, a general relationship for the estimation of saturated hydraulic conductivity coefficient is established. This work is an example of application and theoretical development for the study of a par-

ticular physical phenomenon concepts, and constitutes a document for review and consultation in order to support the teaching practice in the areas of Applied Mathematics, Engineering Irrigation and Land Drainage. This document will be useful for academic reading in the Faculty of Engineering at the University of Cuenca.

Keywords: Hydraulic conductivity coefficient, Reverse auger hole method

### I. INTRODUCCIÓN

En muchas aplicaciones de ingeniería, por ejemplo, proyectos de ingeniería de riego, el control del nivel freático en construcciones, obras de drenaje y control de escorrentía para proyectos viales, entre otros, la determinación de las propiedades hidrofísicas de los suelos es fundamental para caracterizar el comportamiento del flujo del agua a través del suelo. De entre dichas propiedades, la conductividad hidráulica es, quizás, el parámetro más importante que permite entender y predecir los procesos relacionados a la presencia de agua en un medio poroso.

La conductividad hidráulica puede ser determinada mediante métodos de laboratorio o mediante métodos de campo. El método de laboratorio más empleado es el método de permeámetro (carga constante y carga variable). Entre los métodos de campo, se pueden mencionar entre otros: los procedimientos de sondeo (Hooghoudt auger hole method y Hooghoudt reverse auger hole method), el método de medición en piezómetros, el ensayo de bombeo en pozos, el ensayo de infiltración de doble anillo y el método de doble tubo.

El método del sondeo de pozo invertido (Hooghoudt reverse auger hole method) es un proce-



dimiento relativamente simple, basado en el desarrollo original que fue realizado para el proceso de recarga de un pozo [1], [2], [3]. El método contempla la elaboración de un pozo barrenado sobre el nivel freático y que es llenado de agua. La determinación de la conductividad hidráulica se realiza mediante la medición del descenso del nivel de agua que sucede en el pozo debido al proceso de infiltración hacia el suelo circundante. Ernst (1950), estableció que el proceso es controlado por la relación existente entre la conductividad hidráulica del suelo y las condiciones de frontera de acuerdo a la siguiente expresión [4]:

$$K=C\Delta h / \Delta t \quad (1)$$

donde:  
*K* = conductividad hidráulica del suelo  
*C* = factor que es función de la altura de agua en el pozo, el radio y la distancia al nivel impermeable  
 $\Delta h / \Delta t$  = tasa de descenso de agua en el pozo barrenado (Figura 1)

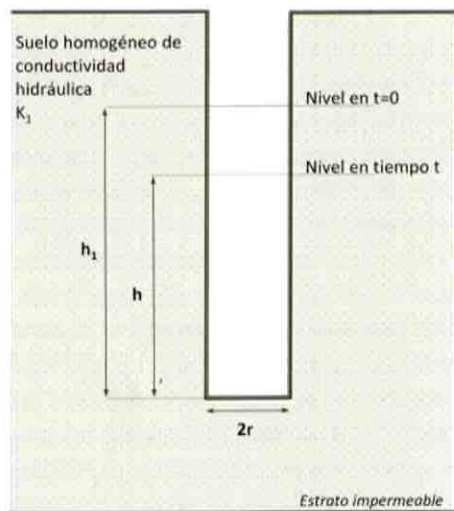


Figura 1: Esquema del pozo barrenado en un suelo homogéneo

La conductividad hidráulica para un suelo homogéneo (un solo estrato) puede ser establecida de acuerdo a la ley de Darcy [5] que es la relación gobernante del flujo. Despreciándose el potencial hidráulico en la matriz del suelo y dado que las profundidades consideradas son relativamente superiores a las cargas hidráulicas presentes, el gradiente hidráulico *i* es semejante a la unidad [6]. De esta manera, para una altura de carga de agua *h* sobre el fondo del pozo en cuestión (Figura 1), se cumplirá la relación:

$$K_1 2\pi r(h+r/2) = -\pi r^2 dh/dt \quad (2)$$

Para este caso, la integración entre los límites:  
 $t_i = 0, h_i = h_1$   
 $t_{ii} = t, h_{ii} = h$

permitirá tener:

$$K_1 = (r/2t)[Ln(h_1+r/2) - Ln(h+r/2)] \quad (3)$$

En un ensayo de campo convencional, los datos obtenidos generan una gráfica cuya pendiente en el tramo final de la prueba (estado de equilibrio) permite obtener la conductividad hidráulica.

## 2. CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA PARA EL SEGUNDO ESTRATO

Para la configuración que adquiere el problema del flujo de agua en un suelo con dos estratos (Figura 2), y dado que la velocidad de flujo en el medio poroso se vuelve igual al coeficiente de conductividad hidráulica correspondiente, el flujo de agua *Q* que sale del pozo barrenado debido a la infiltración horizontal a través de las paredes y por flujo vertical a través del fondo, se establece como:

$$Q = K_1 2\pi r(h-h_2) + K_2 2\pi r h_2 + K_2 \pi r^2 \quad (4)$$

Por otro lado, la velocidad de descenso del nivel de agua en el pozo durante la prueba se establece como:

$$Q = -\pi r^2 dh/dt \quad (5)$$

La combinación de las ecuaciones (4) y (5) da como resultado:

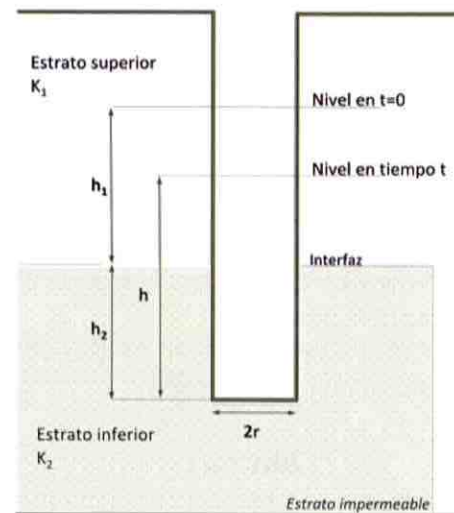


Figura 2: Esquema del pozo barrenado en un suelo con dos estratos

$$K_1 2\pi r(h-h_2) + K_2 2\pi r h_2 + K_2 \pi r^2 = -\pi r^2 dh/dt \quad (6)$$

$$dt = \frac{-\pi r^2 dh}{K_1 2\pi r(h-h_2) + K_2 2\pi r h_2 + K_2 \pi r^2}$$

La integración entre los límites:

$$t_i = 0, h_i = h_1 + h_2$$

$$t_{ii} = t, h_{ii} = h \text{ con } h > h_2$$

da como resultado:

$$2K_1 t/r = Ln[2K_1 h_1/r + 2K_2 h_2/r + K_2] - Ln[2K_1 (h-h_2)/r + 2K_2 h_2/r + K_2]$$

$$e^{2K_1 t/r} = \frac{[K_1 h_1 + K_2 (h_2 + r/2)]}{[K_1 (h-h_2) + K_2 (h_2 + r/2)]}$$

Finalmente, se puede obtener la siguiente relación para la conductividad hidráulica del estrato inferior:

$$K_2 = \frac{K_1 h_1 - K_1 (h-h_2) e^{2K_1 t/r}}{(h_2 + r/2)(e^{2K_1 t/r} - 1)} \quad (7)$$

## 3. CONCLUSIONES

Partiendo de la ley de Darcy y de los principios físicos que rigen el flujo de agua, a través de un pozo barrenado en un suelo con dos estratos, se ha planteado el modelo de infiltración, para una prueba de pozo invertido (Hooghoudt reverse auger hole method).

Se ha derivado la expresión para la conductividad hidráulica *K1* correspondiente a un ensayo de pozo invertido barrenado en el estrato superior homogéneo.

Se ha establecido una expresión para el coeficiente de conductividad hidráulica *K2* del estrato inferior para un suelo heterogéneo.

Se establece para *K2*, una función exponencial del tiempo de prueba, así como del valor de la conductividad hidráulica del estrato superior *K1*. Dependiendo de la relación entre el descenso del nivel y el tiempo de ensayo, se podría obtener valores de *K2* menores o mayores que *K1*.

De acuerdo a la inspección analítica de la ecuación obtenida para *K2*, y para condiciones comunes da-

das para un ensayo de campo (radio del pozo, *h1*, *h2*), se establece que:

- Conociéndose el valor de *K1*, los valores a obtenerse para *K2*, obedecen a un comportamiento exponencial que disminuye rápidamente al inicio de la prueba y tienden a estabilizarse luego de transcurrido un tiempo tal en el que se llegue al valor de equilibrio conocido como infiltración básica del estrato inferior.

- El comportamiento de la ecuación obtenida es muy sensible a la relación entre las alturas *h1/h2*. El descenso de los valores de *K2* es mayor para grandes relaciones *h1/h2*; mientras que, para relaciones pequeñas de *h1/h2* pueden presentarse valores negativos.

- El comportamiento de la ecuación es sensible al valor de *h2*, recomendándose valores de al menos 30 cm para el ensayo.

- El valor de *K2* experimenta variaciones de orden de  $\pm 25\%$  para aumento o disminución de 10% en el valor del radio del pozo.

Se concluye que, es factible derivar la conductividad hidráulica del estrato inferior de un suelo heterogéneo, mediante un ensayo de pozo invertido, conociéndose las relaciones geométricas respectivas y el coeficiente de conductividad del estrato superior.

Se recomienda llevar a cabo una validación de la expresión propuesta, así como de las conclusiones, inicialmente, expuestas mediante ensayos de campo para diferentes tipos de suelo y para diferentes condiciones de la relación *K1 / K2*.

## REFERENCIAS

[1] HOOGHOUDT, S. B. (1936) Bijdragen tot de kennis van enige natuurkundige grootheden van de grond. Verslagen Landbouwkunding. Orderzoek, No. 42 (13) B: 449-541, The Hague.

[2] VAN BEERS, W. F. J. (1970) The auger hole method: a field measurement of the hydraulic conductivity of soil below the watertable. Rev. Ed. ILRI International Institute for Land Reclamation and Improvement Bulletin No. 1., Wageningen, The Netherlands. 32p.

[3] KIRKHAM, D., van BABEL, C.H.M. (1948) Theory of seepage into augerholes. proceedings of the Soil Science Society of America, 13:75-81.

[4] ERNST, L. F. (1950) A new formula for the calculation of the permeability factor with the auger hole method. T. N. O. Groningen. Translated from Dutch by H. Bower, Cornell Univ., Ithaca, N.Y.

[5] DARCY, H. (1856). Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Dalmont, Paris, pp.674

[6] RITZEMA H. P. (1994) drainage principles and Applications. ILRI International Institute for Land Reclamation and Improvement Publication No. 16. Second edition, Wageningen, The Netherlands pp. 461-465.



## Redes Eléctricas Inteligentes: Un nuevo modelo de red para alcanzar la eficiencia energética

DANNY OCHOA CORREA, Universidad de Cuenca,  
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

Fecha de recepción: septiembre 15, 2014  
Fecha aceptación: noviembre 20, 2014

### Resumen

Este artículo presenta una visión general del nuevo paradigma en la gestión del sistema eléctrico tradicional: las redes eléctricas inteligentes. Se analizan los antecedentes y los justificativos que motivaron el desarrollo de esta nueva tendencia, definiciones formales y los beneficios tanto para las empresas distribuidoras como para los consumidores. El objetivo principal del nuevo modelo energético es reducir las pérdidas de energía y consecuentemente mejorar la eficiencia energética. Finalmente, se analiza el panorama nacional en este contexto, mediante el programa gubernamental "Redes Inteligentes Ecuador" –REDIE, en ejecución desde 2013, y con el que se pretende alcanzar la eficiencia energética en 2030. Este proyecto ha colocado al Ecuador como pionero a nivel latinoamericano en proponer y ejecutar iniciativas para la implementación de redes eléctricas inteligentes.

**Palabras Clave:** redes eléctricas inteligentes, eficiencia energética.

### Abstract

This article presents an overview of the new paradigm in traditional power system management: smart grids. Background and supporting that motivated the development of this new trend, formal definitions and benefits for both distributors and consumers are analyzed. The main objective of the new energy model is to reduce energy losses and thus improve energy efficiency. Finally, the national picture is reviewed in this context, by the government program "Redes Inteligentes Ecuador" -REDIE, running since 2013, and which aims to achieve energy efficiency in 2030. This project has placed Ecuador as pioneer Latin America in proposing and implementing initiatives for the implementation of smart grids.

**Keywords:** smart grids, energy efficiency.

### I. INTRODUCCION

El vertiginoso crecimiento de la demanda de energía eléctrica, el incremento de la participación de centrales de generación mediante energía renovable en los sistemas eléctricos de potencia, la necesidad de mejorar la calidad y confiabilidad del servicio eléctrico, están propiciando a nivel mundial la aparición de un nuevo concepto de red eléctrica: las redes inteligentes (Smart-Grids).

Se pretende transformar el sistema actual en un sistema distribuido, en el cual, cualquier agente (generador o consumidor) que esté conectado a la red tenga la posibilidad de aportar energía, propiciando la creación de micro-centrales de generación de forma que no exista una dependencia energética tan directa con las grandes centrales eléctricas, como ocurre con la generación centralizada vigente hoy en día.

No hay que desconocer que, la infraestructura actual del sistema eléctrico ha cumplido plenamente con las necesidades del usuario bajo estándares técnicos y económicos adecuados, sin embargo, la tendencia actual es diversificar las fuentes de energía, lograr un mayor aprovechamiento de las energías renovables, mejorar la eficiencia y maximizar el ahorro energético, algo que es alcanzable con el nuevo modelo de red eléctrica.

### 2. ¿QUE ES UNA SMART GRID?

El concepto de Red Eléctrica Inteligente (REI), podría acuñarse al considerarla como una red eléctrica de transmisión y distribución capaz de capturar información (potencia y energía), procesarla y tomar acciones automáticas para gestionar de manera óptima su generación y consumo. Para ello hace uso de las tecnologías de la información y comunicación (TIC), propiciando la interacción entre el consumidor final y las compañías eléctricas, dando

la posibilidad a los clientes de beneficiarse de servicios adicionales al eléctrico propiamente dicho. A este nuevo paradigma de red eléctrica se encuentra asociada la posibilidad de incorporar con relativa facilidad las energías renovables, con los problemas que éstas suponen de cara a su planificación y operación debido al carácter intermitente del recurso primario.

Desde el punto de vista formal, la Plataforma Tecnológica Europea de Redes Inteligentes, define este nuevo modelo de red como: "una red eléctrica capaz de integrar de forma inteligente el comportamiento y las acciones de todos los usuarios conectados a ella – generadores, consumidores y aquellos que realizan ambas acciones – con el fin de distribuir de forma eficiente y segura el suministro eléctrico, desde el punto de vista sostenible y económico."

La figura 1 muestra un esquema general de una red eléctrica inteligente. En ésta se identifica a cada uno de los agentes del sistema eléctrico: grandes centrales de generación convencionales y no convencionales, mini-centrales de generación distribuida usando como fuente primaria recursos renovables y no renovables, y finalmente, consumidores industriales, comerciales y residenciales que eventualmente se convierten en productores de energía cuando son capaces de verter el excedente de su micro-generación a la red de distribución. La interacción entre los diferentes agentes de la red inteligente y su

gestión está gobernada por un sistema de control centralizado.

Una red eléctrica inteligente está basada en el uso de sensores, sistemas de comunicación, capacidad de computación y control, mejorando en todos los aspectos las funcionalidades del suministro eléctrico. Gracias a estas nuevas características, es posible alcanzar los siguientes objetivos [2]:

- Permitir la participación activa de los usuarios en la red.
- Permitir la coexistencia de los diferentes generadores en la red independientemente de su tamaño o tecnología.
- Proporcionar a los usuarios una mayor cantidad de información y opciones a la hora de seleccionar el suministro eléctrico.
- Reducir el impacto ambiental por medio de mejoras en la eficiencia de la generación y el transporte energético.
- Mejorar la calidad del suministro de energía eléctrica.
- Mejorar y ampliar los servicios energéticos de manera eficiente.

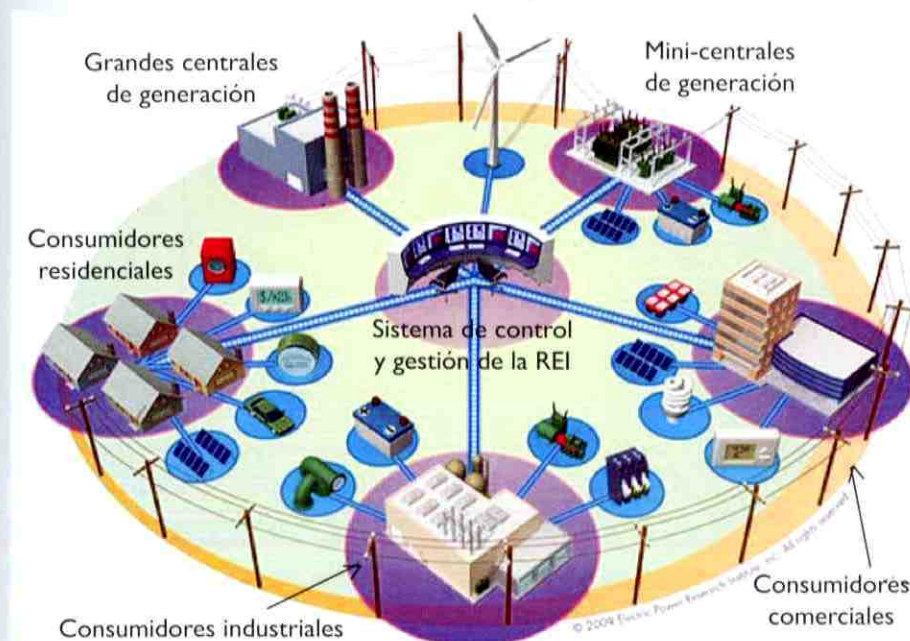


Figura 1. Esquema general de una red eléctrica inteligente.

(Tomado de: Electric Power Research Institute, 2009).



### 3. REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES Y LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

La eficiencia energética se consigue implicando de manera directa al usuario, pues se ha dicho que éste cumple un papel importante dentro de la red inteligente. En un escenario de tarifas dinámicas del servicio eléctrico (precio variable en función de las horas de máxima y mínima demanda), el usuario debería conocer esta información en tiempo real. Esto sería posible si se reemplazara, en cada uno de los hogares, los medidores de energía tradicionales por medidores inteligentes (smart-meters).

Los beneficios que ofrecen las redes eléctricas inteligentes se aplican de manera directa tanto a las empresas de generación, transporte y distribución de energía eléctrica como a los consumidores (Tabla 1) [3].

#### Empresas distribuidoras

**Reducción de pérdidas de energía:** La compañía es capaz de monitorizar la energía suministrada al usuario y la consumida por éste, y tomar acciones correctivas y de optimización de la red para minimizar las pérdidas.

**Eficiencia:** Con la información proporcionada por los medidores inteligentes instalados en cada punto de consumo, la empresa distribuidora puede estudiar complejos modelos de demanda eléctrica e identificar alternativas que posibiliten su óptimo aprovechamiento que posteriormente serán notificadas al usuario.

Es posible mejorar el servicio eléctrico ofertado por la compañía al brindar más ventajas comerciales a los usuarios: nuevas tarifas, pago por uso, etc.

#### Usuario o consumidor final

**Pago por uso:** al no ser necesaria una lectura manual de la energía consumida, se eliminan los recibos estimados y los usuarios sólo pagan por lo que consumen.

**Tarifas diferenciadas:** las empresas gestionan diversas tarifas para optimizar el consumo de la energía, lo que permite al usuario obtener el mínimo costo sin afectar su confort.

**Gestión remota del suministro de energía:** no será necesario una intervención local para activar, terminar o incrementar el suministro.

Tabla 1. Beneficios que ofrecen las redes eléctricas inteligentes para las empresas distribuidoras y los consumidores [1].

Con el propósito de hacer este nuevo modelo de red eléctrica técnicamente factible, es necesario también impulsar la investigación y desarrollo (I+D) en el ámbito de las telecomunicaciones para el avance de las técnicas de automatización y la optimización de las existentes. De esta forma, tecnologías como: PLC (Power Line Communications), conexiones inalámbricas o fibra óptica, constituyen el pilar fundamental en el desarrollo de la red eléctrica del futuro.

Con lo expuesto hasta aquí, queda claro que uno de principales protagonistas de la red eléctrica inteligente es el usuario, del cual se espera una participación activa. Para que el usuario se adapte al nuevo paradigma, debe, entre otras cosas, ofrecer una característica de consumo flexible y ajustable, lo cual constituye uno de los retos más importantes, pues habrá que convencerlo de modificar ciertos hábitos en el uso de la energía.

Un punto sensible que puede ser afectado para lograr este cometido es el factor económico. El establecer una tarifa eléctrica con discriminación horaria, en donde la energía sea más cara en las horas de demanda pico, conllevaría a que el usuario ponga en funcionamiento sus electrodomésticos, no cuando éste lo desee sino cuando sea económicamente más rentable, sin que esto conlleve a la pérdida de confort, por supuesto.

### 4. SMART GRIDS EN ECUADOR

En el mes de enero de 2013, el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, conjuntamente con varios actores de este sector presentaron el programa "Redes Inteligentes Ecuador" (REDIE), con el que se pretende implementar un nuevo modelo de gestión del sistema eléctrico, haciendo uso de tecnologías avanzadas de medición, monitorización y comunicación para alcanzar la eficiencia energética [4].

Con este programa se busca optimizar la planificación y operación de los sistemas eléctricos, mejorar la calidad de servicio, y realizar respuestas oportunas cuando ocurran eventos imprevistos en la red, además de monitorizar el consumo de energía de los clientes.

Según Gabriel Arguello, Director Ejecutivo del Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), para alcanzar este objetivo en un horizonte de 20

años, será necesario realizar un trabajo en cooperación con diversos sectores en proyectos de eficiencia energética [5].

Redes Inteligentes Ecuador, es un programa de corto, mediano y largo plazo, cuyo punto de partida consiste en trabajar en el concepto de energías limpias, micro redes, vehículos eléctricos, aportes a la red y fortalecer la confiabilidad. El ministro de Electricidad y Energías Renovables, Esteban Albornoz, afirmó que el Ecuador es pionero en América Latina en materia de redes inteligentes [6], al haber puesto en marcha varias iniciativas. Entre las más importantes: el cambio y la diversificación de la matriz energética a través del desarrollo de las energías renovables (8 proyectos hidroeléctricos, 1 eólico, varios fotovoltaicos y de biomasa), nueva infraestructura de transmisión en 500 kilovoltios, mejora de la infraestructura eléctrica existente y modernización e incorporación de tecnología de punta para la gestión de la red de distribución [4]. Las fases de desarrollo de este programa se muestran en la tabla

2 y se espera concluya en el año 2030, cuando el Ecuador haya alcanzado la eficiencia energética [7].

De acuerdo con [6], como parte del plan piloto del programa REDIE, hoy en día se encuentran instalados más de 32 000 medidores inteligentes en distintos barrios de Guayaquil. El objetivo hasta el año 2017 es que los más de 4 millones de usuarios del Sistema Nacional Interconectado (SNI) cuenten con estos dispositivos en sus hogares. Los costos de los equipos y su instalación serán cubiertos en su totalidad por las empresas de distribución eléctrica, sin que esto afecte el costo del kilovatio-hora. Con este mecanismo se reducirán las pérdidas energéticas, que en 2007 se encontraban más allá del 22%, y actualmente se encuentran en el 13,7%. Con las redes inteligentes se espera reducir a menos del 12%, índice que se ubicará debajo del promedio internacional que corresponde al 13%. Por cada punto porcentual que se reduzcan las pérdidas, el país ahorra 20 millones de dólares [6].

2013-2017	2018-2022	2023-2030
<p><b>Generación:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Actualización de centrales eléctricas existentes.</li> <li>- Ejecución y expansión de generación (ocho hidroeléctricas y dos térmicas).</li> <li>- Estudio de potencial de pequeñas centrales hidroeléctricas y eólicas.</li> <li>- Integración de energías renovables a la red.</li> </ul> <p><b>Transmisión:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Expansión de redes de transmisión de 138 y 230kV a 500kV.</li> <li>- Recopilación de información y datos.</li> <li>- Implementación de nuevos sistemas del CENACE.</li> <li>- Protección Sistémica.</li> <li>- Subestaciones avanzadas digitales.</li> </ul> <p><b>Distribución:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Implantación de centros de control, ejecución de redes de subtransmisión y distribución.</li> <li>- Recolección de datos.</li> <li>- Infraestructura avanzada de medición (Plan piloto iniciado en Guayaquil).</li> <li>- Planeamiento óptimo de distribución.</li> </ul>	<p><b>Generación:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Generación distribuida para zonas aisladas y/o sin suministro.</li> </ul> <p><b>Transmisión:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cargabilidad estática.</li> <li>- Integración de sistemas eléctricos.</li> <li>- Interconexión con Perú a 500kV.</li> </ul> <p><b>General:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Incentivos económicos y tributarios.</li> <li>- Adopción de estándares internacionales.</li> <li>- Incentivos a plantas de energía renovables.</li> <li>- Estándares y protocolos de ciberseguridad.</li> </ul>	<p><b>Generación:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Despacho avanzado orientado a la eficiencia energética.</li> </ul> <p><b>Transmisión:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Protección adaptativa.</li> <li>- Atenciones a limitaciones de corriente.</li> </ul> <p><b>Consumidor:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Desconexión de cargas.</li> </ul> <p><b>General:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Nuevos negocios.</li> <li>- Micro-redes.</li> <li>- Almacenamiento de energía.</li> </ul>

Tabla 2. Fases de desarrollo del proyecto REDIE (Tomado de: Diario el Telégrafo, 2013) [7].





## REFERENCIAS

- [1] OBSERVATORIO INDUSTRIAL DEL SECTOR ETIC. 2001. Smart Grids y la evolución de la red eléctrica. Ministerio de Industria, Energía y Turismo. España.
- [2] Salazar, G. Pacheco, C. 2012. Las redes inteligentes. Organización Latinoamericana de Energía-OLADE. Boletín informativo.
- [3] Ibañez del Agua, Elisa. 2012. Incidencia de las smart grids en la competitividad del sector ETIC. Ministerio de Industria, Energía y Turismo. España.
- [4] <http://www.energia.gob.ec/el-ministerio-de-electricidad-presento-su-programa-redes-inteligentes-en-ecuador/>

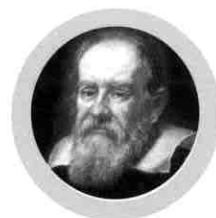
[5] [http://www.telegrafo.com.ec/index.php?option=com\\_zoo&task=item&item\\_id=30183&Itemid=11](http://www.telegrafo.com.ec/index.php?option=com_zoo&task=item&item_id=30183&Itemid=11)

[6] <http://www.telegrafo.com.ec/economia/item/nueva-infraestructura-electrica-inteligente-reducira-las-perdidas.html>

[7] <http://www.telegrafo.com.ec/images/elegrafo/Economia/2013/25-01-13-economia-info-fases-de-desarrollo-del-Redie.png>

## Información del Autor:

Danny Ochoa Correa, MSc. Profesor contratado a tiempo completo. Email: [danny.ochoac@ucuenca.edu.ec](mailto:danny.ochoac@ucuenca.edu.ec) Universidad de Cuenca-Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.



GALILEO

# Implementación de software para EWBS con GINGA en TDT para Alertas Tempranas

SONIA BARRETO BARROS, Departamento de Ciencias de la Computación, Universidad de Cuenca  
VILLIE MOROCHO ZURITA, Departamento de Ciencias de la Computación, Universidad de Cuenca

Fecha de recepción: septiembre 15, 2014  
Fecha aceptación: noviembre 20, 2014

## Resumen

En la actualidad el desarrollo de aplicaciones para TDT (Televisión Digital Terrestre) tiene su auge en países como Brasil, Argentina dentro de Sudamérica. A nivel mundial Japón se ha enfocado en el desarrollo en alertas tempranas principalmente como medio de informar a la ciudadanía. La normativa EWBS (Emergency WarningBroadcasting System) no es obligatoria en Ecuador, esta es parte del estándar ISDB-T. En este artículo se presenta ciertas bondades del uso de EWBS integrada a la plataforma de Infraestructura de Datos Espaciales del proyecto IDE RedCEDIA AT. Se detalla el diseño, implementación y pruebas realizadas de la aplicación desarrollada para alertas tempranas de TDT que podría alertar a la población de un próximo evento o del que esté ocurriendo y que aportará a la gestión de desastres a fin de prevenir pérdidas humanas y económicas.

La aplicación se encuentra desarrollada en GINGA NCL y Lua, cumpliendo las normativas de EWBS y bajo el estándar ISDB-Tb aprobado por el Ecuador. Con la aplicación se pretende demostrar las ventajas que puede ofrecer a la población el disponer de información de un evento y la necesidad de contar con equipos aptos para una transmisión y recepción de la alerta.

**Palabras Clave:** EWBS, ISDB-T, ISDB-Tb, GINGA, TDT, IDE.

## Abstract

Currently the development of applications for DTT (Digital Terrestrial Television) has its boom in countries like Brazil, Argentina in South America. Worldwide Japan has focused early warning development mainly using it as a means of informing the public.

EWBS regulations is not mandatory in Ecuador, this is part of the standard ISDB-T. In this article presents certain benefits of the use of EWBS (Emergency WarningBroadcasting System) integrated into the infrastructure of spatial data of the project IDE RedCEDIA AT platform. Detailed design, implementation and testing of the application developed for early warnings of DTT which could alert the population of an upcoming event or that is happening and that will bring to disaster management in order to prevent human and economic losses. The application is intended to demonstrate the advantages which can offer the people having information of an event and the need of having equipment suitable for transmission and reception of the alert.

**Keywords:** EWBS, ISDB-T, ISDB-Tb, GINGA, TDT, IDE.

## I. INTRODUCCIÓN

Según datos de la ITU [UIT 2014] la penetración de la televisión en el mundo para el año 2012 era de el 98% de los hogares de países desarrollados y un 72% de los países en desarrollo. Esto evidencia la magnitud de la TV como uno de los medios más usados hoy en día en la población mundial, Ecuador forma parte de ese porcentaje de los países en desarrollo, gracias a ello puede ser usado como un medio para difundir información de carácter alerta temprana. El país ha adoptado el estándar ISDB-Tb en el 2010 [CITDT 2012], este es un estándar japonés-brasileño que permite la transmisión digital, este estándar ofrece varias ventajas como: mejorar la calidad de imagen y sonido, no se ve afectado por las interferencias y tiene la posibilidad de transmitir datos. Esta norma incluye también la posibilidad de transmitir EWBS (Emergency WarningBroadcasting System) en la misma señal, Japón es el país que lo



desarrolló y lo está usando para alertar a la población de posibles desastres que con frecuencia ocurren en ese país. Ecuador al igual que Japón también se encuentra ubicado en una zona de alto riesgo de desastres como es el caso de peligros volcánicos, inundaciones y tsunamis, por lo que se debería promover la implementación de un sistema de EWBS que ayude a evitar pérdida de vidas humanas, económicas, entre otras. En este documento se analiza el estándar ISDB-T, el sistema EWBS implementado por Japón y la creación de una aplicación de alertas tempranas para el Ecuador. Busca aportar a los esfuerzos de considerar EWBS dentro del protocolo ISDB-T pero de forma obligatoria, siendo la aplicación una demostración de las ventajas de la implementación de la normativa.

## 2. ESTANDAR ISDB-T

ISDB-T es un conjunto de normas para la transmisión de televisión digital terrestre, que determinan las técnicas de comprensión, multiplexación, modulación, transmisión y recepción de video, audio y datos. Dentro de las ventajas que ofrece están: permite la transmisión de varios canales de datos por una misma banda, envío de datos, robustez ante la multitrayectoria y al ruido de señales UHF, movilidad, portabilidad, servicio One Seg y EWBS para prevención de desastres.

El estándar ISDB-T [Villacrés 2014] fue desarrollado por ARIB (Association of Radio Industries and Businesses) y adoptado por Japón en el año de 1999, utiliza codificación MPEG-2 para comprensión de video, modulación OFDM en un canal de 6MHz y un lenguaje BML (Broadcast Markup Language). Brasil adoptó el estándar en el año 2006 pero con ciertas modificaciones para acoplarse a sus requerimientos denominándolo ISDB-Tb, dentro de las modificaciones están: el middleware GINGA (software de soporte para el intercambio y gestión de aplicaciones) y la codificación MPEG-4 para la comprensión de video y audio. El estándar ISDB-Tb ha sido adoptado por varios países de América Latina, Ecuador lo adoptó en marzo del 2010.

### 3. EWBS (EMERGENCY WARNING BROADCASTING SYSTEM)

El objetivo del Sistema de Transmisión de Alerta de Emergencias es alertar a la población de un desas-

tre a ocurrir para evitar o reducir que se produzcan pérdidas humanas, daños materiales y al medio ambiente.

La implementación con EWBS permite agregar información adicional de una emergencia especial que se agrega al video y audio que esté transmitiendo la estación de canal. Cuando llega la señal, automáticamente activa el televisor o set top box para mostrar la emergencia. Una señal EWBS [GTA ISDB-T 2013] incluye un tiempo, un código de área, una señal de inicio y fin del mensaje de alerta. El código de área es muy necesario para activar la alerta solo a ciertas localidades involucradas con el evento. Los códigos de área permiten definir si la alerta va a una provincia en específico (dependiendo del acuerdo del país). Ecuador tiene posibilidad de dirigir la alerta a nivel de cantón.

#### 3.1 Sistema de alertas tempranas Japón.

Japón desde 1985 ha implementado EWBS para alertar a la población de los eventos y permitirles prepararse para las emergencias y desde el 2000 incluyó EWBS digital. El proceso del EWBS inicia cuando la estación meteorológica detecta algún desastre, este informa a la estación de canal para que transmita la alerta, el dispositivo (televisión, radio) detecta la señal y automáticamente se activa para mostrar la alerta [Shogen 2006]. El sistema ha sido usado principalmente para reportar tsunamis y terremotos. En el gráfico 1 se muestra el proceso para alertar una emergencia en Japón [Sadhu 2011].

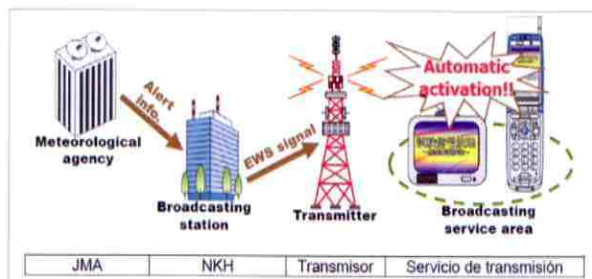


Gráfico 1: Sistemas de alertas tempranas en Tsunami y Terremotos en Japón [Ortiz 2012].

#### 3.2 Funcionamiento general del EWBS

Según el documento de Armonización para países con el estándar ISDB-T parte 3: Sistema de Alertas tempranas EWBS se establece que, la señal EWBS que es transmitida por las estaciones de canal ac-

#### Transmisión

**Señal EWBS**  
Flag de activación  
Descriptor de la Información Emerg.

**Información de la Emergencia**  
Por superposición (obligatorio)  
Por programa (recomendable)

#### Recepción

**Activar Receptor**

**Switcheo a Información de Emergencia**  
➤ Muestra en pantalla la superposición  
➤ Muestra en pantalla el programa

Controlado por el "Código de Área" y "Código País"

Gráfico 2: Funcionamiento del EWBS

tivan los receptores aptos para EWBS y muestran la emergencia. Las estaciones pueden transmitir mediante un mensaje de texto con la función sobreimpuesto (obligatorio) o mediante el programa (recomendable), para ello activan el flag de activación y si corresponde al código de área se muestra la emergencia. En el gráfico 2 se indica el funcionamiento del EWBS.

En el caso de disponer de un programa de información de la emergencia, este debe ser transmitido en el servicio que transporta la información de emergencia.

#### Reglas y lineamientos del EWBS

Dentro de las reglas que se han determinado en el documento de armonización antes mencionado [GTA ISDB-T 2013] se indica que:

- La estación de transmisión es la que envía el flag de activación, el código de área y la información de emergencia para indicar el inicio de la alerta en la PMT (Tabla de mapa de programa).
- Si este código área transmitido es igual al código de área del receptor (condicionado con la ubicación a la que corresponda) se activa el receptor con un encendido simultáneo, un sonido de un zumbador o una luz indicadora para mostrar la alerta.
- Los receptores deben monitorear continuamente la PMT para saber cuándo dejar de transmitir la emergencia como se puede ver en el gráfico 3. Un receptor apto para EWBS debe recibir una señal aun estando apagado (modo Stand-by).

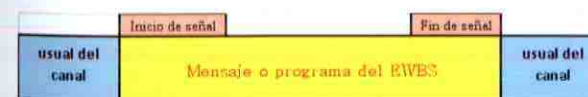


Gráfico 3: Inicio y fin de mensaje o programa del EWBS

Los receptores son capaces de monitorear sólo una estación de radiodifusión a la vez, por lo tanto la estación de monitoreo debe determinarse a responsabilidad de los usuarios.

La asignación del Código de área en el Ecuador para el EWBS se encuentra distribuida por cantones, los mismos que pueden ser preasignados por el fabricante y modificados por el usuario. En la tabla 1 se indica una parte de los códigos de área.

Código de Área	PROVINCIA	CANTON
0000 00011001	AZUAY	CAMILO PONCE ENRIQUEZ
0000 00101001		CHORDELEG
0000 00101111		CUENCA
0000 00111001		EL PAN
0000 01000100		GIRON
0000 01001000		GUACHAPALA
0000 01001001		GUALACEO
0000 01110111		NABON
0000 01111110		OÑA
0000 10001110		PAUTE
0000 10011011		PUCARA
0000 10110010		SAN FERNANDO
0000 11000000		SANTA ISABEL
0000 11001000		SEVILLA DE ORO
0000 11001011		SIGSIG

Tabla 1: Extracto de la tabla de asignación de código de área del Ecuador

## 4. APLICACIÓN DE ALERTAS TEMPRANAS (EWBS) PARA TDT.

Antes de modelar y diseñar una aplicación para EWBS en TDT se debe tener en cuenta que en el mercado nacional y probablemente internacional, no existe un STB que permita interpretar un EWBS y una aplicación de alerta (desarrollada en GINGA) a la vez, por lo que para las pruebas se plantea usar dos STB, uno que interprete el EWBS dependiendo del código de área y el otro que muestre la aplicación desarrollada en GINGA.

A continuación se presenta el modelado y diseño de solución de la aplicación de alertas tempranas en televisión digital. Entre los eventos considerados dentro del proyecto IDE RedCEDIA AT, del que for-



ma parte esta aplicación se va a alertar en: peligro volcánico, inundaciones por desbordamiento de ríos y eventos costeros (tsunamis, agujajes, marea roja).



Gráfico 4: Diseño solución general del EWBS

El esquema presentado describe los pasos que debe seguir para alertar a la población con el uso de un EWBS. En el proyecto IDE RedCEDIA AT, se establecieron dos módulos de captura de información: uno a través de las alertas de una aplicación móvil en línea, y un segundo analizando el Facebook y Twitter por medio de inteligencia artificial[Morocho 2014]. El centro de información corresponde a la Plataforma IDE, se encarga de procesar los distintos eventos reportados por la ciudadanía a través de la aplicación móvil, Facebook y Twitter para contribuir con información a las distintas entidades encargadas de generar una alerta. En la plataforma aparte de visualizar los mapas donde existe vulnerabilidad por los distintos eventos suscitados, también visualiza los mapas de zonas de evacuación almacenados por el servidor de mapas.

La aplicación EWBS desarrollada en GINGA NCL y Lua muestra el mensaje de alerta del evento o desastre. Tiene la opción de brindar ayuda al televi-

dente mostrando un mapa de zonas de evacuación descargado desde la plataforma IDE y las indicaciones o instrucciones a seguir ante tal evento.

El sistema de transmisión se compone de un conjunto de equipos que permiten la generación del transform stream (TS) y la difusión de la señal, al tener una alerta este sistema agrega al video y audio de la programación usual la señal EWBS. Esta señal contiene la configuración del PMT y la aplicación EWBS.

En la recepción de la señal de emergencia los decodificadores aptos para EWBS van a entender la señal incluso estando apagados (modo stand-by) y encenderán al televisor o emitirán un pitido en señal de existencia de la alerta. La aplicación se va a visualizar en el televisor e informará a la población del evento a ocurrir junto con el mapa de zonas de evacuación y las indicaciones o instrucciones a seguir, lo cual será descargado desde la plataforma IDE con el uso del canal de retorno. En el gráfico 5 se presenta el esquema de funcionamiento del EWBS.

### 5. PRUEBAS DE LA APLICACIÓN EWBS

Las primeras pruebas de la aplicación de EWBS fueron realizadas sobre un simulador del set top box para revisar el funcionamiento de la aplicación y eliminar errores de programación, se usó una má-

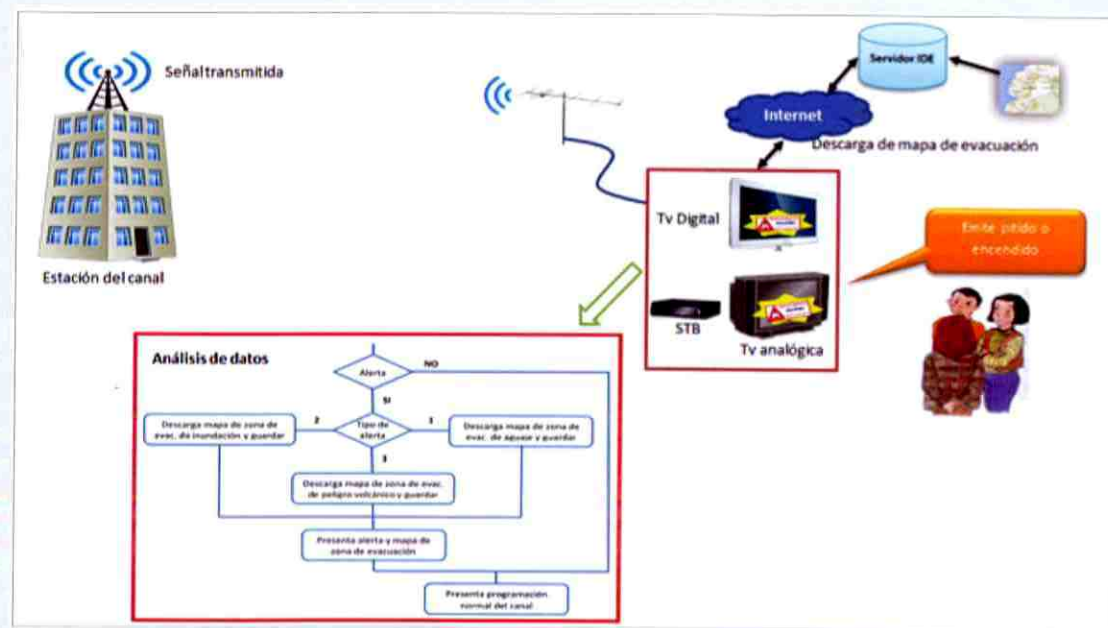


Gráfico 5: Esquema de funcionamiento del EWBS

quina virtualVMware y el Ginga-NCL Development Set-top Box - fedora-fc7-ginga-i386.vmx.

Una vez comprobado la aplicación se procedió a realizar las pruebas con equipos del Laboratorio de Televisión Digital de la ESPE y el apoyo de sus investigadores debido a la experiencia y sus conocimientos en televisión digital.

La prueba consiste de una serie de pasos que se detalla a continuación:

1. Definir el tipo de emergencia a informar; este puede ser peligro volcánico, inundaciones o eventos costeros. Agregar los datos en la aplicación EWBS como: el tipo de emergencia, nombre del mapa de zona de evacuación o la imagen ya descargada desde la Plataforma IDE y las instrucciones o indicaciones para evacuar.

2. Disponer del generador de contenidos, el cual contiene el video, audio y datos (información de emergencia) en un transform stream (TS). El generador de contenidos que se usó en el Laboratorio es el VillageFlow como se muestra en el gráfico 6.

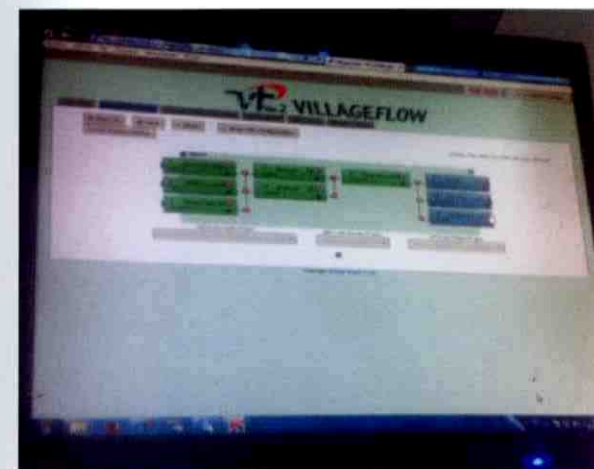


Gráfico 6: Sistema de VillageFlow

3. Transmisión de la programación de un canal de prueba junto con la aplicación de EWBS.

4. Recepción de la señal. En la recepción se hizo uso de dos STB, uno de marca Pixela apto para EWBS, es decir, percibe la existencia de la señal de emergencia y compara el código de área, si es igual, emite un pitido y emite el mensaje de alerta como se indica en el gráfico 7.

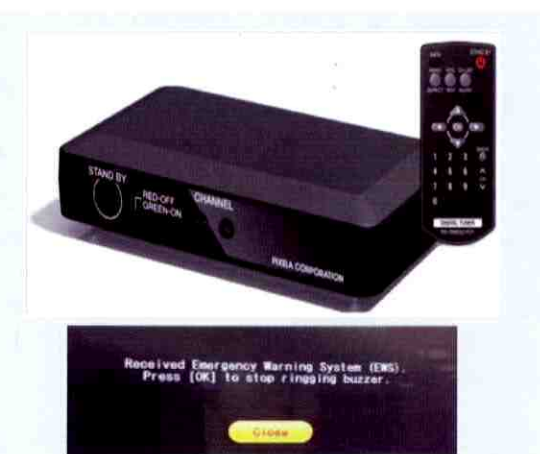


Gráfico 7: STB de marca PIXELA y mensaje de alerta que muestra

El STB de marca EITV interpreta la aplicación desarrollada en GINGA y visualiza en el televisor como se indica en el gráfico 8.



Gráfico 8: STB de marca EITV y aplicación EWBS (desarrollada en GINGA)

Por medio del uso de los botones del control remoto se puede acceder a las opciones programadas en la aplicación de AYUDA y SALIR. Si selecciona ayuda se muestra el mapa de zonas de evacuación, las instrucciones o indicaciones para evacuar y la programación normal del canal. En el gráfico 9 se indica la interfaz de ayuda.



Gráfico 9: Interfaz de ayuda de la aplicación EWBS (desarrollada en GINGA)



6. RESULTADOS

Luego de las pruebas realizadas se obtuvieron los siguientes resultados:

- Al transmitir la alarma de emergencia el STB apto para EWBS (Pixela) activa la emergencia aun estando apagado (modo Stand-by). Ofrece la ventaja de recibir la alerta a cualquier hora del día mediante un pitido de alarma, encendido automático y visualización del contenido en el televisor.
- Si la señal es receptada con el STB EITV se muestra la aplicación EWBS. Le brinda al televidente la opción de saber que desastre está ocurriendo, cuales son las zonas de evacuación y las instrucciones o indicaciones a seguir.
- El uso del canal de retorno con la conectividad directa a la plataforma de Infraestructura de Datos Espaciales del proyecto IDE RedCEDIA AT, queda demostrado al conseguir interactuar con dicha aplicación y extraer la información que se presenta al televidente.

7. CONCLUSIONES

Realizadas las pruebas de la aplicación EWBS se puede concluir que su implementación ha sido exitosa debido a que la alerta llega al televidente e informa del desastre que está por ocurrir o está ocurriendo.

Aunque la aplicación fue probada con equipos reales pero no de alta potencia de transmisión, se puede determinar que con algunos modificaciones en la configuración este funcionará de igual manera con equipos de mejores características.

Si bien en el Ecuador no toda la población puede disponer del servicio de Internet para la descarga del mapa de zona de evacuación, existe la posibilidad de agregar el mapa en la aplicación para que se visualice en cualquier televisor. Para mantener a la población informada de cualquier desastre a ocurrir es indispensable disponer de un receptor apto para EWBS, bajo el estándar ISDB-Tb aprobado por el Ecuador, este receptor indicará el mensaje de alerta solo si corresponde al mismo código de área. Por lo tanto, es indispensable que se promueva que la normativa EWBS forme parte "obligatoria" del estándar ISDB-Tb en Ecuador. Promoción que debe ser realizada por los entes oficiales como podría ser la Secretaría de Gestión de Riesgos.

AGRADECIMIENTOS

Es necesario hacer extensivo el especial agradecimiento, al grupo de trabajo de la ESPE de Televisión Digital, liderado por el Ing. Gonzalo Olmedo, PhD.

REFERENCIAS

Nagaosa T., Moriya S., 2008. An Emergency Earthquake Warning System for Land Mobile Vehicles Using the Earthquake Early Warning, Department of Network and Multimedia Engineering, Kanto Gakuin University, Japón.

GTA ISDB-T. Grupo de Trabajo de Armonización del Foro Internacional ISDB-T. 2013. ISDB-T Documento de Armonización, Parte 3: Sistemas de Alerta de Emergencias EWBS. Foro Internacional ISDB-T.

Villacrés D. 2014. Implementación de un Sistema Piloto de Transmisión de ALERTA DE Emergencia sobre la Televisión Digital Terrestre en el Ecuador. Escuela Politécnica del Ejército.

Sadhu S. 2011. Emergency Warning Broadcasting Systems. ITU-AIBD-ABU Regional Workshop, Hanoi

Shogen K. 2009. Handbook on EWBS (Emergency Warning Broadcasting Systems). Asia-Pacific Broadcasting Union.

Shogen K. 2006. Implementation of Emergency Warning Broadcasting System in the Asia Pacific Region. NHK Science and Technical Research Laboratories, Japan.

UIT. La televisión digital ya representa el 55% a medida que avanza el apagón de la radiodifusión analógica en todo el mundo. [http://www.itu.int/net/pressoffice/press\\_releases/2013/62-es.aspx#.VDh5t\\_22LtQ](http://www.itu.int/net/pressoffice/press_releases/2013/62-es.aspx#.VDh5t_22LtQ) Consultado Oct 2014.

Ortiz Castillo, C. 2012. Transmisión de TV Analógica y Digital HD. XVII Congreso Internacional de Ingeniería y XI Arqui foro "Visión 2012". Lima. [http://www.usmp.edu.pe/vision2012\\_lima/ SEMINARIOS/seminarios/Sistemas\\_de\\_TV\\_Digital\\_en\\_el\\_Peru.pdf](http://www.usmp.edu.pe/vision2012_lima/ SEMINARIOS/seminarios/Sistemas_de_TV_Digital_en_el_Peru.pdf) Revisado Oct 2014

CITDT. 2012. INFORME CITDT-GAE-2011-001. MINTEL. <http://www.telecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/10/Informe-CITDT-GAE-2011-001.pdf>, Revisado Oct 2014.

Morocho V. 2014. Mejorando la Usabilidad en las Plataformas de Infraestructura de Datos Espaciales. Revista Digital Congreso de Ciencia y Tecnología. Mayo, Vol9. Pp.106-110. ISSN: 1390-4663.

Este trabajo fue auspiciado por el Consorcio Ecuatoriano para el Desarrollo de Internet Avanzado, bajo el CEPRA VII Información de los Autores: Sonia Barreto Barros, [sonia.barretob@ucuenca.edu.ec](mailto:sonia.barretob@ucuenca.edu.ec), Universidad de Cuenca. Villie Morocho Zurita, [villie.morocho@ucuenca.edu.ec](mailto:villie.morocho@ucuenca.edu.ec), Universidad de Cuenca.

La Revista Galileo faculta el uso del material aquí presentado para uso académico y con fines de investigación científica, siempre y cuando se cite como fuente del artículo referenciado.

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

Director Ing. Esteban Pacheco, Msc

La estructura organizacional del DIC se enmarca en el Modelo de Gestión del Conocimiento propuesto para la Universidad de Cuenca. Tiene a su cargo la coordinación y organización del desarrollo de la investigación en el campo del conocimiento de las ciencias tecnológicas y ciencias de la tierra del ámbito de la Ingeniería Civil, cuyo propósito gira en torno a las siguientes responsabilidades académicas:

- Facilitar el desarrollo individual y colectivo de los profesores adscritos al Departamento.
- Fortalecer el Modelo Educativo de pre-grado en la Carrera de Ingeniería Civil.
- Dar soporte al desarrollo y ejecución de Posgrado.
- Impulsar la investigación
- Promover la vinculación con la colectividad potenciando el accionar científico y tecnológico de los Centros, Grupos de investigación y Laboratorios.

GRUPOS DE INVESTIGACIÓN DEL DIC

Fomenta la creación de grupos y la promoción de proyectos en líneas de investigación activas.

Grupo Disciplinar	Líneas de Investigación activas y en desarrollo
Estructuras & Construcciones	Análisis y Diseño de Estructuras Tecnología de Materiales Tecnologías de la Construcción
Vialidad & Transporte	Análisis de Transporte Seguridad vial Transporte multimodal
Geo-información	Análisis espacial Estadística espacial Sensores remotos LIDAR
Ingeniería del Agua & Saneamiento Ambiental	Hidráulica fluvial Procesos y Estructuras hidráulicas Redes y embalses Calidad de Agua y Vulnerabilidad Procesos de remediación y Tratamiento de agua residual

LABORATORIOS DEL DIC

Los Laboratorios del Departamento de Ingeniería Civil son Unidades Académicas que ejecutan actividades en los temas disciplinarios donde se enmarcan las líneas de investigación activas y en desarrollo:

- Laboratorio de Ingeniería Sanitaria
- Laboratorio de Hidráulica y Dinámica de Fluidos LH&DF
- Laboratorio de Geotecnia y Materiales
- Laboratorio de Geomántica



**UNIVERSIDAD DE CUENCA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA**  
**Y TELECOMUNICACIONES**

**Director: Ing. Lizandro Solano, PhD**

**GRUPO DE ENERGÍA Y SISTEMAS ELÉCTRICOS**

**Líneas de Investigación:**

- Monitoreo, protección, operación, control y simulación de sistemas eléctricos de potencia
- Energías renovables y generación distribuida
- Redes inteligentes y micro-redes
- Eficiencia energética
- Control, monitoreo y protección de máquinas eléctrica

**GRUPO DE PROCESAMIENTO DE SEÑALES Y COMUNICACIONES**

**Líneas de Investigación:**

- Procesamiento Digital de Señales
- Comunicaciones
- Computación de Alto Rendimiento

**GRUPO DE ELECTRÓNICA Y CONTROL**

**Líneas de Investigación:**

- Bioingeniería
- Dispositivos Electrónicos
- Sistemas de Control

**UNIVERSIDAD DE CUENCA**  
**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN**  
**Director. Ing. Mauricio Espinoza, PhD**

**Grupo de Gestión del Conocimiento**

Este grupo tiene a su cargo las siguientes disciplinas y líneas de investigación:

- Disciplina: Web Semántica y Linked Data  
Líneas de investigación y desarrollo
  - Integración de información
  - Representación del conocimiento
  - Manejo de grandes volúmenes de información
- Disciplina: TV Digital  
Líneas de investigación y desarrollo
  - Tratamiento de audio y video
  - Reconocimiento de patrones
- Disciplina: Sistemas de Información Inteligentes  
Líneas de investigación y desarrollo
  - Data Mining para toma de decisiones
  - Análisis de contenido

**Grupo de Ingeniería del Software**

- Disciplina: Tecnologías para el Aprendizaje y la enseñanza  
Líneas de investigación y desarrollo
  - Desarrollo de Material Educativo Digital (Objetos de aprendizaje y Recursos Educativos Abiertos)
  - Learning Analytics
  - Diseño e implementación de MOOCS
  - Desarrollo de contenidos educativos para TV Digital y móviles
- Disciplina: Geomática  
Líneas de investigación y desarrollo  
Incluye los avances en Infraestructura de Datos Espaciales, integración de información geoespacial, análisis de información espacial, enriquecimiento semántico de información espacial.
- Disciplina: Modelación de Sistemas y Requerimientos  
Líneas de investigación y desarrollo
  - Incluye Modelización Conceptual.

# Determinación de la altura de afloramiento en el talud de un canal no revestido: estudio analítico de la ecuación de Dupuit

DAVID DURÁN R., Carrera de Ingeniería Civil

Fecha de recepción: septiembre 15, 2014  
Fecha aceptación: noviembre 20, 2014



## Resumen

Como un aporte para la aplicación de metodologías que permitan la identificación de pérdidas de flujo en canales abiertos no revestidos, se indica el desarrollo analítico de los conceptos establecidos para el flujo en medios porosos para proporcionar una expresión que permita la determinación de las condiciones de frontera a las que deberá estar sujeto el flujo, a través de los taludes de un canal a flujo libre. Se obtiene la expresión para definir la altura de afloramiento y se concluye que la configuración del afloramiento en el talud está sujeta exclusivamente a la longitud disponible para circulación de agua y a la geometría del talud. El presente trabajo ha podido ser desarrollado sobre la base de los conceptos teóricos impartidos en el curso de Diseño Hidráulico de la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca, y ha sido promovido con el fin de disponer de una guía procedimental y de consulta útil que apoye los procesos académicos.

**Palabras Clave:** Filtración en canales, Dupuit, Altura de afloramiento

## Abstract

As a contribution to the implementation of methodologies to identify the loss of flow in not covered channels, this paper shows the analytical development of concepts for flow in porous media to provide an expression which determines the boundary conditions that must be subject the flow through the slopes of a free-flow channel. An expression to define the output level of water has been obtained and it concludes that the process through the slope is subject exclusively to the length available for the water flow and the slope geometry. This work has been developed on the basis of the

theoretical concepts taught in the course of Hydraulic Design which is taught at the Career of Civil Engineering, Faculty of Engineering of the University of Cuenca and it has been promoted in order to make available procedural guidance and consultation useful to support the academic processes.

**Keywords:** Filtration through channels, Dupuit, Height of outcrop

## I. INTRODUCCIÓN

La filtración a través de canales es un fenómeno de interés para la Ingeniería Civil, ya que un canal no revestido o con un revestimiento defectuoso, puede presentar problemas de filtración que producirían pérdidas excesivas, ocasionando los siguientes efectos:

- Disminución no deseada del caudal en el canal.
- Destrucción de los terraplenes debido a la presencia de la línea de infiltración que atraviesa los taludes y ocasiona el afloramiento de agua y el lavado del material fino.
- Salinización del suelo.
- Focos de enfermedades en zonas tropicales.
- Incremento de los requerimientos de drenaje.

Frente a estos potenciales problemas para el diseño, se debe conocer la altura de afloramiento ( $h$ ) y el caudal ( $Q$ ), producido por las pérdidas para diversos escenarios de filtración. A continuación, se presenta el estudio de las condiciones de flujo a través de un terraplén, mediante la conceptualización teórica y el desarrollo analítico de las ecuaciones que gobiernan los procesos de flujo bidimensional en un medio poroso.



## 2. DESARROLLO ANALITICO DE LA ECUACION DE DUPUIT PARA FILTRACION

El estudio se realiza para un terraplén con la configuración geométrica de la Figura 1, en la cual se indica las variables de interés y las relaciones geométricas de importancia para el análisis.

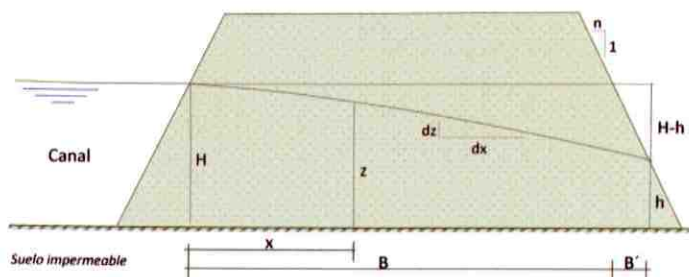


Figura 1: Esquema de la filtración longitudinal a través de un terraplén.

Se recalca que las alturas de flujo H, z, h, que definen la línea superior de infiltración en el terraplén, son alturas medidas a partir de un estrato impermeable hipotético. Con la notación indicada en la Figura 1, se puede establecer las siguientes relaciones:

$$B' = n(H-h) \quad (1)$$

Según la ley de Darcy (1853) [1], la velocidad de descarga (u) es directamente proporcional al gradiente hidráulico j y al parámetro que representa la conductividad hidráulica k. La relación se representa mediante la siguiente ecuación:

$$u = kj \quad (2)$$

El gradiente hidráulico (j), que es la pérdida de carga de agua por unidad de longitud, se expresa como:

$$j = -\frac{dz}{dx} \quad (3)$$

Reemplazando (3) en (2) se tiene:

$$u = k \left(-\frac{dz}{dx}\right) \quad (4)$$

El flujo por metro lineal que se tendría a través de la masa de suelo sería:

$$Q = uA = uz \quad (5)$$

Al reemplazar (4) en (5):

$$Q = -kz \frac{dz}{dx} \quad (6)$$

Al integrar desde el punto donde comienza la filtración ( $x=0, z=H$ ), hasta donde esta aflora a la superficie, ( $x=B+B', z=h$ ), se obtiene la ecuación de Dupuit, como sigue:

$$\int_0^{B+B'} Q dx = \int_H^h -kz dz$$

$$Q(B+B') = -\frac{k}{2} (h^2 - H^2)$$

$$Q = \frac{k}{2} \times \frac{H^2 - h^2}{B+B'}$$

$$Q = \frac{k}{2} \times \frac{H^2 - h^2}{B+n(H-h)} \quad (7)$$

## 3. DESARROLLO DE LA EXPRESION ANALITICA PARA LA ALTURA DE AFLORAMIENTO EN UN TALUD

Dado que se requiere conocer la altura de afloramiento, cuando el caudal del flujo de infiltración por metro lineal sea máximo [2], y según los criterios para valores extremos, se deberá cumplir que:

$$\frac{dQ}{dh} = 0$$

$$\frac{d^2Q}{dh^2} < 0$$

por lo cual:

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{k}{2} \frac{(-2h(B+n(H-h))+n(H^2-h^2))}{(B+n(H-h))^2} = 0$$

$$-2h(B+n(H-h))+n(H^2-h^2) = 0$$

$$h2n+h(-2B-2Hn)+H^2n=0$$

Resolviendo la ecuación de segundo orden:

$$h = \frac{2B+2Hn \pm \sqrt{(-2B-2Hn)^2 - 4H^2n^2}}{2n}$$

y simplificando:

$$h = \frac{B}{n} + H \pm \sqrt{\frac{(-2B-2Hn)^2 - 4H^2n^2}{4n^2}}$$

$$h = \frac{B}{n} + H \pm \sqrt{\left(\frac{B}{n} + H\right)^2 - H^2}$$

Aplicando el criterio de la segunda derivada se tiene:

$$\frac{d^2Q}{dh^2} = \frac{k}{2} \frac{((B+n(H-h))^2 \times (2hn-2B-2Hn) - (h^2n+h(-2B-2Hn)+H^2n) \times 2(-n))}{(B+n(H-h))^4}$$

Simplificando:

$$\frac{d^2Q}{dh^2} = \frac{k}{2} \frac{((B+n(H-h)) \times (2hn-2B-2Hn) - (h^2n+h(-2B-2Hn)+H^2n) \times 2(-n))}{(B+n(H-h))^3}$$

Al ser  $H > h$ , se establece que  $(B+n(H-h))^3 > 0$

Para el análisis del numerador se establece que:

$$b = \frac{B}{n} + (H-h)$$

$$c = \frac{B}{n} + H$$

$$a = \sqrt{c^2 - H^2}$$

Multiplicando el numerador por  $\frac{n^2}{n^2}$ :

$$2n^2 \left[ \left(\frac{B}{n} + (H-h)\right) \left(-\frac{B}{n} - (H-h)\right) + \left(h^2 + h\left(-2\frac{B}{n} - 2H\right) + H^2\right) \right]$$

$$2n^2(-b^2 + (h^2 - 2ch + H^2))$$

$$h = c \pm a$$

$$2n^2(-b^2 + ((c \pm a)^2 - 2c(c \pm a) + H^2))$$

$$2n^2(-b^2 + (c^2 \pm 2ac + a^2 - 2c^2 \mp 2ac + H^2))$$

$$2n^2(-b^2 + (a^2 - c^2 + H^2))$$

$$2n^2(-b^2 + (c^2 - H^2 - c^2 + H^2))$$

$$2n^2(-b^2) < 0$$

Por lo que las dos soluciones son máximos relativos, y por lo tanto la solución verdadera será la que cumpla la relación:  $H > h$

$$a) \quad h = \frac{B}{n} + H + \sqrt{\left(\frac{B}{n} + H\right)^2 - H^2}$$

$$H > \frac{B}{n} + H + \sqrt{\left(\frac{B}{n} + H\right)^2 - H^2}$$

$$-\frac{B}{n} > \sqrt{\left(\frac{B}{n} + H\right)^2 - H^2} \quad \text{Falso}$$

$$b) \quad h = \frac{B}{n} + H - \sqrt{\left(\frac{B}{n} + H\right)^2 - H^2}$$

$$H > \frac{B}{n} + H - \sqrt{\left(\frac{B}{n} + H\right)^2 - H^2}$$

$$-\frac{B}{n} > -\sqrt{\left(\frac{B}{n} + H\right)^2 - H^2}$$

$$\frac{B}{n} < \sqrt{\left(\frac{B}{n} + H\right)^2 - H^2}$$

$$\left(\frac{B}{n}\right)^2 < \left(\frac{B}{n}\right)^2 + 2\frac{BH}{n} + H^2 - H^2$$

$$2\frac{BH}{n} > 0 \quad \text{Verdadero}$$

Se concluye, por lo tanto, que la altura de afloramiento h para un caudal máximo es:

Determinación de la altura de afloramiento en el talud de un canal no revestido

$$h = H + \frac{B}{n} - \sqrt{\left(H + \frac{B}{n}\right)^2 - H^2} \quad (8)$$

Con los datos H, B y n se obtiene entonces el valor de h (altura de afloramiento) en la ecuación (8), y al reemplazar el resultado en la ecuación (7) se calculará el caudal Q de flujo a través del terraplén de estudio.

## 4. CONCLUSIONES

Se ha realizado un análisis para el flujo de agua, a través de un medio poroso partiendo de los fundamentos del proceso de flujo que establecen la ecuación de Dupuit, con el fin de obtener una expresión para la altura de afloramiento en el talud de un terraplén en términos de la presencia de un estrato impermeable inferior horizontal.

La expresión obtenida para la altura de afloramiento, evidencia que la misma es función de la longitud horizontal de filtración disponible, y es independiente de la permeabilidad del suelo.

Se recomienda el empleo del procedimiento de cálculo, que se deduce del análisis realizado para poder establecer, de manera más adecuada, los efectos a los que estará sujeto el terraplén en un canal debido a las condiciones de flujo planteadas.

## AGRADECIMIENTOS:

Ing. Guillermo Martínez L. Grupo de Matemáticas de la Facultad de Ingeniería.

Ing. Esteban Alonso Pacheco Tobar, Msc. Director del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca.

El presente trabajo se realizó en el contexto de la cátedra de Hidráulica II de la Carrera de Ingeniería Civil y con el soporte del Laboratorio de Hidráulica & Dinámica de Fluidos LH&DF del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca.

## REFERENCIAS

[1] DARCY, H. (1856). Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Dalmont, Paris, pp.674

[2] SCHOKLITSCH A. (1968) Handbook of Hydraulics Structures. Editores Gustavo Gili S.A. Barcelona, España.

[3] DUPUIT, J. (1863) Etudes Théoriques et Pratiques sur le mouvement des Eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables (Second Edition ed.). Paris: Dunod.

[4] BOWER, H. (1969) Theory of seepage from open channels. Advances in hydroscience, n°5 Academic press.

[5] CUSTODIO, E., LLAMAS, M. R. (2001) Hidrología subterránea. Omega, S.A. Plató, 26-Barcelona-6



# Aplicación del concepto de fuerza tractiva para el diseño de canales no revestidos

MARIA FERNANDA ESPINOSA C., Carrera de Ingeniería Civil  
 MANUEL CAMPOVERDE O., Carrera de Ingeniería Civil

Fecha de recepción: septiembre 15, 2014  
 Fecha aceptación: noviembre 20, 2014

## Resumen

Como un aporte para entender los métodos, que actualmente están disponibles para el diseño de canales erosionables, y como parte del contenido general establecido en el curso de Diseño Hidráulico que se imparte en la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca, en el presente artículo se expone la revisión bibliográfica y un análisis del contexto teórico, que rige los procesos de flujo para el diseño de canales, mediante el concepto de fuerza tractiva. En la exposición conceptual de los procesos considerados, se ha incluido una aplicación práctica con la ejemplificación del procedimiento de diseño para un canal, realizado con el propósito de disponer de una guía de referencia para la aplicación del método y de consideraciones adicionales de relevancia.

**Palabras Clave:** Canales erosionables, Fuerza tractiva

## Abstract

This article presents, in a simple way, a literature review and the analysis of the theoretical framework that governs the flow processes for establishing design criteria through the concept of tractive force. The work has been done in order to contribute to the understanding of the currently available methods for the design of erodible channels, and as part of the theoretical concepts in the course of Hydraulic Design which is taught at the Career of Civil Engineering, Faculty of Engineering of the University of Cuenca. In addition to the concepts of processes, has been included a case study with the exemplification of a design procedure for a channel in order to provide a reference guide for the application of the method and additional considerations of relevance.

**Keywords:** Erodible channel, Tractive force

## I. INTRODUCCION

Para el diseño de canales a flujo libre, se dispone principalmente de métodos basados en los conceptos de:

- Velocidad límite
- Fuerza tractiva límite
- Caudal límite

Los estudios realizados hasta el momento han generado información respecto al proceso de iniciación del movimiento de partículas, además, permiten identificar de alguna manera los valores límites sobre los cuales se da inicio al proceso de arrastre (erosión en un canal). Si bien el método de la velocidad límite, es un procedimiento simple que es ampliamente utilizado, se debe indicar que no es del todo posible establecer las condiciones de erosión en un canal, mediante la sola identificación de una velocidad crítica. Esto debido, sobre todo, a que los valores de velocidades permisibles [1], [2] que se indica en la literatura convencional, no se relacionan con la concentración de material coloidal presente en el flujo ni con la profundidad de flujo, lo cual influye en los procesos de equilibrio de transporte de sedimentos [3]. Esto hace necesario, considerar un método que incorpore otros criterios y factores para garantizar la estabilidad de canales ante los procesos de erosión.

La fuerza tractiva representa el empuje del agua en el área mojada del canal, ya sea en el fondo o en las paredes. En un flujo uniforme, la fuerza tractiva en apariencia es igual al componente efectivo de la fuerza gravitacional que actúa sobre el cuerpo de agua. Si se conceptualizara el movimiento de un volumen de agua en un tramo de sección transversal constante, se observaría un movimiento uniforme, en el cual el rozamiento ocasionado por el desplazamiento de la masa de agua debería estar en equilibrio con la componente del peso de líquido

en la dirección del flujo. Si  $\kappa$  representa el esfuerzo cortante en el perímetro mojado en  $\text{kg/m}^2$ ,  $R$  el radio hidráulico en m,  $A$  la sección mojada en  $\text{m}^2$ ,  $\chi$  el perímetro mojado en m,  $\gamma$  el peso específico del agua en  $\text{kg/m}^3$ ,  $W$  el peso del volumen de agua en una longitud  $L$ , y  $S$ , la pendiente del canal (sen  $\alpha$ ), entonces y de acuerdo a la Figura 1, se tendría:

$$W \text{ sen } \alpha = \gamma A L S = P L \kappa$$

Se establece, entonces que:  
 $\kappa = \gamma S A / P = \gamma J R$

y de manera semejante, pero de sentido contrario, actúa la fuerza de arrastre  $\tau$

$$\tau = \gamma S R$$

Para una sección de profundidad uniforme  $y$ , en un canal ancho (anchura  $> 30 y$ ), se puede utilizar con suficiente aproximación para el cálculo de la fuerza tractiva la siguiente expresión:

$$\tau = \gamma S y$$

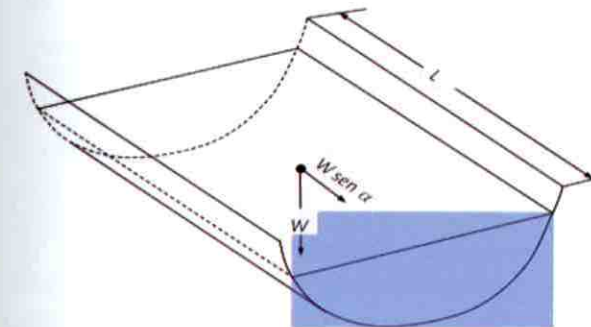


Figura 1. Esquema de un volumen de flujo para estudio de la fuerza tractiva

El método de diseño de un canal, mediante el concepto de fuerza tractiva, considera los valores de fuerza tractiva permisible para no causar efectos erosivos en el material constituyente. El U.S. Bureau of Reclamation ha realizado estudios que permiten la determinación de la fuerza tractiva permisible, tomando en cuenta el diámetro de la partícula (materiales no cohesivos), recomendándose para materiales gruesos un valor igual a 0,4 veces el diámetro de la partícula para la fuerza tractiva permisible ( $\text{lb/pie}^2$ ). Para efectos de diseño, se debe tomar en cuenta la relación de fuerza tractiva que considera la relación entre las fuerzas tractiva unitarias críticas en el talud ( $\tau S \text{ máx}$ ), y en el fondo del canal ( $\tau L \text{ máx}$ ) en términos del ángulo de reposo del material  $\theta$  y el ángulo del talud del canal  $\phi$  de acuerdo a la siguiente expresión:

$$K = \frac{\tau S}{\tau L} = \cos \phi \sqrt{1 - \frac{\tan^2 \phi}{\tan^2 \theta}}$$

## 2. DISEÑO DE UN CANAL A FLUJO LIBRE MEDIANTE EL CONCEPTO DE FUERZA TRACTIVA

Ejemplo: Se requiere diseñar un canal abierto por el método de la fuerza tractiva que transporte un caudal de  $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$ . La pendiente del canal será de  $2\%$ , y será construido en un suelo aluvial medianamente grueso con la granulometría que se indica en la Figura 2.

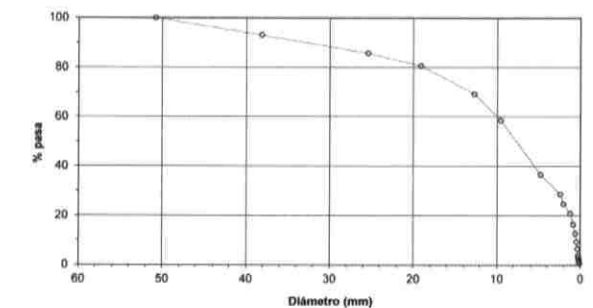


Figura 2. Granulometría del material de fondo

Como primer paso, se determina el diámetro representativo del material, para lo cual y en consideración de que el mismo corresponde a una granulometría medianamente gruesa, se ha optado por tomar como valor representativo el diámetro que deja pasar el 75%:

$$D_{75} = 16 \text{ mm } (0,63 \text{ pulgadas})$$

Se define adicionalmente un valor adecuado para el coeficiente de rugosidad de Manning:

$$n = 0,024$$

Se establecen las relaciones geométricas necesarias para el diseño:

Inclinación del talud ( $H/V$ ),  $z = 2$  (ver [1])

Relación entre el ancho y calado del canal  $b/y = 2$  (valor inicial)

Para un tamaño  $D_{75} = 0,63$  pulgadas, de acuerdo al gráfico que relaciona la fuerza tractiva unitarias permisible en el fondo ( $\tau L \text{ máx}$ ) (U.S. Bureau of Reclamation), en función del diámetro representativo, resulta:

$$\tau L \text{ máx} = 0,4 \times 0,63 = 0,252 \text{ (lb/pie}^2\text{)}$$

Para el cálculo de la relación de fuerza tractiva  $K$ , se



requiere definir el ángulo de reposo  $\theta$  (pendiente máxima de una porción de terreno granular sin que se produzca un deslizamiento) y el ángulo de las paredes del canal con respecto a la horizontal. Para ello, y de acuerdo al gráfico establecido para diámetros representativos de material (U.S. Bureau of Reclamation) [1], [2], que permite obtener valores del ángulo de reposo para materiales con diámetros representativos ( $D_{75}$ ) superiores a 0,2 pulgadas, para la granulometría dada se tiene:

$$\theta = 29,5^\circ$$

Así también, se obtiene el ángulo del talud de las paredes del canal (respecto a la horizontal):

$$\varphi = 26,56^\circ$$

Se obtiene para la relación de fuerza tractiva K:

$$K = 0,41$$

Con base a los estudios que establecen el patrón de distribución de la fuerza tractiva por efectos de la geometría del canal [1], [2], se determina el valor de la fuerza tractiva unitaria máxima ( $\tau_s \text{ máx}$ ), para las paredes del canal (valor crítico). Considerando inicialmente al canal como un canal ancho, para el valor de  $z$  y para la relación  $b/y$  establecidas resulta:

$$\tau_s \text{ máx} = 0,75 \gamma \quad S y = 0,094 \text{ y (lb/pie}^2)$$

Con los valores para fuerza tractiva crítica en el fondo y en las paredes, y para la relación de fuerza tractiva calculada, se establece el calado y el ancho en el fondo para el canal:

$$y = 1,1 \text{ pies} = 0,34 \text{ m} \\ b = 2,2 \text{ pies} = 0,68 \text{ m}$$

Como último paso, se comprueba el caudal, con el fin de conseguir un valor semejante al caudal requerido para el diseño. Para esto, de acuerdo con la ecuación de Manning, se obtiene un caudal de  $Q=0,43 \text{ m}^3/\text{s}$ , considerado muy inferior al de diseño, por lo cual se requiere realizar una modificación del dimensionamiento del canal. Se puede demostrar que para una relación de  $b/y = 5,03$ , manteniendo  $z=2$ , se obtiene el calado  $y=0,33 \text{ m}$ ,  $b=1,69 \text{ m}$  y  $Q=0,7 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### 3. DISCUSION Y CONCLUSIONES

El método de la velocidad máxima no es suficiente para el diseño exhaustivo en canales, ya que no

considera los efectos en velocidad en función de las alturas de flujo.

El método de la fuerza tractiva se utiliza para definir las condiciones de estabilidad de la superficie de canales a flujo libre. Se debe optar por este método en contraposición con el de la velocidad límite por las razones expuestas y, adicionalmente, porque en el método de la velocidad límite no se dispone de los efectos adicionales, como por ejemplo: la granulometría y la compacidad (porosidad)

De acuerdo a la revisión de literatura realizada, solamente para canales en los cuales la relación ancho/calado es mayor que 30, se puede usar la relación para la fuerza de arrastre en términos de la profundidad de flujo, en lugar del radio hidráulico.

En el estudio de caso realizado, se ha incorporado la información adicional de la granulometría del material. La literatura convencional no dispone de criterios suficientes, aún, para una adecuada identificación del diámetro representativo del material, por lo que queda a criterio y experticia del diseñador; la correcta definición de este parámetro.

Se recomienda incorporar información de la distribución de tamaños de partículas del material en el que será construido el canal, puesto que se debe tener especial atención al momento de seleccionar el diámetro representativo del material, dada la notable influencia de dicho parámetro en la definición de fuerza tractiva permisible

### AGRADECIMIENTOS

Ing. Esteban Alonso Pacheco Tobar; Msc. Director del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca.

El presente trabajo se realizó en el contexto de la cátedra de Hidráulica II de la Carrera de Ingeniería Civil y con el soporte del Laboratorio de Hidráulica & Dinámica de Fluidos LH&DF del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca.

### REFERENCIAS

[1] CHOW, Ven Te. (1994) Open Channel Hydraulics. New York: McGraw Hill Book Company. 1994, 680 p.

[2] FRENCH, Richard H. (2007) Hidráulica de canales abiertos. México, McGraw Hill Book Company, 2005. 624 p.

[3] PACHECO, Esteban. (2004) Equilibrio del proceso de transporte de sedimentos en cárcavas y torrentes intervenidos en la cuenca hidrográfica del río Paute. Trabajo investigativo para obtención del grado de Magister en manejo y conservación de los recursos Agua y Suelo MSc. Universidad de Cuenca, Cuenca

## Descripción del aforador trapezoidal Standard S359.1 para medición de flujo subcrítico

PEDRO JOSÉ CASTRO SERRANO, Carrera de Ingeniería Civil  
EDUARDO JOSÉ MORENO CARVALLO, Carrera de Ingeniería Civil  
JUAN JOSÉ VINTIMILLA SÁNCHEZ, Carrera de Ingeniería Civil

Fecha de recepción: septiembre 15, 2014  
Fecha aceptación: noviembre 20, 2014

### Resumen

Como un aporte para la difusión de técnicas y metodologías de medición de flujo en sistemas hidráulicos, en el presente documento se describe el procedimiento para medición de caudal, mediante el aforador trapezoidal Standard S359.1, desarrollado por ASAE (American Society of Agricultural Engineers). Se parte de relaciones básicas que están establecidas en la literatura técnica para caracterizar el estado de flujo en una sección de medición, se describe el diseño del aforador trapezoidal y se hace un análisis de las relaciones establecidas, a fin de presentar las ecuaciones calibradas para efectos de medición de flujo.

**Palabras Clave:** Aforador trapezoidal S 359.1, Medición de caudal, Canales abiertos.

### Abstract

As a contribution to the dissemination of techniques and methodologies for measuring flow in hydraulic systems, this paper presents the method of flow measurement by Standard S359.1 trapezoidal flume

developed by ASAE (American Society of Agricultural Engineers). It starts with basic relationships that are established in the literature to characterize the flow in a measuring section, we describe the design of trapezoidal flume and an analysis of the relationships established in order to present the equations calibrated for the purpose of flow measurement.

**Keywords:** Trapezoidal flume S 359.1, Flow measurement, Open channels

### I. INTRODUCCION

De manera general, la determinación directa de parámetros de flujo, mediante la medición de caudal, es necesaria para el estudio de procesos hidrológicos y de procesos de flujo de superficie libre en canales naturales y artificiales. Para aplicaciones como la medición de caudales en conducciones, en la distribución de caudales en sistemas de riego y en la evaluación de eficiencias de transporte en canales abiertos, se emplean estaciones de aforo de sección y forma particular, a través de las cuales se puede definir una relación estable entre la altura de flujo y el caudal circulante. Generalmente, el aforador implementado tiene una sección convergente a la entrada, que dirige el flujo hacia una parte estrecha conocida como garganta. Aguas abajo, pasando la garganta, está una sección divergente que retorna el flujo al canal. La garganta actúa como un controlador y permite definir una relación única, entre el nivel de agua y el caudal [1], [2].

En la actualidad se dispone de técnicas desarrolladas para la medición de flujo, mediante aforadores de diversos tipos y que consideran los posibles regímenes de flujo que se presentan al momento de la medición. Normalmente, se debe considerar los dos posibles estados de flujo que son: i) flujo libre y ii) flujo sumergido. La diferencia básica entre los dos estados señalados está supeditada a la ocurrencia del estado de flujo crítico en la vecindad de la sección de medición (sección de constricción de flujo). Cuando se presenta esta condición, el caudal  $Q_f$  dependerá únicamente de la altura de

flujo aguas arriba de la sección crítica  $h_w$ . De esta manera, para la determinación del caudal de flujo libre, se tiene:

$$Q_f = f(h_w)$$



Por otro lado, cuando las condiciones de flujo son tales, que la velocidad en la sección inmediata, aguas abajo, de la zona de medición es menor que la velocidad correspondiente al estado crítico, la restricción operará en condiciones sumergidas. En tal condición, sucede que un incremento en el calado de flujo de aguas abajo  $h_d$ , provocará un incremento en el calado de aguas arriba  $h_u$ , por lo cual se requerirá la medición de calado tanto aguas arriba como aguas abajo. Para efectos de introducir el concepto de sumergencia, se establece la relación siguiente:

$$S = \frac{h_d}{h_u}$$

y el caudal en condiciones de flujo sumergido  $Q_s$ , pasa a ser función de la pérdida de cabeza ( $h_u - h_d$ ) y del grado de sumergencia  $S$ :

$$Q_s = f(h_u - h_d, S)$$

Se dispone en la actualidad de varios procedimientos estandarizados que se identifican como de fácil aplicación. Uno de tales procedimientos corresponde al medidor de flujo trapezoidal Standard S359.1, desarrollado por la ASAE (American Society of Agricultural Engineers). De acuerdo con los estudios elaborados por Robinson y Chamberlain [3], [4], el comportamiento y el desempeño hidráulico del aforador trapezoidal Standard S359.1, está definido según las siguientes características y condiciones:

1. Las condiciones de entrada afectan en grado mínimo la relación altura-caudal.
2. El material depositado en la entrada es mínimo y no modifica la relación altura-caudal de un modo significativo.
3. Se puede medir un amplio rango de caudales con pequeñas variaciones de altura de flujo.
4. La configuración trapezoidal del aforador permite una mejor adaptación a la forma natural de los canales de tierra.
5. La configuración geométrica general del aforador es relativamente simple y permite una fácil construcción.
6. Teniendo en cuenta que una variación pequeña de la altura origina una modificación relativamente grande del caudal, la sensibilidad del aforador es mayor que para los aforadores rectangulares [5].

## 2. DESCRIPCIÓN DEL AFORADOR TRAPEZOIDAL STANDARD S359.1

El aforador trapezoidal Standard S359.1 tiene una zona de aproximación que permite la entrada de flujo en condiciones adecuadas. A continuación, se desarrolla la sección convergente, que lleva el flujo hacia la zona de contracción (garganta). Luego se presenta una zona divergente, y la sección de salida como se indica en la Figura 1. Es importante señalar que, tanto la zona de aproximación como la garganta poseen taludes de igual inclinación, y que el fondo del aforador es horizontal en todo su desarrollo.



Figura 1. Configuración geométrica general del aforador Standard S359.1 Fuente: American Society of Agricultural Engineers, 1982-1983

La ASAE ha publicado información referida a la configuración, al dimensionamiento, así como aspectos de calibración para varios aforadores trapezoidales estandarizados. En la siguiente tabla se indica dimensiones para 4 tipos de aforadores. Los aforadores 1 y 2 son diseñados para canales revestidos de concreto. Los aforadores 3 y 4 son recomendados para uso en canales, sin revestimiento. El aforador 4 tiene la sección de la garganta en forma triangular; y es utilizado para la medición de flujos pequeños [1], [2].

No.	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	Z	H	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	L <sub>5</sub>	a <sub>1</sub> *	a <sub>2</sub> *
1	1.00	0.40	1.00	1.33	1.25	1.42	1.00	1.42	0.50	0.146	0.063
2	2.00	1.00	1.25	3.00	2.00	3.00	2.50	2.00	1.00	0.50	0.50
3	1.33	0.67	0.58	2.31	1.50	2.31	1.67	1.33	0.50	0.25	0.25
4	0.167	0.00	0.58	0.56	0.56	0.58	0.58	0.58	0.25	0.125	-

\* Distancia a la sección de medición para  $h_u$  [1]

Tabla 1. Dimensiones del Aforador Trapezoidal Calibrado (dimensiones en pies) Fuente: American Society of Agricultural Engineers, 1982-1983.

## 2.1 Ecuaciones para aforadores calibrados

En la Tabla 2, se indica las ecuaciones calibradas para los aforadores Standard S359.1 para  $Q$  en pies<sup>3</sup>/s, y  $h_u$  (altura de flujo medida aguas arriba) en pies.

Aforador No.	Ecuación	Rango de $h_u$ [pies]	Rango de Caudal [pies <sup>3</sup> /s]
1	$Q = 3,23h_u^{2,5} + 0,63h_u^{1,5} + 0,05$	0,20 - 1,20	0,05 - 5,96
2	$Q = 4,27h_u^{2,5} + 1,67h_u^{1,5} + 0,19$	0,30 - 2,70	0,54 - 58,8
3	$Q = 1,46h_u^{2,5} + 2,22h_u^{1,5}$	0,20 - 2,20	0,24 - 17,4
4	$Q = 1,55h_u^{2,58}$	0,15 - 0,50	0,012 - 0,26

Tabla 2. Ecuaciones para el Aforador Trapezoidal Calibrado Fuente: American Society of Agricultural Engineers, 1982-1983

Para el caso de flujo sumergido, el caudal debe ser afectado mediante la siguiente expresión:

$$Q_s = K_s f Q_f$$

donde:

$Q_f$  = caudal de flujo libre

$Q_s$  = caudal corregido por sumergencia

$K_s f$  = factor de corrección

La siguiente tabla muestra factores de corrección de caudal, para flujo sumergido, en los aforadores 1, 2 y 3.

Relación de sumergencia S	Factor de corrección, K <sub>s</sub> f	
	Aforador 1 y 2	Aforador 3
0.70	0.993	1.000
0.75	0.984	1.000
0.80	0.970	0.996
0.85	0.945	0.988
0.90	0.902	0.972
0.92	0.875	0.964
0.94	0.838	0.953
0.95	0.815	0.946

Tabla 3. Factores de corrección para flujo sumergido en el aforador calibrado Fuente: American Society of Agricultural Engineers, 1982-1983

## 3. ANÁLISIS TEÓRICO DE LAS RELACIONES DE CALADO-CAUDAL

Mediante la aplicación de los principios de la ecuación de la energía [6] se ha procedido para el desarrollo de la Tabla 4, en la cual se expone como estudio de caso, el cálculo teórico de las relaciones calado-caudal para el Aforador Trapezoidal Standard No. 2. Para el cálculo se ha procedido de la siguiente manera:

– Se ha determinado el calado crítico para diferentes caudales (0,005 m<sup>3</sup>/s a 3,5 m<sup>3</sup>/s)

– Se ha establecido la energía específica en la sección crítica.

– A partir del valor de la energía específica en la sección crítica, se ha calculado el calado en la entrada del aforador ( $h_u$ ) correspondiente a cada caudal.

En la Tabla 4, se indica el caudal calculado mediante la ecuación calibrada del aforador y el error en la estimación de caudal. En la Figura 2, se presenta el análisis comparativo de las relaciones establecidas.

Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Calado crítico (m)	Energía en sección crítica (m)	Calado en la entrada (m)	Caudal calculado (m <sup>3</sup> /s)	Error (%)
0.005	0.031	0.046	0.045	0.009	58.6
0.010	0.045	0.065	0.062	0.012	17.6
0.020	0.070	0.099	0.095	0.020	-2.7
0.030	0.088	0.123	0.117	0.028	-8.1
0.040	0.105	0.145	0.138	0.037	-10.1
0.050	0.118	0.163	0.155	0.045	-10.2
0.100	0.175	0.236	0.223	0.091	-9.7
0.200	0.252	0.336	0.316	0.187	-6.4
0.300	0.311	0.410	0.384	0.287	-4.5
0.400	0.358	0.471	0.440	0.389	-2.6
0.500	0.400	0.523	0.487	0.491	-1.9
1.000	0.557	0.721	0.666	1.010	1.0
1.500	0.672	0.866	0.796	1.537	2.4
2.000	0.766	0.984	0.901	2.061	3.0
2.500	0.848	1.086	0.991	2.590	3.6
3.000	0.920	1.176	1.071	3.116	3.9
3.500	0.985	1.258	1.144	3.648	4.2

Tabla 4. Cálculo de la relación teórica Caudal-Calado para el aforador estándar No. 2, y comparación con el caudal establecido por la ecuación calibrada.

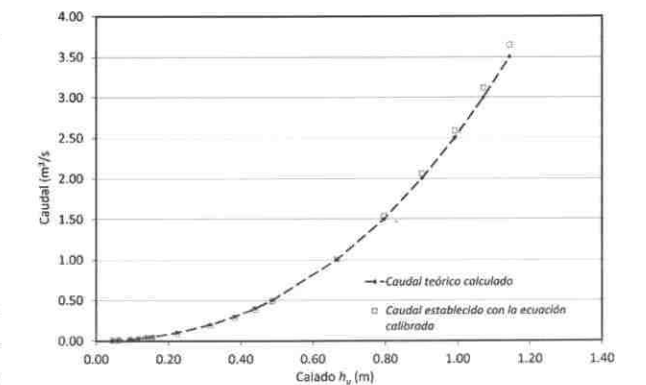


Figura 2. Comparación de las relaciones de caudal-calado para la ecuación calibrada del aforador estándar No. 2 y para la relación teórica obtenida.



#### 4. DISCUSION Y CONCLUSIONES

Se dispone en la actualidad de varios procedimientos estandarizados que se identifican como de fácil aplicación para medición de flujo, uno de ellos corresponde al aforador Standard de flujo subcrítico S359.1

Se ha expuesto las ecuaciones calibradas establecidas para efectos de medición de flujo libre, en canales naturales y artificiales.

Se ha realizado el análisis de las ecuaciones establecidas en la literatura técnica, mediante la comparación de la relación de caudal-calado obtenida con la aplicación del principio de la energía para el aforador estándar No. 2

Se ha determinado la relación teórica de caudal-calado para el rango de caudales de 0,005 m<sup>3</sup>/s a 3,5 m<sup>3</sup>/s, estableciéndose, para caudales altos, que el error por exceso mediante la aplicación del principio de la energía en comparación con la ecuación calibrada va desde 1,9% a 10,2%; mientras que, el error por defecto va desde 1% a 4,2%. Para los caudales bajos, en el rango de 0,005 m<sup>3</sup>/s a 0,01 m<sup>3</sup>/s, los errores por defecto calculados son de 58% y 17%, respectivamente.

Se ha comprobado mediante el análisis realizado, que el rango de aplicabilidad de la ecuación de la energía para el aforador No. 2 estudiado es de 0,015 m<sup>3</sup>/s a 1,50 m<sup>3</sup>/s.

El aforador trapezoidal Standard S359.1 puede ser empleado de manera eficaz para la medición de flujo en aplicaciones de la Ingeniería Civil.

#### AGRADECIMIENTOS

Ing. Esteban Alonso Pacheco Tobar, Msc. Director del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca.

El presente trabajo se realizó en el contexto de la cátedra de Hidráulica II de la Carrera de Ingeniería Civil y con el soporte del Laboratorio de Hidráulica & Dinámica de Fluidos LH&DF del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca. Ingeniería

#### REFERENCIAS

- [1] JAMES, Larry G. (1988) Principles of farm irrigation system design. New York: John Wiley & Sons, Inc.,
- [2] WALKER, Wynn R., SKOGERBOE, Gaylord V. (1987) Surface irrigation. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.,
- [3] ROBINSON, A. R., (1959) Report on trapezoidal measuring flumes for determining discharge in steep ephemeral streams: Colorado Agricultural and Mechanical College, Rocky Mountain Experimental Station, CER59AAR1.13 p.
- [4] CHAMBERLIN, A. R., (1957) Preliminary model tests of a flume for measuring discharge of steep ephemeral streams: Colorado Agricultural and Mechanical College, Rocky Mountain Forest and Range Experimental Station, CER57ARC12,28 p.
- [5] ISRAELSEN, Orson W., HANSEN, Vaughn E. (1985) Irrigation Principles and Practices (3th Edition). New York, U.S.A.: John Wiley & Sons, Inc., 1985.
- [6] CHOW, Ven Te. (1994) Hidráulica de Canales abiertos. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill. Interamericana S.A.

## Aforador Trapezoidal de Flujo Supercrítico

BYRON PARRA S., Carrera de Ingeniería Civil  
CRISTIAN PINOS R., Carrera de Ingeniería Civil  
DANIEL RODRÍGUEZ P., Carrera de Ingeniería Civil

Fecha de recepción: septiembre 15, 2014  
Fecha aceptación: noviembre 20, 2014

#### Resumen

El presente estudio expone la aplicación del principio de energía para el desarrollo de un procedimiento de diseño de una estructura de medición de sección trapezoidal, que se desempeña en régimen de flujo supercrítico. Se parte de los conceptos básicos que permiten el establecimiento de la energía total en una sección cualquiera de flujo, los cuales aplicados a la configuración de estructuras de aforo preconcebidas proponen un diseño específico para un aforador de 1 metro de ancho en la sección de medición, así como la proyección de la curva de descarga teórica para el rango de caudales de 0,050 a 30,0 m<sup>3</sup>/s. El presente trabajo se constituye en un aporte para el entendimiento de los procedimientos de diseño de estructuras de aforo en general, y ha sido desarrollado como una aplicación de Hidráulica de Flujo Libre para la asignatura de Hidráulica II, que forma parte de la Oferta Académica de la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca.

**Palabras Clave:** Aforador Trapezoidal, Flujo Supercrítico, Canales Abiertos

#### Abstract

This study focuses on the application of principle of energy for the development of a design procedure of a measurement structure of trapezoidal section which works on a supercritical flow regime. It starts with basic concepts that allow the establishment of the total energy in any section of flow, which by being applied to the configuration of preconceived measurement structures, suggest a specific design for a 1m wide flume in the measurement section and the projection of the theoretical discharge curve for the range of flow rates from 0,050 to 30,0 m<sup>3</sup>/s. This work constitutes a contribution to

a better understanding of design procedures of flumes and it has been developed as an application of learning achievements of the course in Free Surface Hydraulics, which is taught at the Career of Civil Engineering, Faculty of Engineering of the University of Cuenca.

**Keywords:** Trapezoidal flume, Supercritical flow, Open channel

#### 1. INTRODUCCIÓN

En la literatura técnica se dispone de varios tipos de estructuras de aforo, entre ellas, tienen especial interés, las estructuras que trabajan a régimen de flujo supercrítico, ya que las mismas poseen la característica particular de evitar que se deposite sedimento, gracias a las altas velocidades que se generan. Las estructuras de aforo de flujo supercrítico, con paredes verticales, presentan relaciones de descarga que no son sensibles a los flujos bajos.

Una mayor sensibilidad a caudales bajos se consigue a través de estructuras de paredes inclinadas, en todas las secciones transversales. Un aforador de sección trapezoidal estandarizado corresponde al planteado por la Geological Survey [1], en el cual las paredes laterales tienen una pendiente de 30°, con respecto a la horizontal. Este aforador presenta una sección de estrechamiento para conseguir la profundidad crítica, y contempla una pendiente longitudinal suficiente que garantiza la ocurrencia de flujo supercrítico. El diseño estándar contempla, entre otras, las siguientes recomendaciones: i) para evitar la generación de ondas, la longitud de la estructura no deberá superar 2 a 3 veces el calado previsto, ii) se debe evitar inclinaciones, menores a 30°, y iii) el fondo del tramo de la estructura hacia la sección de flujo crítico, debe tener una pendiente de entre 3 y 5%.



En la literatura técnica, se destaca el diseño para un aforador trapezoidal de flujo supercrítico que fuera desarrollado por Chamberlin (1957) [2] y Robinson (1959) [3], el cual presenta en la zona de aproximación un piso nivelado. La zona de convergencia y la garganta tienen pisos con una pendiente del 5%, lo que garantiza que se produzca el flujo supercrítico en la garganta. En la Figura 1, se indica la configuración geométrica básica que presenta este diseño.

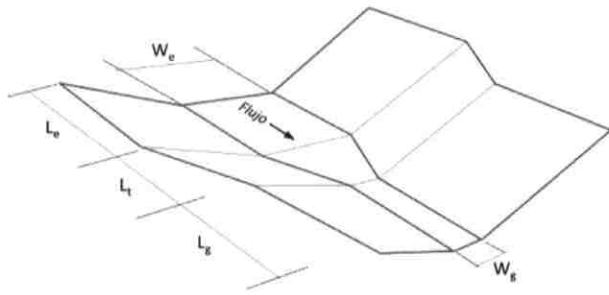


Figura 1. Configuración geométrica del aforador trapezoidal de flujo supercrítico

Este tipo de aforador es de gran utilización en cauces naturales de cuencas hidrográficas donde la gran cantidad de sedimentos producidos que pudieran depositarse en la estructura, son desalojados debido a las altas velocidades generadas en la garganta. Un ejemplo de este tipo de aforador es el que se encuentra en la quebrada de Turupamba de la cuenca del río Burgay (ver Figura 2) y que fuera construido en el contexto del proyecto "VLIR Own Initiatives-Towards integrated catchment management in tropical mountain areas: the problem of sediment management, Paute catchment, Ecuador", ejecutado mediante convenio entre la Universidad de Cuenca y el Consejo Interuniversitario Flamenco de Bélgica VLIR.



Figura 2. Aforador trapezoidal de flujo supercrítico ubicado en la Q. Turupamba del río Burgay (al momento de su construcción)

## 2. PROCEDIMIENTO DE CALCULO PARA DISEÑO DEL AFORADOR TRAPEZOIDAL

Las condiciones de descarga de flujo supercrítico para el canal trapezoidal de estudio, pueden ser establecidas mediante la aplicación de la ecuación de la energía a lo largo de la estructura. Si se considera la energía que existe en la sección de profundidad crítica, al principio de la garganta del aforador; en relación a la energía total existente en la sección de medición, y de acuerdo a la nomenclatura indicada en la Figura 3, se obtiene:

$$\frac{V_c^3}{2g} + d_c + z_c = \frac{V_m^3}{2g} + d_m + z_m + h_e \quad (1)$$

expresión en la cual:

$V_c, V_m$ : son las velocidades del flujo en la sección crítica y sección de medición respectivamente

$g$ : es la aceleración de la gravedad

$d$ : es la profundidad de flujo

$z$ : es la altura de posición del piso del canal respecto al nivel de referencia

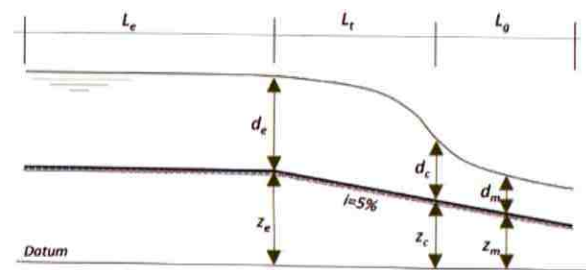


Figura 3. Sección longitudinal de la estructura de aforo (nótese el cambio de pendiente en el fondo del aforador a partir del inicio de la transición)

Para el propósito, y dado que el tramo en consideración es corto, se puede suponer que las pérdidas por fricción ( $h_e$ ) son despreciables. Además, considerando las secciones transversales de flujo en la sección crítica  $A_c$  y en la sección de medición  $A_m$  se tiene:

$$Q = A_c V_c = A_m V_m \quad (2)$$

$$\Delta z = z_c - z_m \quad (3)$$

$$\frac{Q^2}{2g A_c^3} + d_c + \Delta z = \frac{Q^2}{2g A_m^3} + d_m \quad (4)$$

El factor de sección para el cálculo del flujo crítico  $Z$ , para un ancho superficial de la

sección transversal crítica  $T_c$ , está determinado por la siguiente relación [4], [5]:

$$Z = A_c \sqrt{\frac{A_c}{T_c}} \quad (5)$$

Quedando la descarga  $Q$ , en términos del factor según la siguiente expresión:

$$Q = Z \sqrt{g} \quad (6)$$

## 3. RESULTADOS

Se plantea a continuación el procedimiento de cálculo para un aforador trapezoidal de 1 m de ancho de garganta con un ángulo de inclinación de las paredes de 30° y de las dimensiones que se indican en el Cuadro 1.

Wg (m)	We (m)	Le (m)	Lt (m)	Lg (m)
1.00	2.75	5.00	2.30	3.10

Cuadro 1. Dimensiones del aforador de estudio

Para la determinación de la curva de descarga teórica para el aforador estudiado, se ha procedido como se indica a continuación:

– Se establece  $Q$  y  $A_c$  partiendo de los valores de profundidad crítica ( $d_c$ ).

– Dado que  $d_m$ , está relacionado con  $A_m$ , se resuelve la ecuación (4) para obtener la profundidad de la sección transversal en la zona de medición, para un caudal  $Q$  de análisis (ver Cuadro 2).

Caudal (m³/s)	Calado crítico (m)	Área (m²)	Ancho superficial (m)	Energía en la sección crítica (m)	Calado en la garganta (m)
0.05	0.061	0.068	1.208	0.167	0.029
0.10	0.095	0.111	1.324	0.215	0.052
0.20	0.147	0.183	1.498	0.285	0.089
0.40	0.222	0.306	1.756	0.387	0.148
0.60	0.281	0.416	1.957	0.465	0.196
0.80	0.331	0.518	2.127	0.531	0.238
1.00	0.375	0.615	2.277	0.588	0.276
2.00	0.546	1.052	2.856	0.808	0.424
4.00	0.780	1.813	3.651	1.106	0.633
6.00	0.953	2.497	4.241	1.325	0.791
8.00	1.096	3.137	4.725	1.505	0.922
10.00	1.219	3.744	5.144	1.660	1.036
12.00	1.328	4.328	5.516	1.798	1.137
15.00	1.474	5.168	6.012	1.981	1.272
20.00	1.683	6.498	6.722	2.244	1.466
25.00	1.863	7.762	7.334	2.470	1.634
30.00	2.023	8.977	7.877	2.670	1.785

Cuadro 2. Relaciones de calado-caudal en las secciones crítica y de medición

A continuación (Figura 4), se indica la curva de descarga teórica obtenida para el aforador trapezoidal de estudio:

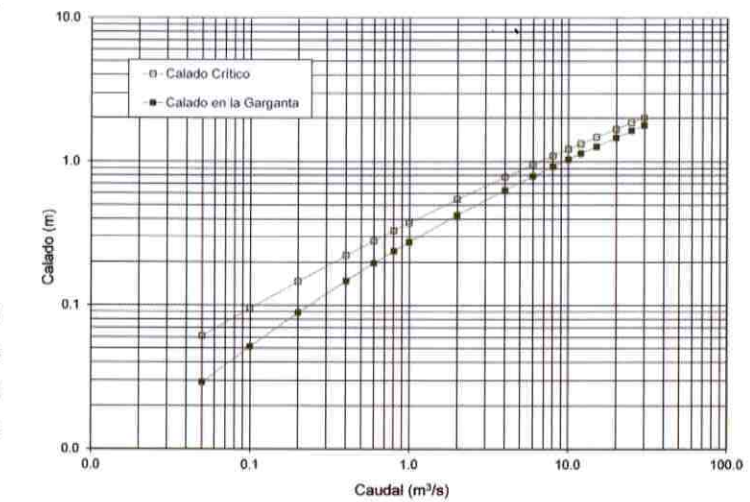


Figura 4. Curva de descarga para la sección crítica y para la sección de medición

## 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se ha desarrollado el procedimiento de cálculo, basado en el principio de energía, para establecer la curva de descarga teórica de un aforador trapezoidal de flujo supercrítico de 1.0m de ancho en la garganta, y 30° de inclinación de las paredes.

El estudio se ha ejecutado para un rango de caudales de 0.05 a 30.0 m³/s y presenta calados en la sección de medición de 0.029 a 1.78 metros, respectivamente.

De acuerdo a la revisión de literatura, se establece que un aforador de geometría trapezoidal y de régimen supercrítico se considera idóneo para la medición de flujo en cauces de montaña, puesto que su configuración permite un fácil acoplamiento a la morfología natural y, además, garantiza la evacuación de sedimentos mediante la generación de altas velocidades [6]. Para garantizar el buen desempeño del aforador, en consideración de las hipótesis establecidas en el análisis teórico expuesto, la obra debe ser cuidadosamente emplazada y alineada en el cauce natural, con el fin de evitar la generación de flujo transversal.



En el mismo sentido, se recomienda que las paredes del aforador deban propiciar una transición lo suficientemente suave entre el cauce y la sección de entrada. Así mismo, se deberá evitar contracciones mayores al 40%, en la sección del cauce natural.

El procedimiento expuesto es replicable para cualquier otra configuración geométrica de un aforador trapezoidal de flujo supercrítico.

Finalmente, se indica que la curva de descarga obtenida mediante el procedimiento indicado, corresponde a una curva teórica y es de rigor que se proceda con la calibración correspondiente mediante el aforo in situ con medidores de flujo.

### AGRADECIMIENTOS

Ing. Esteban Alonso Pacheco Tobar, Msc. Director del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca.

El presente trabajo se realizó en el contexto de la cátedra de Hidráulica II de la Carrera de Ingeniería Civil y con el soporte del Laboratorio de Hidráulica & Dinámica de Fluidos LH&DF del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca.

### REFERENCIAS

- [1] KILPATRICK, F.A., SCHNEIDER, V.R., (1983) Use of flumes in measuring discharge: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 3, chap. A14, 46 p.
- [2] CHAMBERLIN, A. R., (1957) Preliminary model tests of a flume for measuring discharge of steep ephemeral streams: Colorado Agricultural and Mechanical College, Rocky Mountain Forest and Range Experimental Station. CER57ARC.12, 28 p.
- [3] ROBINSON, A. R., (1959) Report on trapezoidal measuring flumes for determining discharge in steep ephemeral streams: Colorado Agricultural and Mechanical College, Rocky Mountain Experimental Station, CER59AAR.1, 13 p.
- [4] CHOW, Ven Te. (2002) Open Channel Hydraulics. New York: McGraw Hill Book Company. 1994, 680 p.
- [5] FRENCH, Richard H. (2007) Hidráulica de canales abiertos. México, McGraw Hill Book Company, 1988, 624 p.
- [6] BOS, M., REPLOGLE, J., CLEMMENS, A. (1986.) Aforadores de caudal para canales abiertos. [Wageningen, The Netherlands]. Disponible en Web: <<http://content.alterra.wur.nl/Internet/webdocs/ilri-publicaties/publicaties/Pub38/pub38-h1.0.pdf>>

# Ensayos para la obtención de mapas de precipitación y temperatura de la cuenca del Paute a partir de datos de estaciones meteorológicas y técnicas de interpolación espacial y geoestadística

*Solís Gancio, Edisson David*  
*Cecilia*

NAZARETH PUGA, Estudiante: Universidad de Cuenca – Facultad de Ingeniería.  
JOHN JIMÉNEZ, Estudiante: Universidad de Cuenca – Facultad de Ingeniería.  
DAVID SOLÍS, Estudiante: Universidad de Cuenca – Facultad de Ingeniería.  
EDUARDO CABRERA, Estudiante: Universidad de Cuenca – Facultad de Ingeniería.  
JORGE DURÁN, Estudiante: Universidad de Cuenca – Facultad de Ingeniería.  
TOMÁS SALAMEA, Estudiante: Universidad de Cuenca – Facultad de Ingeniería.  
ANDRÉS ZALAMEA, Estudiante: Universidad de Cuenca – Facultad de Ingeniería.

Fecha de recepción: septiembre 15, 2014  
Fecha aceptación: noviembre 20, 2014

### Resumen

La cuenca del río Paute alberga el complejo hidroeléctrico más importante de Ecuador. Más del 60% de la producción eléctrica del Ecuador es generada en esta cuenca. Por lo tanto, conocer la distribución espacial de aspectos meteorológicos como la precipitación y la temperatura resulta fundamental para evaluar el comportamiento hidrológico-hidráulico de la cuenca.

Este artículo ha sido el resultado del trabajo final de dos grupos de estudiantes de la asignatura de Geomática, en el que mediante técnicas de interpolación espacial (vecino más próximo, distancia ponderada, splines) y geoestadística (ordinary kriging) se han generado diferentes mapas ráster de precipitación y temperatura a partir de los datos registrados en las estaciones meteorológicas distribuidas por la cuenca del Paute. Comparando dichos mapas con los datos de las propias estaciones meteorológicas y del satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), se concluye que los mapas de precipitación y temperatura con mayor tasa de éxito son los obtenidos mediante el método de interpolación "distancia ponderada".

**Palabras Clave:** Precipitación, temperatura, cuenca Paute, interpolación espacial, geoestadística, distancia ponderada, mapas, ráster, Sistema de Información Geográfica.

### Abstract

Paute river basin is home of the largest hydroelectric complex in Ecuador. Over 60% of electricity production in Ecuador is generated in the Daniel Palacios power plant. Therefore, knowing the spatial distribution of meteorological aspects such as rainfall and temperature is essential to assess the hydrologic-hydraulic behavior of the basin.

This article is the result of the final work of two groups of students of the Geomatics subject, in which they have used spatial interpolation techniques (nearest neighbor, distance weighting, splines) and geostatistics (kriging) to generate different rainfall and temperature raster maps from the data recorded at weather stations distributed all over the basin. Comparing these maps with the gauges registered data and with the satellite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) data, concludes that the rainfall and temperature maps with higher success rate are obtained by the "distance weighting" interpolation method.

**Keywords:** Rainfall, temperature, Paute basin, spatial interpolation, geostatistics, distance weighting, maps, raster, Geographic Information System.

## I. INTRODUCCIÓN

Este artículo es el resultado del trabajo final de dos grupos de estudiantes de la asignatura de Geomática en el que simplemente hacemos un ensayo o



ejercicio de aplicación de técnicas de interpolación determinísticas y estocásticas de variables climáticas (precipitación y temperatura). Asumimos que el artículo cuenta con algunas limitaciones metodológicas producto de nuestra falta de experiencia y el corto periodo de tiempo en el que se realizó.

La cuenca hidrográfica del río Paute se encuentra en la región austral de Ecuador; en las provincias del Azuay (74,8%), Cañar (13,3%), Chimborazo (11,6%) y Morona Santiago (0,3%) (UMACPA, 1995), específicamente entre las Cordilleras Oriental (límite este) y Occidental de los Andes (límite oeste), y entre los Nudos de Curiquinque (límite norte) y de Portete (límite sur). Latitudinalmente se localiza entre los paralelos 2° 15' y 3° 15' de latitud sur y longitudinalmente se ubica entre los meridianos 78° 30' y 79° 20' de latitud oeste.

El clima es templado, con temperaturas que van de los 4°C en las zonas altas (4.000 msnm), hasta los 16°C en los valles (2.000 msnm). Salvo en las partes muy altas (más de 4.000 m) no hay riesgo de que se presenten temperaturas inferiores a 0°C (UMACPA, 1995). Sin embargo, sí se registra una pequeña variación de la temperatura durante el año así como una pequeña variación en la longitud del día, siendo la temperatura un poco más baja de junio a agosto que de diciembre a febrero. La precipitación media anual en Paute es de 986 mm, aunque algunas estaciones meteorológicas (Copal a 940 msnm, Arenales a 2.280 msnm, Guarumales a 1.600 msnm, Peñas Coloradas a 2.120 msnm) registran precipitaciones medias de más de 3.000 mm/año. Estos datos ponen de manifiesto que la distribución de la precipitación no obedece únicamente al factor altitudinal, sino a la ubicación de laderas con respecto a las tres regiones climáticas presentes en la zona: Páramo húmedo, región húmeda sub-templada y región muy húmeda templada (Cañadas, 1983), y a la presencia de bosque y cultivos (Buytaert et al., 2006, 2007).

La cuenca tiene una superficie de 6.439km<sup>2</sup>, es decir, representa solamente el 1,85% de la superficie de Ecuador (272.000 km<sup>2</sup>) pero sus características morfológicas y climáticas idóneas la han convertido en el principal complejo hidroeléctrico de Ecuador hasta la fecha (Engebretsen y Cepeda, 1977; Cepeda et al., 1986; Engebretsen et al., 1986). Más del 60% de la producción eléctrica del país se produce en sus centrales hidroeléctricas.

El primer indicio de la planificación de las estaciones meteorológicas de Ecuador empieza en los años 30 del siglo pasado, cuando se inicia el transporte aéreo dentro del territorio nacional, con un fin técnico-sinóptico. Hoy día, a través de la tecnología actual, se tiene posibilidad de vigilar y predecir el comportamiento de la atmósfera y las aguas interiores a través de satélites (Ward et al., 2011) y de las 383 estaciones meteorológicas distribuidas por todo el país. Esto resulta fundamental para emitir alertas tempranas que pueden salvar muchas vidas, reducir los daños materiales y proteger el medio ambiente. En la cuenca del Paute existen 45 estaciones de registro de precipitaciones y 13 estaciones de registro de temperaturas.

El objetivo de este trabajo es crear un mapa preliminar de la distribución espacial de la precipitación y temperatura en toda la cuenca del Paute. Sin embargo, medir estas variables en todas las ubicaciones de la cuenca resultaría difícil y costoso. La interpolación de datos climáticos ha sido estudiada ampliamente en el mundo (Mulugeta, 1996; Dressler et al., 2000; Johnston et al., 2001; Bustamante, 2003; Atorre et al., 2007; Shao et al., 2011; Rey et al., 2012; Camera et al., 2014; Khalili and Rahimi, 2014) y en la cuenca del Paute (Buytaert et al., 2006; Celleri et al., 2007) y se han utilizado distintas técnicas para determinar superficies continuas de variables climáticas como temperatura y precipitación (Fig. 1) a partir de una muestra dispersa de medidas de esas variables. En la actualidad los SIG (Sistemas de Información Geográfica) cuentan con módulos que permiten aplicar estas técnicas de interpolación espacial y geoestadística.

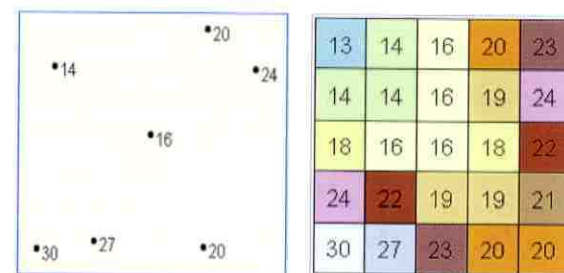


Figura 1.- Ejemplo de interpolación de datos de precipitación. (Tomada de Johnston et al., 2001).

Existen diferentes métodos para predecir el valor de una variable en cada ubicación. Con cada método se realizan diferentes suposiciones acerca de los datos y producen predicciones usando diferentes cálculos. Algunos métodos son más aplicables para

dar cuenta de la variación local mejor que otros. Las herramientas de interpolación, por lo general, se dividen en métodos determinísticos y de estadísticas geográficas.

- Los métodos determinísticos de interpolación asignan valores a las ubicaciones basándose en los valores medidos circundantes y en fórmulas matemáticas específicas que determinan la suavidad de la superficie resultante. Los métodos determinísticos incluyen IDW (ponderación de distancia inversa), Vecino natural, Tendencia y Spline.

- Los métodos de estadísticas geográficas están basados en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación espacial (la relación estadística entre los puntos medidos). Gracias a esto, las técnicas de estadística geográfica no sólo tienen la capacidad de producir una superficie de predicción sino que también proporcionan alguna medida de certeza o exactitud de las predicciones. Kriging es uno de los métodos de interpolación de estadísticas geográficas más conocido.

## 2. METODOLOGÍA

En este trabajo se ha utilizado un Sistema de Información Geográfica libre, concretamente QGIS y algunas de sus herramientas integradas de interpolación espacial (vecino más próximo, ponderación de distancia inversa, splines) y geoestadística (kriging), para crear superficies continuas de precipitación y temperatura (predicción) en formato ráster a partir de los datos del INAMHI de 45 estaciones de registro de precipitaciones y 13 estaciones de registro de temperaturas distribuidas estratégicamente a lo largo y ancho de la cuenca del río Paute. Los datos de precipitaciones son las medias anuales correspondientes al periodo 1964-1995, y los datos de temperatura son las medias anuales correspondientes a diferentes periodos dependiendo de la estación (1970-1988, 1979-1995, 1975-1990, 1975-1993, 1980-1995, 1982-1992, 1982-1994, 1982-1995).

Vecino más próximo: Es un método de interpolación muy simple en el que el valor pronosticado en una celda dada es sencillamente el valor del punto muestral más cercano.

Ponderación de distancia inversa: Utiliza un método

de interpolación que estima los valores de las celdas calculando promedios de los valores de los puntos de datos de muestra en la vecindad de cada celda de procesamiento. Cuanto más cerca está un punto del centro de la celda que se está estimando, más influencia o peso tendrá en el proceso de cálculo del promedio. El valor interpolado en una celda se expresa como:

$$W_i = \frac{N \left( \frac{1}{d_{e,i}} \right)^\beta}{\sum_{i=1}^N \left( \frac{1}{d_{e,i}} \right)^\beta}$$

Donde:

$N$  = número total de estaciones

$d_{e,i}$  = distancia entre el sitio a estimar  $e$  y la estación  $i$

$\beta$  = coeficiente de potencia.

El valor del punto se estima tomando con base un promedio ponderado de los datos de las mediciones. A cada estación se le asigna un peso en virtud de la localización con respecto a otras y con respecto al punto a estimar. Para una red de  $N$  estaciones, la ecuación básica es:

$$P_e = \sum_{i=1}^N W_i P_i$$

Dónde:

$p_e$  = dato estimado en el sitio  $e$

$p_i$  = dato medido en la estación  $i$

$w_i$  = denota el peso de la estación

$i$  = representa el punto estimado en el sitio  $e$

$N$  = número total de estaciones cercanas al sitio  $e$ , que se utilizarán para estimar el dato en el sitio  $e$

Spline: Esta herramienta utiliza un método de interpolación que estima valores usando una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, lo que resulta en una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada o muestra. Considera la dependencia espacial de la variable proporcionando la estimación directa del error de interpolación y el diagnóstico eficaz de errores de los datos (Hutchinson y Gessler, 1994). El modelo estadístico para-este método considerando dos variables de posición independiente (latitud y longitud) y dependencia lineal de elevación es como se expresa a continuación:



$$q_i = f(x_i, y_i) + \sum_{j=1}^p \beta_j \delta_i + \varepsilon_i$$

Donde:

$f(x_i, y_i)$  = función de ajuste desconocida

$\beta_j$  = conjunto de parámetros desconocidos

$x_i, y_i, \Psi_j$  = variables independientes

$\varepsilon_i$  = error aleatorio independiente con media cero y varianza  $\sigma^2$

$d_i$  = pesos desconocidos.

La función de ajuste  $f$  y los parámetros  $\beta_j$  son estimados minimizando:

$$\sum_{i=1}^n \left[ \frac{q_i - f(x_i, y_i) - \sum_{j=1}^p \beta_j \delta_i}{d_i} \right]^2 + \lambda J_m(f)$$

Donde:

$J_m(f)$  = medida de ajuste de  $f$  definido en términos de derivadas de  $f$  de orden  $m$

$\lambda$  = número positivo llamado parámetro de ajuste.

Kriging: Es un procedimiento de estadísticas geográficas avanzado que se basa en una función continua que explica el comportamiento de una variable en las distintas direcciones de un espacio geográfico y permite asociar la variabilidad de la estimación con base a la distancia que existe entre un par de puntos mediante el uso de un semivariograma o variograma el cual permite percibir el nivel de similitud que existe entre éstos a medida que se encuentran más alejados (Gallardo, 2006). El cálculo de la varianza entre pares de puntos separados por intervalos de distancia se conoce como semivarianza ( $\gamma$ ), el cual se representa con:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} N(h) \sum [Z(x) - Z(x+h)]^2$$

Donde:

$\gamma(h)$  y  $N(h)$  = semivarianza para todas las muestras localizadas en el espacio y el número total de pares de muestras separado por el intervalo de distancia, respectivamente, ambos se encuentran separados por una distancia  $h$ .

$Z(x)$  = valor de la muestra en una localización  $x$   
 $Z(x+h)$  = valor de la muestra a la distancia  $h$  desde  $x$

En el caso de la temperatura, para realizar la interpolación es necesario utilizar como variable predictor la altimetría, pero en este caso se ha omitido al no disponer de un modelo digital de elevaciones.

### 3. RESULTADOS

En cuanto a las precipitaciones, la Figura 2 muestra los mapas obtenidos con cada método de interpolación. El mapa obtenido con el método "vecino más próximo" (A) muestra una distribución de las precipitaciones muy compartimentada evidenciando que este método no es adecuado para trabajar con variables continuas. Haciendo una simple comparación visual, comprobamos que la mayor "tasa de éxito" (Ferrán, 1999; Pardo y Ruiz, 2002) corresponde a los mapas obtenidos con "distancia ponderada" (B) y "kriging" (E), reflejando las altas precipitaciones que se registran al NE de la zona de estudio, específicamente alrededor de la estación Copal (3.670 mm/año), ubicada al norte de Morona Santiago con clara influencia amazónica. También representan correctamente las menores precipitaciones que se registran en las estaciones del resto de la cuenca, como la de Cañar (460 mm/año) y Cumbe (672 mm/año). Comparando la figura B y D se observa que el "kriging" (D) suaviza más que "distancia ponderada" (B) los valores extremos de precipitación, por lo que seleccionamos la "distancia ponderada" como el mejor método con mayor tasa de éxito. El mapa obtenido con el método "spline" (C) suaviza demasiado los valores de precipitación al NE de la zona de estudio y por el contrario, los realza en el sector SW, que en realidad es considerablemente menos húmedo.

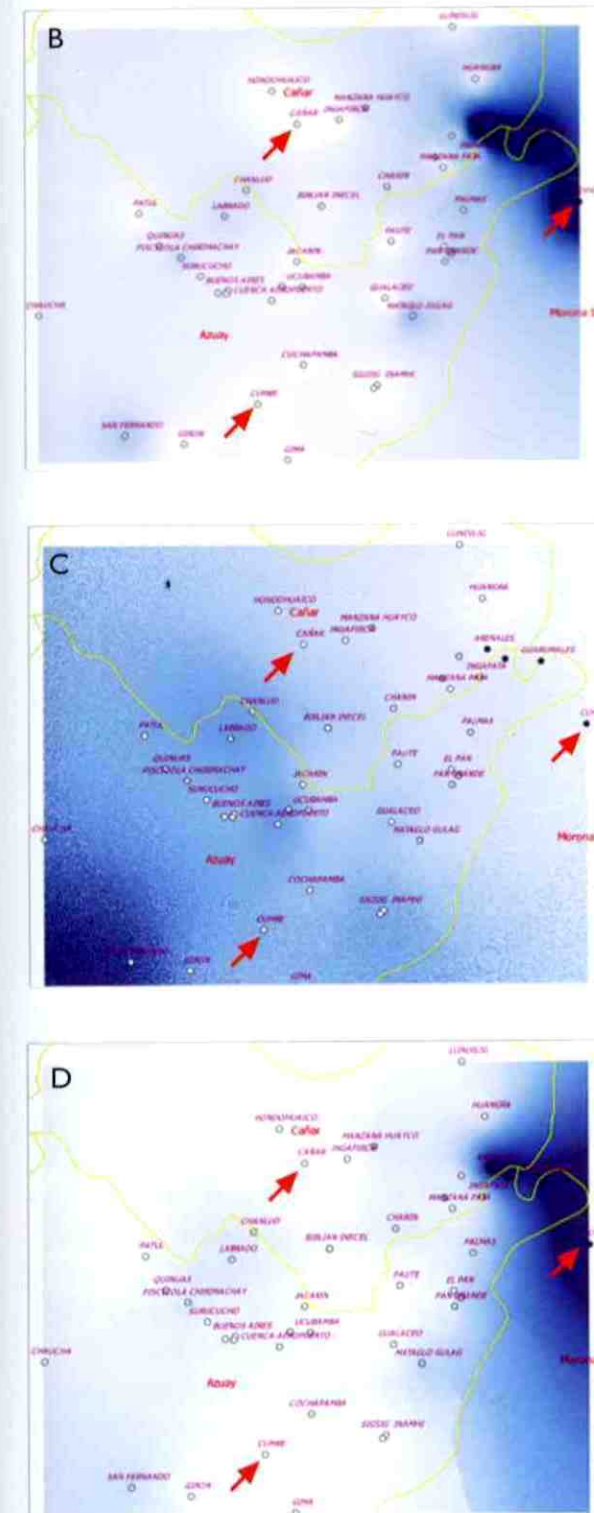
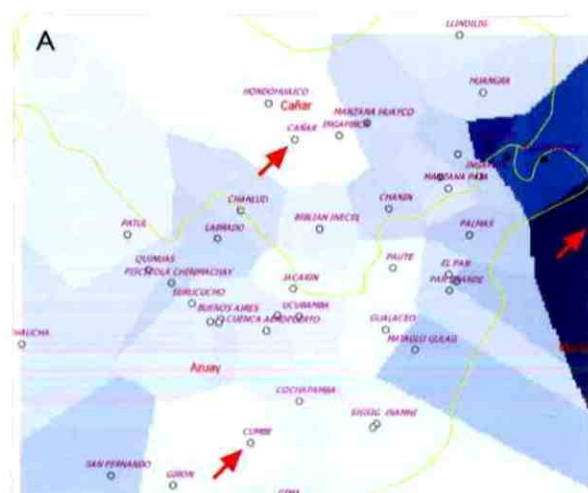


Figura 2.- Mapas de precipitación obtenidos con los métodos de interpolación "vecino más próximo" (A), "distancia ponderada" (B), "spline" (C), y el método geostatístico "kriging" (D). Los puntos representan las estaciones meteorológicas de registro de precipitaciones.

Visualmente, el mapa de precipitación por distancia ponderada (Fig. 2B) también se ajusta bastante bien, al mapa de precipitación media obtenido con el radar satelital TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) (Ward et al., 2011), con la limitación de la importante diferencia de resolución espacial entre ambos rasters.

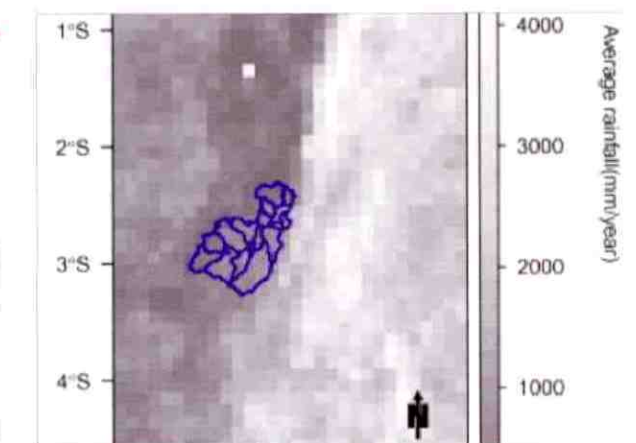


Figura 3.- Precipitación media en la cuenca del Paute (líneas azules) para el periodo: 1998-2009, obtenida con el radar satelital TRMM. (Tomada de Ward et al., 2011).

Y con respecto a la temperatura (Fig. 4) se llegó a determinar que el método menos eficiente fue el de "vecindad próxima" (A) por las mismas razones mencionadas para la precipitación. Mediante una simple comparación visual, podemos apreciar que la mayor "tasa de éxito" corresponde al mapa obtenido por el método "distancia ponderada" (B) pues refleja que las máximas temperaturas medias anuales se registran al SW de la zona de estudio, en el sector de la estación Minas (21,7°C), así como en el sector NE: en Paute (17,3°C), Guarumales (17°C) y Gualaceo (17°C). Las zonas de temperaturas mínimas, sector de El Labrado (8,5°C) y Cañar (11,2°C) también quedan bien representadas. El método "spline" (C) suaviza demasiado la superficie de temperaturas y no distingue con claridad las diferencias de temperaturas entre las estaciones antes mencionadas. El "kriging" suaviza mucho los sectores de temperaturas máximas, hasta el punto de asignarles valores parecidos a los sectores más fríos (El Labrado y Cañar) y predice valores muy altos en los sectores donde no hay datos.



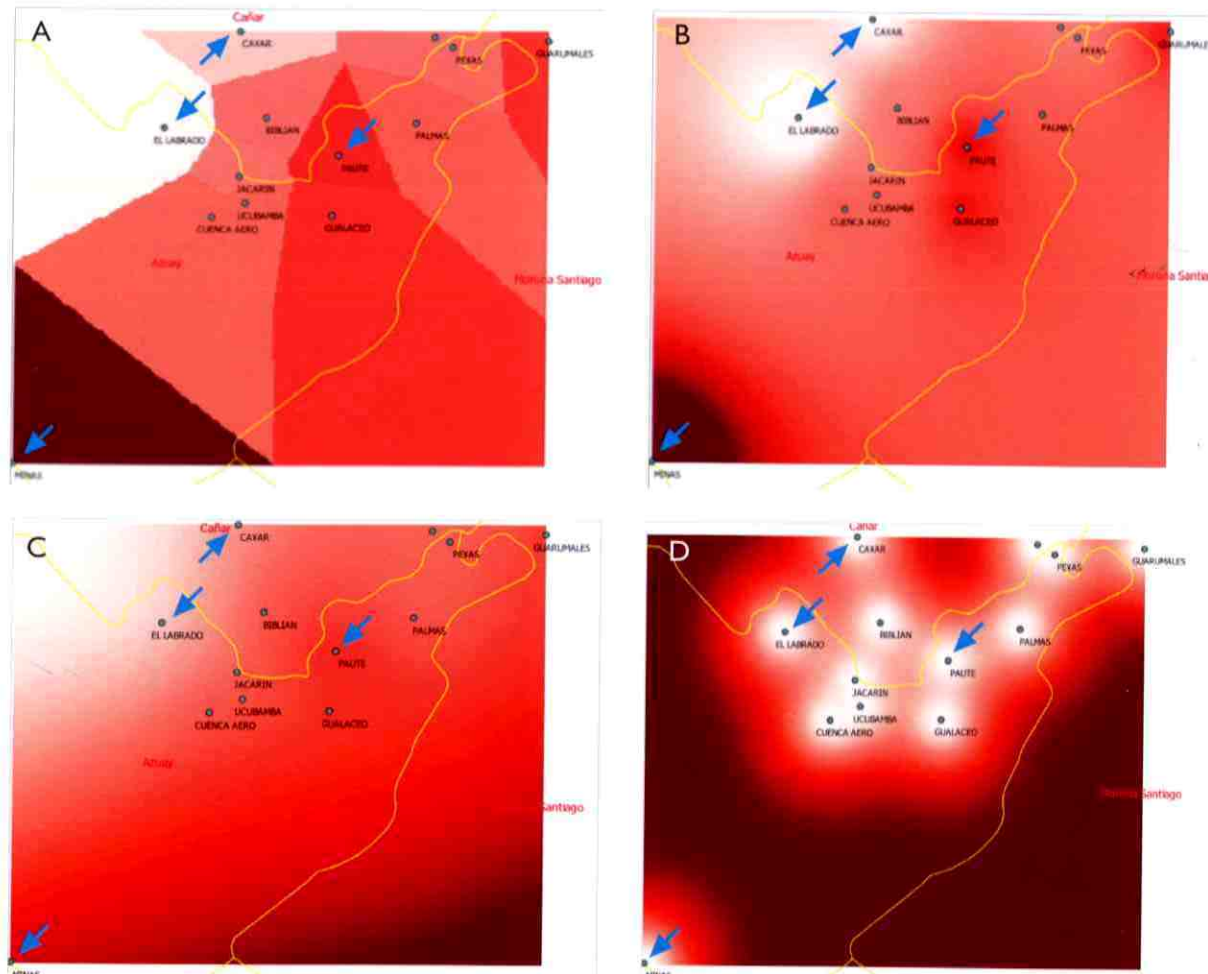


Figura 4.- Mapas de temperatura obtenidos con los métodos de interpolación "vecino más próximo" (A), "distancia ponderada" (B), "spline" (C), y el método geostatístico "kriging" (D). Los puntos verdes representan las estaciones meteorológicas de registro de temperatura.

#### 4. CONCLUSIONES

Después de analizar los cuatro métodos empleados para la interpolación se ha podido verificar que el método de vecino más próximo es el menos indicado ya que no está diseñado para trabajar con variables continuas y compartimenta bruscamente los valores de precipitación y temperatura. Mientras que el método que mejor predice tanto precipitaciones como temperaturas es el de distancia ponderada, pues las superficies obtenidas son las que mejor se adaptan a todos los valores, tanto extremos como intermedios, registrados en las estaciones meteorológicas.

La distribución espacial de la temperatura obtenida mediante distancia ponderada obedece fundamentalmente al factor altitudinal, predic-

iendo las menores temperaturas en las zonas de páramo y las mayores en los fondos de valle a su salida hacia el oriente. Sin embargo, la distribución espacial obtenida para las precipitaciones no parece estar controlada únicamente por la altitud, sino por la ubicación de las laderas con respecto a las tres regiones climáticas presentes en la zona: Páramo húmedo, región húmeda sub-temperada y región muy húmeda temperada (Cañadas, 1983), y a la presencia de vegetación y cultivos (Buytaert et al., 2006, 2007).

Dado que las precipitación y la temperatura (evaporación) condicionan los caudales de escorrentía superficial, los mapas obtenidos en este trabajo podrían utilizarse como inputs preliminares para estudios hidráulicos y modelización de inundaciones por crecidas torrencial-

es. Por otro lado, la lluvia es uno de los factores de disparo de movimientos de ladera, por lo tanto, el mapa de precipitaciones obtenido en este trabajo podría constituir por sí solo, una primera aproximación a un mapa de riesgo por movimientos de ladera (Abril y Knight, 2004; Basabe et al., 1996), o a un mapa de erosión (Harden, 1991; Molina et al., 2008, Vanacker et al., 2007).

Este trabajo tiene una limitación relacionada con la forma en la que se ha elegido el método de interpolación más adecuado. La validación o contrastación de los modelos predictivos obtenidos con pocos datos de entrenamiento, como es el caso de las superficies de precipitación y temperaturas interpoladas con unas pocas estaciones meteorológicas, debe realizarse mediante validación cruzada a fin de garantizar que los resultados del análisis estadístico son independientes de la partición entre datos de entrenamiento y prueba. Sin embargo, en este trabajo no se ha realizado dicha partición, todas las estaciones meteorológicas han sido empleadas para generar el modelo predictivo, por lo tanto sólo podemos hablar de la "tasa de éxito" del modelo pero nunca de la "tasa de predicción" (Ferrán, 1999; Pardo y Ruiz, 2002). Además, la contrastación o validación del modelo predictivo se ha realizado simplemente de forma visual.

Una correcta interpolación de la temperatura debería haber utilizado la altimetría como variable predictora. Sin embargo, no se ha tenido en cuenta al no disponer de un modelo digital de elevaciones de la zona de estudio.

Los mapas obtenidos en este trabajo tienen una limitación temporal ya que el clima en la zona de estudio ha experimentado oscilaciones a lo largo de los años (Ward et al., 2011; Mora y Willems, 2012; Mora et al., 2013; Mora et al., 2014). Por lo tanto, lo recomendable sería generar mapas de precipitación y temperatura correspondientes a periodos de tiempo en los que el clima ha permanecido más o menos constante.

La selección del método de distancia ponderada como el de mayor tasa de éxito podría ser una conclusión poco fundamentada, ya que es conocido (según la literatura científica) que la precipitación presenta autocorrelación espacial y al utilizar el método de distancia ponderada, se obvia esto. El método más apropiado sería el Kriging.

Como recomendación se plantea en una segunda fase profundizar en este mismo trabajo solventando todas las limitaciones metodológicas para así obtener mapas de precipitación y temperatura más confiables..

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la ayuda del profesor de la asignatura de Geomática, Ing. Enrique Acosta, PhD, en la revisión y estructuración del documento.

#### REFERENCIAS

Abril, B and Knight, D. 2004. Stabilising the Paute River in Ecuador. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Civil Engineering, Vol. 157, Issue 1, pp. 32-38.

Attorre, F; De Sanctis, M; Francesconi, F; Bruno, F; Alfó, M. 2007. Comparison of interpolation methods for mapping climatic and bioclimatic variables at regional scale. n: International Journal of Climatology, Vol. 27(13): 1825-1843.

Basabe, P; Almeida, E; Ramón, P; Zeas, R; Álvarez, L. 1996. Avance en la prevención de desastres naturales en la Cuenca del río Paute, Ecuador. Boletín del Instituto Frances de Estudios Andinos, Vol. 25, Issue 3, pp. 443-458.

Bustamante, J. 2003. Cartografía predictiva de variables climáticas: comparación de distintos modelos de interpolación de la temperatura en España peninsular: Graellsia, Vol. 59, Issue 2-3, p.359.

Buytaert, W; Celleri, R; Willems, P; Bièvre, B; Wyseure, G. 2006. Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. Journal of Hydrology 329(3): 413-421.

Buytaert, W; Iniguez, V; Bièvre, B. 2007. The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. Forest Ecology and Management 251(1): 22-30.

Camera, C; Bruggeman, A; Hadjinicolaou, P; Pashiardis, S; Lange, M.A. 2014. Evaluation of interpolation techniques for the creation of gridded daily precipitation (1 x 1 km<sup>2</sup>), Cyprus, 1980-2010. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 119 (2) Hoboken: Wiley-Blackwell, 693-712.

Cañadas, L. 1983. El Mapa Bioclimático y Ecológico del Ecuador. MAG-PRONAREG. Quito.

Celleri, R; Willems, P; Buytaert, W; Feyen, J. 2007. Space-time rainfall variability in the Paute basin, Ecuadorian Andes. Hydrological Processes, 21(24): 3316-3327.

Cepeda, L; Engebretsen, A.R; Kollgaard, E.B; 1986. Design and construc-





tion of Paute project, Ecuador: INECEL, 1986: 1885-1894.

Dressler, K.A.; Fassnacht, S.R.; Bales, R.C.; Davis, R.E.; Lampkin, D.; Myers, D.E. 2000. Geostatistical interpolation of point-measured SWE in the Colorado River Basin. EOS Transactions, American Geophysical Union, Fall Meet. Suppl. 81(48): F 397.

Engelbrechtsen, A.R.; Cepeda, L. 1977. Power for Ecuador: The Paute project. Water Power Dam. Constr., vol.29, no.11, pp.23-28.

Engelbrechtsen, A.R.; Kollgaard, E.B.; Cepeda, L. 1986. Design and construction of Paute Project, Ecuador. Waterpower '85, Vol. 3, Proc. Int. Conf. on Hydropower, Las Vegas, U.S.A., Sep. 25-27, 1985. M.J. Roluti (ed.), New York, U.S.A., Am. Soc. Civ. Engrs., 1986, p.1885-1894. (ISBN 0-87262-536-2).

Ferrán, M. 1999. SPSS para Windows. Programación y análisis estadístico. McGraw Hill, 580 pp.

Gallardo, A. 2006. Geoestadística. Ecosistemas. Núm. 6:1-11.

Harden, C.P. 1991. Andean soil erosion. Research & Exploration 7 (2), 216-231.

Hutchinson, M. F.; Gessler, P.E. 1994. Splines – more than just a smooth interpolator. Geoderma 62: 45-67.

INAMHI, sitio web. <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/>

Johnston, K.; Ver Hoef, J.M.; Krivoruchko, K.; Lucas, N. 2001. Using ArcGIS geostatistical analyst. ESRI, New York, United States of America. 300 p.

Khalili, A. and Rahimi, J. 2014. High-resolution spatiotemporal distribution of precipitation in Iran: a comparative study with three global-precipitation datasets. Theoretical & Applied Climatology, Vol. 118 Issue 1/2, p211-221. 11p.

Molina, A.; Govers, G.; Poesen, J.; Van Hemelryck, H.; De Bièvre, B.; Vanacker, V. 2008. Environmental factors controlling spatial variation in sediment yield in a central Andean mountain area. Human and climatic impacts on fluvial and hillslope morphology. Geomorphology 98(3): 176-186.

Mora, D.E.; Willems, P. 2012. Decadal oscillations in rainfall and air temperature in the Paute River Basin-Southern Andes of Ecuador. Theoretical and Applied Climatology. 108(1-2): 267-282.

Mora, D.E.; Campozano, L.; Cisneros, F.; Wyseure, G.; Willems, P. 2013. Climate changes of hydrometeorological and hydrological extremes in the Paute basin, Ecuadorian Andes. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, Vol. 10, Issue 5, p.6445-6471, 27p.

Mora, D.E.; Willems, P.; Cisneros, F.; Wyseure, G.; Campozano, L. 2014. Climate changes of hydrometeorological and hydrological extremes in the Paute basin, Ecuadorian Andes. Hydrology and Earth System Sciences, 19, 18(2): 631-648.

Mulugeta, G. 1996. Manual and Automated Interpolation of Climatic and Geomorphic Statistical Surfaces: An Evaluation. Annals of the Association of American Geographers, Vol. 86, Issue 2, p. 324-342.

Pardo, A. y Ruiz, M.A. 2002. SPSS 11. Guía para el análisis de datos. McGraw Hill, 715 pp.

Rey, J.C.; Rodríguez, M.F.; Cortez, A.; Lobo, D.; Ovalles, F.; Gabriels, D.; Parra, R.M. 2012. Análisis de la agresividad y concentración de las precipitaciones en Venezuela. IV. Región los Andes. Bioagro, Vol. 24 Issue 2, p115-120, 6p.

Shao, Q.; Sun, C.; Liu, J.; He, J.; Kuang, W.; Tao, F. 2011. Impact of urban expansion on meteorological observation data and overestimation to regional air temperature in China. Journal of geographical sciences. Acta geographica sinica, Vol. 21, Issue 6, p994-1006, 13p.

UMACPA (Unidad de Manejo para la Cuenca del río PAute). 1995. Estudio geomorfológico de la dinámica de los principales procesos erosivos y de sedimentación de la cuenca del río Paute. Cuenca.

Vanacker, V.; Molina, A.; Govers, G.; Poesen, J.; Deckers, J. 2007. Spatial variation of suspended sediment concentrations in a tropical Andean river system: the Paute River, southern Ecuador. Geomorphology, Vol. 87, Issue 1-2, pp. 53-67.

Ward, E.; Buytaert, W.; Peaver, L.; Wheeler, H. 2011. Evaluation of precipitation products over complex mountainous terrain: A water resources perspective. Advances in Water Resources 2011 34(10): 1222-1231.



## Revisión de Estado del Arte en Convertidores de Potencia Aplicado a “Calentamiento por Inducción”

KEVIN CHACA, Universidad de Cuenca - Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones  
FABIÁN NAULA, Universidad de Cuenca - Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones  
GINO JARAMILLO, Universidad de Cuenca - Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones  
FELIPE TORRES, Universidad de Cuenca - Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones  
MATEO ZÚÑIGA, Universidad de Cuenca - Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Fecha de recepción: septiembre 15, 2014  
Fecha aceptación: noviembre 20, 2014

### Resumen

Este artículo es una revisión del estado del arte de convertidores electrónicos de potencia de tipo resonante, aplicado a calentadores por inducción. En el mismo se estudian las topologías más importantes y se comparan desde el punto de vista de eficiencia energética, dimensionamiento de componentes pasivos y de técnicas de modulación. Dentro de los aspectos tratados, se concluye que la bobina multi-fibra, la topología de medio puente y control por medio de modulación PWM-ZVS, presentan ventajas en cuanto a eficiencia, costos y simplicidad respectivamente.

**Palabras Clave:** convertidor de potencia, calentamiento por inducción, convertidores resonantes, cocina doméstica.

### Abstract

This article is a review of the state of the art power electronic converters resonant type, applied to induction heating. Are the most important topologies studied and compared from the point of view of energy efficiency, sizing of passive components and modulation techniques. Within the treated areas, it is concluded that the multi-fiber coil half-bridge topology and control using PWM-ZVS, have advantages in terms of efficiency, cost and simplicity respectively.

**Keywords:** power converter, induction heating, resonant converters, domestic kitchen.

### I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la electrónica de potencia permite aumentar el confort y la calidad de vida de las personas, a través de sus aplicaciones. Una de ellas, corresponde a las cocinas de calentamiento por inducción, que representan mejoras considerables respecto a las antiguas cocinas que utilizaban derivados líquidos de petróleo y que luego fueron renovadas para utilizar gas doméstico e industrial.

Particularmente en la República del Ecuador, la importación de gas natural destinado a uso doméstico representa una carga económica elevada por los subsidios aplicados. Por esta razón, es necesario el cambio de la matriz energética para explotar el alto potencial presente en el país, en otras fuentes primarias que permitan tener a corto plazo un superávit de energía eléctrica potencialmente utilizable en aplicaciones domésticas como el calentamiento por inducción (Espinel, 2013). Un punto de importancia en la construcción y diseño de las cocinas de inducción y en general de cualquier producto es: Satisfacer no sólo las expectativas funcionales y de tecnología del cliente, sino también aquellas que son físicas para el agrado de los clientes (G. Pahl, 2007), brindando mayor seguridad, reduciendo gastos, promoviendo una vida útil prolongada y mayor eficiencia energética. Por lo tanto, los productos no sólo tienen una función y un excelente rendimiento, sino también deben tener algunos factores relacionados con la necesidad del producto de manera que se acople a los usuarios. El modelado del producto es



vital, ya que refleja todo un contenido semántico del producto en el interior de este. Un simple producto contiene mucha información compleja, motivo por el cual, la principal tarea de los diseñadores es convertir esa información en el producto final (Waage, 2007) (Acero, 2013).

Esta investigación centra su estudio en la revisión del estado de arte en la electrónica de potencia aplicada en las cocinas por inducción, así como las mejoras utilizan hoy en día para alcanzar una mayor eficiencia energética, para esto se utiliza una cantidad considerable de artículos científicos recientes de la base de datos IEEE Xplore®.

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. Antecedentes

En los últimos años, se ha impulsado en gran manera la investigación y desarrollo de cocinas y hornos eléctricos basados en la inducción por las grandes ventajas que presentan sus circuitos y topologías en el tema de eficiencia energética (Humphreys, 1938). Además, con los enormes avances de dispositivos semiconductores de conmutación de potencia, es posible la transformación de corriente de inducción electromagnética en energía calórica directamente (Sugimura, 2008). El calentamiento por inducción utiliza topologías de inversores conmutando a alta frecuencia (Yasui, 2007), presentando ventajas como el ahorro energético (Chudjuarjeen, 2008), y procesos de calentamiento rápido, mediante el control de la temperatura. Sobre esta última ventaja, se conoce que el calentamiento por inducción produce temperaturas elevadas, inclusive, hasta el punto de fusión del acero. Cada aplicación utiliza diferentes frecuencias. La cocción por inducción es tan solo una de muchas aplicaciones para calentamiento por inducción.

### 2.2. Cocinas de Inducción

Una de las ventajas que ofrecen las cocinas por inducción es la posibilidad de mantener su panel a temperatura ambiente, mientras se calienta el recipiente, lo que implica menos consumo de energía (Chudjuarjeen, 2008).

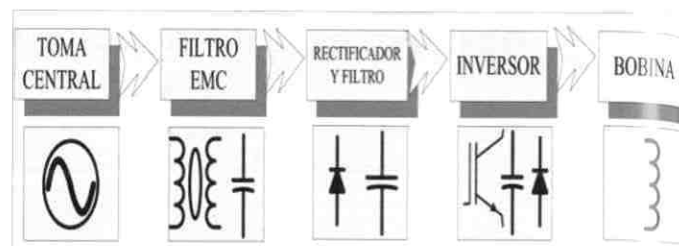


Fig. 1. Diagrama de Bloques del Circuito de Potencia para la Cocina de Inducción (Chudjuarjeen, 2008).

El diagrama de bloques de una cocina por inducción se observa en la Fig. 1. El filtro EMC evita interferencia eléctrica y reduce la distorsión armónica, fenómeno que es una de las potenciales desventajas de esta tecnología. Este dispositivo proporciona inmunidad a la electrónica asociada al sistema. El elemento de rectificación y filtrado genera una tensión de corriente directa (DC), la cual es alterada en altas frecuencias en el inversor. Para ello, se utilizan dispositivos como los Transistores Bipolares de Compuerta Aislada (IGBTs) o MOSFET, capaces de manejar potencias en el rango de KW a frecuencias de conmutación de hasta decenas de kHz, permitiendo controlar altas potencias a grandes velocidades. El circuito de excitación necesario en los IGBTs es parecido a los utilizados en los MOSFET, mientras que en la parte de conducción, el terminal de colector-emisor para el BJT es análogo a los terminales drenador-fuente en los IGBTs (Dede, 2004) (Yeon, 2013). Su velocidad de conmutación de hasta 20 kHz ha sustituido al BJT en este rango de conmutación (Onishi, 1998). La Tabla 1 muestra las principales características de los dispositivos semiconductores de potencia utilizados, lo que comprueba las facilidades y ventajas respecto a la frecuencia y a la potencia del transistor IGBT, motivo por el cual se selecciona este transistor de potencia media y frecuencia media alta.

Componente	TIRISTORES	TRANSISTORES IGBT	TRANSISTORES MOS
Potencia	Muy Alta (>1000 kW)	Media - Alta (10 - 1000 kW)	Baja - Alta (1 - 1000 kW)
Frecuencia	Baja (0.5 - 1 kHz)	Media - Alta (1 - 100 kHz)	Alta - Muy Alta (100 - 600 kHz)

Tabla 1. Clasificación de semiconductores.

En relación a la carga, se elige un valor de condensador pequeño para obtener un alto factor de potencia y mejorar la eficiencia energética. El inversor resonante convierte la corriente directa en una corriente pulsante de forma cuadrada a una frecuencia variable generalmente entre 20-100 kHz. Esta corriente presente en la bobina de carga produce el campo magnético alterno, que hace que las corrientes de Foucault e histéresis magnética calienten el recipiente de material ferroso (Lucia, 2009b). Para ello, hacemos uso de un circuito resonante; un condensador y un inductor o bobina como muestra la Fig. 2. Su funcionamiento radica almacenar energía para lo cual: el condensador lo hace en forma de carga eléctrica, mientras que el inductor en forma de campo magnético, constituyendo una oscilación electromagnética, en la cual el campo eléctrico y magnético son perpendiculares entre sí. La característica de estos circuitos es que la velocidad con que fluye y retorna la corriente desde el condensador a la bobina o viceversa, se produce a cierta frecuencia denominada frecuencia de resonancia, que depende de los valores de la capacitancia e inductancia (Chuang, 2005).



Fig. 2. Bobina real empleada en una cocina por inducción magnética.

## 3. TOPOLOGÍAS

A través del tiempo se han estudiado y modelado distintos tipos de topologías para el diseño de inversores, que tienen por objetivo generar una corriente alterna a una frecuencia de resonancia aplicada a una bobina, la cual generará el campo magnético inducido, que hace que las

corrientes de Foucault y de histéresis produzcan el calentamiento del recipiente metálico (Arunmugam, 2012) (Byun, 2000) (Lucia, 2009). En el diseño de los inversores se debe considerar el efecto de los transitorios en las conmutaciones, por esto es necesario operar en el modo Zero Voltage Switching (ZVS) o Zero Current Switching (ZCS), que mediante una constante de control de descuento de tiempo modifica los pulsos, cambiando el ciclo de trabajo de la onda cuadrada y regulando la tensión de salida. Dado que los interruptores no pasan de su estado de saturación a corte inmediatamente, se aprovecha la transición de la resonancia natural del circuito (Andreyca, 1999).

### 3.1. Inversores con Carga Serie-Paralelo

En los inversores con carga de tipo serie, el capacitor de compensación es colocado en serie junto al inductor del calentador. Los inversores en serie son mejores en aplicaciones donde la bobina tiene alta impedancia tales como cocinas o forjas, que son las aplicaciones estudiadas en este artículo.

Los inversores con carga de tipo paralelo permiten al circuito adaptarse mejor a la frecuencia de resonancia, además trabaja a más altas frecuencias. En general los inversores paralelos son mejores cuando la bobina tiene baja impedancia como en máquinas de soldar (Dede, 2004).

### 3.2. Topología Puente Completo

Esta topología se basa en un arreglo de conmutadores llamado también puente H. El inversor consta de cuatro interruptores de estado sólido (S1, S2, S3, S4) con diodos anti-paralelos, un condensador resonante  $C_o$  y la bobina de inducción lo que forma parte de una combinación en serie de la resistencia parasita  $R_{eq}$  como se muestra en la Fig. 3 (Yasui, 2007) (Lai, 1994). El inversor de puente completo permite que el circuito alterne entre el nivel de voltaje positivo y negativo, además de dejar el circuito en nivel cero de voltaje, lo que aporta ventajas en el control, tales como: modificar el



descuento de tiempo,  $\alpha$ , usado en ZVS. Se pueden diferenciar 5 modos de operación en un ciclo de trabajo (Arumugam, 2012), los cuales se detallan a continuación:

Modo 1,  $t_0 < t < t_1$ : Se activan los conmutadores S1 y S4, la corriente  $I_{Lo}$  fluye en sentido negativo a través de los diodos anti-paralelo de S1 y S4. ZVS es conseguido en S2 y S3.

Modo 2,  $t_1 < t < t_2$ : La corriente  $I_{Lo}$  fluye en sentido positivo. Los conmutadores S1 y S4 se encuentran conduciendo dicha corriente.

Modo 3,  $t_2 < t < t_3$ : Los conmutadores S1 y S4 son desactivados y los conmutadores S2 y S3 son activados. La corriente  $I_{Lo}$  que fluye en sentido positivo empieza a invertir su sentido.

Modo 4,  $t_3 < t < t_4$ : La corriente  $I_{Lo}$  fluye en sentido negativo y a través de los conmutadores S2 y S3. ZVS es conseguido en los conmutadores S1 y S4.

Modo 5,  $t_4 < t < t_5$ : El conmutador S2 es desactivado y conduce el conmutador S3 y el diodo anti-paralelo del conmutador S1. La corriente  $I_{Lo}$  sigue fluyendo en sentido negativo. ZVS es conseguido en el conmutador S2.

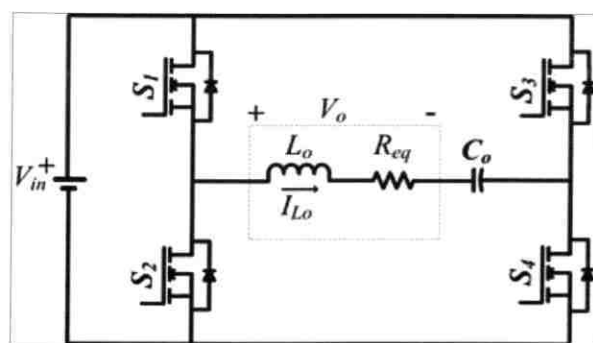


Fig. 3. Esquema de Inversor de Puente Completo.

En la Fig. 4, se puede observar los 5 modos de operación, además de la ubicación de la constante de control de descuento de tiempo. Dado que los períodos de conmutación son menores a los del periodo de la resonancia, las frecuencias de conmutación son mayores a la

de resonancia, para poder asegurar una conmutación suave de ZVS (Arumugam, 2012) (Lai, 1994) (Carretero, 2011).

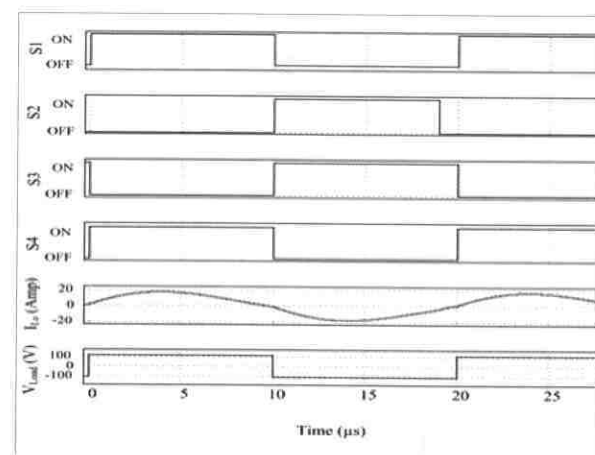


Fig. 4. Modos de Operación Puente Completo.

### 3.3. Topología Medio Puente

En esta topología se utiliza solo dos componentes activos (S1, S2) lo que minimiza costos, tanto en componentes como en el sistema de control. El esquema puede ser observado en la Fig. 5. En este esquema el voltaje en la bobina alterna entre los niveles positivo y negativo. Esta topología es la más usada, debido sobre todo a la facilidad del control de conmutación (Lucia 2009) (Nishida, 2003) (Ogura, 2004) (Koertzen, 1995) (Cetin, 2009). Al igual que en la topología de puente completo, es posible distinguir cinco modos de operación en cada ciclo apreciado en la Fig. 6 (Nishida, 2003).

Modo 1,  $t_0 < t < t_1$ : El conmutador S1 es activado, mientras S2 está desactivado. La corriente  $I_{Lo}$  fluye en sentido negativo, mediante el diodo anti paralelo de S2.

Modo 2,  $t_1 < t < t_2$ : Los conmutadores mantienen su estado anterior, el capacitor C2 empieza a cargarse y la corriente  $I_{Lo}$  fluye en sentido positivo.

Modo 3,  $t_2 < t < t_3$ : El conmutador S2 se mantiene desactivado y el conmutador S1 se desactiva, la corriente  $I_{Lo}$  fluye en sentido positivo a través del inductor. S1 con ZVS.

Modo 4,  $t_3 < t < t_4$ : Se activa el conmutador S2 y la corriente  $I_{Lo}$  continúa disminuyendo por el diodo de S2.

Modo 5,  $t_4 < t < t_5$ : Ambos conmutadores mantienen su estado, la corriente  $I_{Lo}$  fluye en sentido negativo debido a la descarga del condensador hasta el próximo ciclo.

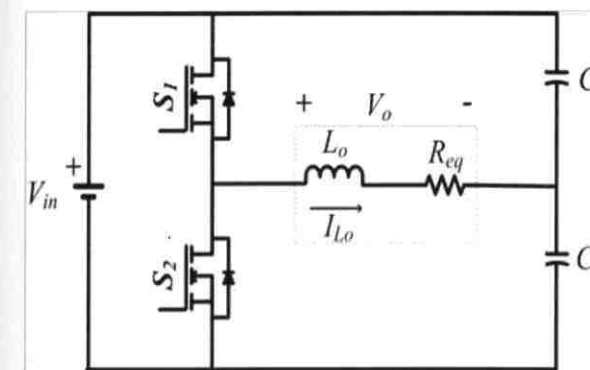


Fig. 5. Topología de Medio Puente.

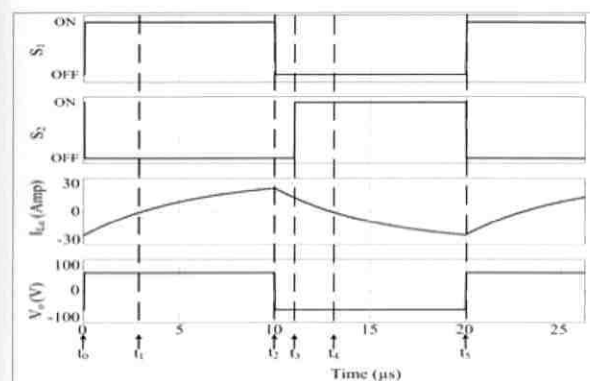


Fig. 6. Modos de Operación Inversor Medio Puente.

### 3.4. Topología de Interruptor Simple

Esta topología es un convertidor AC-AC, el sistema modulador consiste en un conmutador que corta la señal a intervalos de tiempo, señalados por el controlador, logrando aumentar la frecuencia de la señal, pero obteniendo una señal de más compleja modelización matemática.

Esta topología es un convertidor AC-AC, el sistema modulador consiste en un conmutador que corta la señal, a intervalos de tiempo señalados por el controlador, logrando aumen-

tar la frecuencia de la señal, pero obteniendo una señal de más compleja modelización matemática, la señal se aprecia en la Fig. 7. Para su análisis se puede hacer uso de las series de Fourier (Byun, 2000) y el circuito equivalente Thevenin, mostrado en la Fig. 8, sobre el cual, generalmente, se realiza el análisis eléctrico de las topologías (Viriya, 2002).

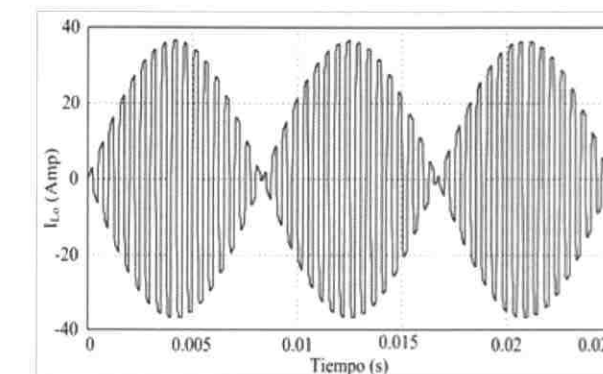


Fig. 7. Corriente generada por la topología de interruptor simple.

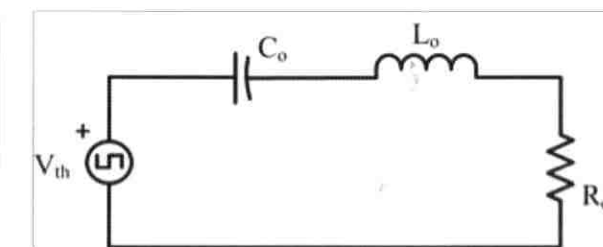


Fig. 8. Circuito equivalente Thevenin.

## 4. ELEMENTOS DE ESTUDIO PARA AUMENTAR LA EFICIENCIA.

### 4.1 Bobinas

La geometría y el conductor utilizado en la fabricación de la bobina, puede mejorar la eficiencia energética y al mismo tiempo mejorar la distribución de calor. Las bobinas pueden ser construidas con cable sólido o cable multi-fibra, siendo este último más utilizado, pues en altas frecuencias el efecto skin repercute en la resistencia del cable (Sinha, 2010) (Meng, 2012). Las pérdidas en la bobina se deben a la resistencia de conducción y a las resistencias dado por las corrientes de Foucault inducidas. Estos efectos se observan en la Fig. 9. La resistencia



de inducción aumenta con la incorporación del recipiente metálico como carga. Para mejorar el acoplamiento, recipiente-cocina, se coloca un concentrador de flujo que consiste en una placa ferromagnética debajo del inductor (Sinha, 2010) (Hernández, 2002) (Acero, 2010).

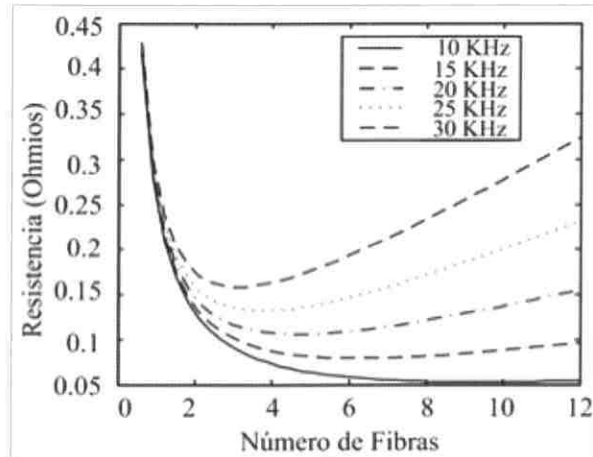


Fig. 9. Resistencia dependiente del número de fibras de diámetro=0,5mm (Hernández, 2002).

En el conductor utilizado para la bobina, si  $d < 2\delta$ , donde  $d$  es el diámetro de la fibra,  $\delta$  es la profundidad del efecto piel, se puede tomar a la resistencia de conducción, como la de corriente continua dada en (1) y la resistencia que se debe a las pérdidas por las corrientes inducidas, se puede expresar por (2). Donde  $\rho$  la resistividad del material del cable,  $l$  la longitud,  $N$  el número de espiras,  $r_i$  el radio de cada espira,  $\omega$  es la frecuencia en rad/seg y  $B_0$  el campo generado por un amperio en una espira. La resistencia total está dada por (3), donde  $n$  es el número de fibras.

$$R_{cond} = \frac{4\rho l}{\pi d^2} \quad (1)$$

$$R_{ind\_eddy} = \frac{\pi\omega^2 d^4 N^2}{64\rho} \sum_{i=1}^N 2\pi r_i B_0^2 (r_i) \quad (2)$$

$$R_{total} = nR_{ind\_eddy} + \frac{R_{cond}}{n} \quad (3)$$

Otro aspecto considerado en los cables multi-fibra es su trenzado. La reducción de la resistencia es importante para reducir las pérdidas lo cual se traduce en mayor eficiencia (Acero, 2005). Para mejorar la distribución de calor se utilizan múltiples bobinas, en (Acero, 2013) se

encuentran el modelo del acople de múltiples bobinas para el diseño de superficies de cocina. El diseño más estudiado es el acoplamiento entre dos bobinas para conseguir mejor distribución en un solo quemador, como se puede encontrar en (Carretero, 2013) (Burdio, 2005). Para este caso, se recomienda un control con desfase entre tensiones de las bobinas para lograr mejor acople disminuyendo las interferencias. En la Fig. 10, se aprecia la diferencia de la potencia de salida respecto al cambio de frecuencia y al cambio de la fase entre los controladores de las bobinas.

Uno de los puntos críticos en el diseño de las bobinas es su eficiencia en el calentamiento del recipiente, ya que uno de los problemas es que la alta densidad de corriente de Foucault se concentra en un área del fondo del recipiente con un solo pico, Fig. 11a, en donde se muestra la intensidad de corriente a lo largo de la mitad del recipiente.

La respuesta de una bobina tradicional ocurre debido a la alineación no uniforme por debajo del recipiente (Meng, 2012), los flujos magnéticos generados por los bobinados internas que son cercanos al centro no alcanzan a las regiones cercanas a la circunferencia del recipiente y, por otro lado, los bobinados exteriores, tampoco llegan a las partes interiores o cercanas al centro del recipiente.

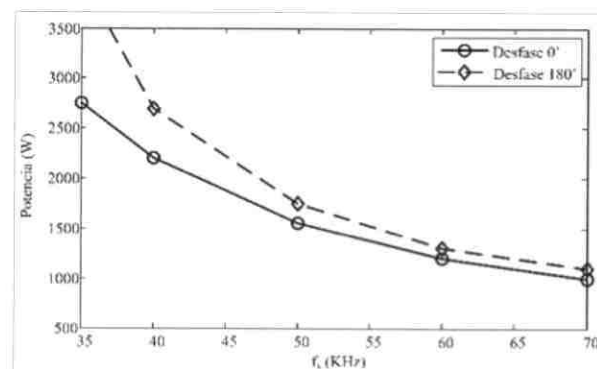


Fig. 10. Potencia de salida sin desfase y con desfase de 180 grados. (Carretero, 2013).

Para este problema, se han encontrado dos tipos de soluciones, la primera es un sistema de calentamiento por inducción con zonas

controladas, que se basa en dividir a la bobina uniformemente en varios grupos de bobinados con diferentes corrientes a diferentes frecuencias (Miyagi, 2006), en donde también se plantea un control para los inversores de alta frecuencia de conmutación (Cetin, 2009) (Chan, 1999). La segunda alternativa, es cambiar el plano de ferrita debajo de la bobina por barras de ferritas colocadas concéntricamente, con el fin de mejorar la distribución de corriente en el recipiente a calentar, adicionalmente, agregando dos regiones más de bobinados con un cierto número de espiras (Meng, 2012), una en la parte interna y otra en la parte externa de la bobina convencional. Este diseño de bobinas toman el nombre de bobinas de vuelta con ángulo variable o del idioma ingles Variable Turn Pitch (VTP). El resultado de utilizar estas bobinas VTP se puede ver en la Fig. 11b, en la cual podemos ver que la distribución de corriente es constante en un área mayor, a la que se obtiene del diseño tradicional.

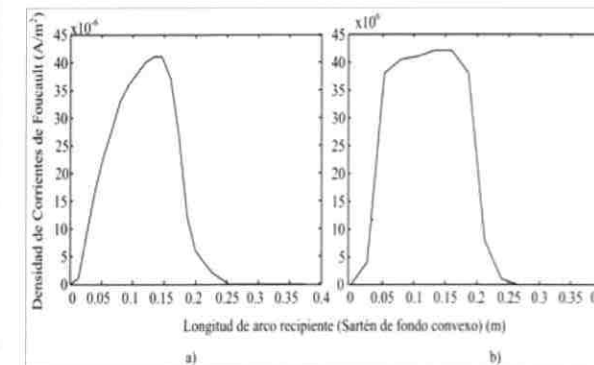


Fig. 11. Densidad de Corrientes de Foucault con: a) bobinas simples tradicionales, b) bobinas VTP.

## 4.2. Control

En los sistemas de calentamiento por inducción, mediante el sistema de control, se puede llegar a mejorar su eficiencia, tanto en el ámbito energético como en la robustez del sistema. Con el control se regulan las frecuencias y potencias entregadas a la bobina, para obtener la temperatura deseada. Dado que las topologías de los sistemas de calentamiento por inducción se han estudiado ampliamente, las investigaciones que producen mejoras en el rendimiento en

la actualidad, se dan sobre el desarrollo en las estrategias de control y materiales utilizados. La implementación del control en los inversores más utilizados, se basan fundamentalmente en tres tipos de modulaciones, modulación por ancho de pulso (PWM), modulación por frecuencia de pulso (PFM) y modulación por densidad de pulso (PDM).

### 4.2.1. Control PWM (Pulse Width Modulation)

La modulación por ancho de pulsos consiste en modificar el ciclo de trabajo de la señal de control, manteniendo la frecuencia de operación constante (Ogura, 2004). El ciclo de trabajo (Duty Cycle) es el parámetro que varía en PWM y se define como la relación entre el tiempo de la señal en estado activo y el periodo completo de la señal. El efecto en la potencia del cambio de ciclo de trabajo se observa en la Fig. 12.

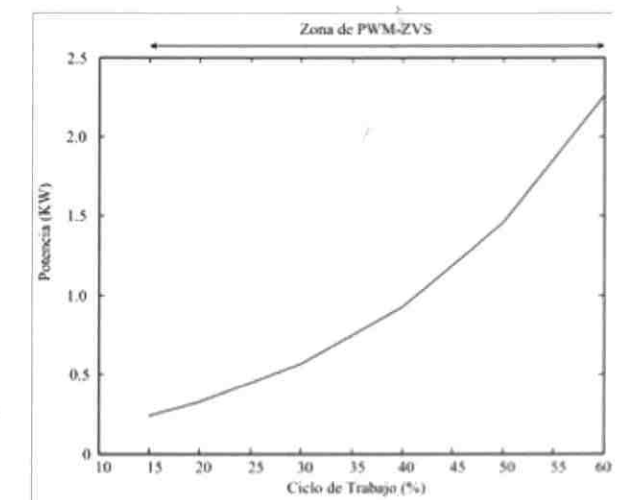


Fig. 12. Características de la regulación de potencia de un inversor controlado por ZVS-PWM en relación al ciclo de trabajo.

La capacidad de variar la potencia, sin variar la frecuencia es la principal ventaja del control PWM, pues para obtener un rendimiento eficiente, se necesita trabajar con inversores resonantes con ZVS por lo que se han desarrollado bastantes diseños de inversores controlados por ZVS-PWM, enfocados en las cocinas de inducción (Ogura, 2004) (Wang 1996a) (Wang, 1996b) (Sugimura, 2008a). Se puede apreciar



en la Fig. 13, la diferencia en la conmutación entre PFM, Hard-PWM no resonante y Soft-PWM Cuasi-resonante. El área sombreada en la parte baja muestra las menores pérdidas de PFM y PWM, cuasi-resonante en comparación con las del PWM tradicional.

La reducción de pérdidas logra mayor eficiencia. En la Fig. 14, muestra la eficiencia de un inversor ZVS-PWM con respecto a la potencia (Sugimura, 2008b), en esta se obtiene mejor rendimiento en el caso de potencia superior a 1KW, a diferencia de la técnica PWM (Sugimura H., 2005). Otro modo de control utilizado es el PWM de ciclo de trabajo asíncrono (Lucia 2009a), que en algunos casos puede alcanzar rendimientos superiores hasta de un 25% con respecto a las otras técnicas.

Operación	PFM Potencia Variable Frecuencia Variable	PWM no Resonante Potencia Variable Frecuencia Constante	PWM Cuasi-Resonante Potencia Variable Frecuencia Constante
Potencia de Conmutación Señal de Voltaje	Resonante 	No-Resonante 	Cuasi-Resonante 
Señales de Voltaje, Corriente y pérdidas de conmutación	Commutación Suave 	Commutación Rápida 	Commutación Suave 

Fig. 13. Tipo I PFM, Tipo II PWM no resonante, Tipo III quasi-resonante (Wang, 1996b)

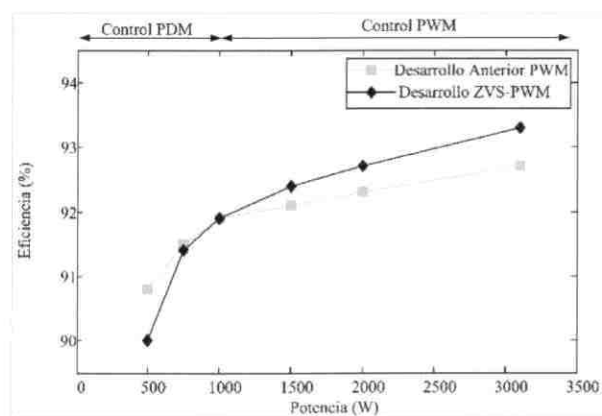


Fig. 14. Eficiencia-Potencia (Sugimura, 2008b)

#### 4.2.2. Control PFM (Pulse Frequency Modulation)

El comportamiento de los inversores resonantes está definido en gran parte por los cic-

los de trabajo de los interruptores de potencia que afectan el funcionamiento del circuito resonante RLC. Estos ciclos están definidos por la estrategia de modulación y la técnica de control (Lucia, 2009b). Cuando se hace uso de transistores para manipular el control de las cocinas de inducción, se utilizan para regular la cantidad de potencia aplicada a la carga (en este caso la bobina). Con este dispositivo, se logra que los transistores conmuten en un estado de "on" y "off" "encendido" o "apagado", a fin de obtener una Modulación por Frecuencia de Pulso (PFM). Con esta modulación, se regula la potencia aplicando pulsos de frecuencia variable, es decir, se varía el tiempo en trenes de pulsos. Esto se podría explicar de la siguiente manera: Si se proporcionan pocos pulsos al sistema, el voltaje medio que se aplicará sobre la carga (bobina) será bajo; por el contrario, la velocidad incrementara si el voltaje medio aumenta. Existen sencillos esquemas para la realización de PFM, incluso este esquema de control puede lograrse básicamente con un LM555 o hasta con un microprocesador que permita generar pulsos cuadrados (Grisales, 2013). Una de las grandes ventajas de trabajar con este tipo de modulación, es que alcanza una corriente de conmutación cero (ZCS) y la regulación de potencia en la frecuencia de conmutación constante.

#### 4.2.3. Control PDM (Pulse Density Modulation)

La regulación de la potencia con PDM se puede lograr variando el periodo en el que el inversor suministra corriente de alta frecuencia a la bobina de inducción. El poder suministrado a la bobina en pulsos de baja frecuencia, produce efectos de oscilación e impide el calentamiento óptimo del recipiente (Millán, 2007). Como menciona (Yonemori, 2008), el control PDM es uno de los métodos de control sobre la potencia efectiva de salida por la división de un cierto periodo constante T en el que se da la inyección de energía eléctrica en un tiempo TON y la ausencia de energía eléctrica en un tiempo TOFF. Esto se muestra en la Fig. 15.

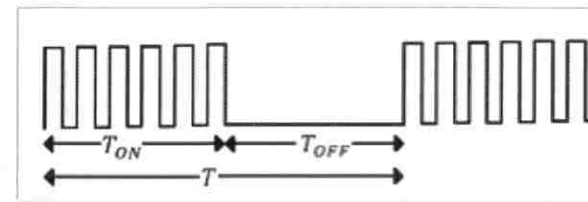


Fig. 15. Tiempo debajo del control PDMeT

A diferencia del modulador PWM, que asegura que el inversor funcione a una frecuencia de conmutación constante, el esquema es más complicado que los otros métodos referidos en este artículo. Otra ventaja es que alcanza el cero de conmutación de corriente (ZCS) y permite que la regulación de la potencia en la frecuencia de conmutación sea constante (Meng, 2011). Sin embargo, hay un modo de circulación libre durante la regulación de potencia, lo que induce pérdidas de conducción del inversor en este modo. Se propone la estrategia de control ZV SPDM mediante la realización de ZV S y la regulación de potencia en frecuencia de conmutación en (Park, 2007), en el que se elimina este modo de conducción libre; sin embargo, la operación de interrupción del inversor causa calentamiento de inferior eficiencia especialmente al transferir alta energía.

## 5. CONCLUSIONES

Con el estudio del estado del arte realizado, es posible destacar que hoy en día son utilizadas principalmente tres topologías de inversores resonantes para la aplicación de las cocinas de inducción. Dentro de estas topologías destacan la de interruptor simple, medio puente y puente completo, de estas se puede concluir que la de puente completo permite mayor eficiencia energética. Sin embargo, se prefiere una topología de medio puente en las cocinas comerciales pues ésta permite reducción de costos así como facilidad de construcción. En relación a la de interruptor simple toma este nombre debido a su bajo número de componentes, sin embargo su desventaja radica en que sus dispositivos deberán soportar altos niveles de tensión, por lo que su eficiencia es baja.

Otro aspecto tratado en esta investigación corresponde a los componentes pasivos en los inversores resonantes, donde unos de los más importantes es la bobina que genera el campo magnético y la eficiencia no solo depende de la resistencia del conductor sino también de geometría. Los estudios realizados permiten llegar a la conclusión que la bobina multi-fibra es la mejor opción para el uso comercial de las cocinas debido a que reduce la resistencia de conducción pues aprovecha de mejor manera el efecto skin.

Las técnicas de control utilizadas para variar la potencia entregada son el aspecto de mayor estudio en los artículos de investigación más recientes, donde la modulación PWM y PDM mantienen la frecuencia de conmutación, lo cual es de interés si se habla de convertidores resonantes, sin embargo la modulación PWM permite trabajar a potencias más altas y por su simplicidad la metodología de control PWM-ZVS es la más utilizada en la actualidad ya que mejora la eficiencia al disminuir las pérdidas de conmutación.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Proyecto Prometeo patrocinado por la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENES-CYT) y a Luis G. González, Ph.D. Investigador Prometeo, Universidad de los Andes, Departamentos de Electrónica y Telecomunicaciones por haber contribuido con el desarrollo de este artículo de investigación.

## REFERENCIAS

Acero J., Burdio J.-M., Barragan L.A, Puyal D., and Alonso R. 2005. Frequency-dependent resistance in Litz-wire planar windings for all-metal domestic induction heating appliances. In Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005. APEC 2005. Twentieth Annual IEEE, Vol. 2. 1294-1300 Vol. 2.

Acero J., Carretero C., Lucia O., Alonso R., and Burdio J.-M. 2013. Mutual Impedance of Small Ring-Type Coils for Multiwinding Induction Heating Appliances. Power Electronics, IEEE Transactions on 28, 2 (Feb 2013), 1025-1035.

Acero J., Carretero C., Millan I., Lucia O., Burdio J.-M., and Alonso R. 2010. Modeling of adaptable-diameter burners formed by concentric planar windings for domestic induction heating applications. In Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE. 92-97.

Ahmed T., Lee H.W., Nakaoka M., Sugimura H., Ahmed N. A. 2005. Utili-





by AC Frequency to High Frequency AC Power Conversion Circuit with Soft Switching PWM Strategy. *KIEE International Transactions on Electrical Machinery and Energy Conversion Systems* 5 (2005), 181–188.  
Andreyevsk Bill. 1999. Zero Voltage Switching Resonant Power Conversion. Application Note.

Arumugam S., Ramareddy S., and MelchiorPaulRaj C. 2012. Experimental studies on full bridge resonant inverter fed induction heating system. In *Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM)*, 2012 International Conference on. 32–38.

Beitz W. and Pahl G. 2007. *Engineering Design: A Systematic approach*, Third Edition. (2007).

Burdio J.M., Monterde F., Garcia J.R., Barragan L.A., and Martinez A. 2005. A two-output series-resonant inverter for induction-heating cooking appliances. *Power Electronics, IEEE Transactions on* 20, 4 (July 2005), 815–822.

Byun Jin-Kyu, Choi Kyung, Roh Hee-Suce, and Hahn Song-Yop. 2000. Optimal design procedure for a practical induction heating cooker. *Magnetics, IEEE Transactions on* 36, 4 (Jul 2000), 1390–1393.

Carretero C., Lucia O., Acero J., and Burdio J.M. 2013. Computational Modeling of Two Partly Coupled Coils Supplied by a Double Half-Bridge Resonant Inverter for Induction Heating Appliances. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 60, 8 (Aug 2013), 3092–3105.

Carretero C., Lucia O., Acero J., Burdio J.-M., and Alonso R. 2011. Passive network equivalent of an induction system for domestic cookers applications based on FEA tool simulation. In *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE. 1753–1758.

Cetin S., Sazak B.S., and Bodur H. 2009. A comparative study of dual half-bridge inverter topologies used in induction cooking. In *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, 2009. ECTI-CON 2009. 6th International Conference on, Vol. 01. 314–317.

Chan H.L., W E Cheng K., and Sutanto D. 1999. Bidirectional phase-shifted DC-DC converter. *Electronics Letters* 35, 7 (Apr 1999), 523–524.  
Chuang Ying-Chun. 2005. A novel power-factor-correction circuit with high-frequency resonant energy tank for DC-link inverter. In *Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*, 2005 IEEE. 10–16.

Chudjuarjeen S. and Koopai C. 2008. Asymmetrical control with phase lock loop for induction cooking appliances. In *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, 2008. ECTI-CON 2008. 5th International Conference on, Vol. 2. 1013–1016.

D. R. Luis. Introducción de control de Motores. [http://perso.wanadoo.es/luis\\_ju/soft/files/motores.pdf](http://perso.wanadoo.es/luis_ju/soft/files/motores.pdf)

Dede E.J., Jordan J., and Esteve V. 2004. State-of-the art and future trends in transistorised inverters for induction heating applications. In *Devices, Circuits and Systems*, 2004. Proceedings of the Fifth IEEE International Caracas Conference on, Vol. 1. 204–211.

Glas Espinel J. 2013. La matriz energética del Ecuador. Conferencia Espol (Octubre 2013).

Grisales L.T., Moncada M., y Escobar A. 2013. Electrónica de potencia para el calentamiento por inducción doméstico: revisión del estado del arte. *Ingeniería y Ciencia - ing.cienc.* 9, 18 (2013). <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/ingciencia/article/view/451>

Hernández P., Monterde F., Burdio J.-M., Garcia J.R., and Llorente S. 2002. Power losses distribution in the litz-wire winding of an inductor for an induction cooking appliance. In *IECON 02 (Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th Annual Conference of the)*, Vol. 2. 1134–1137 vol.2.  
Humphreys O.W. 1938. The design of domestic electric cookers. *Electrical Engineers, Journal of the Institution of* 82, 498 (January 1938), 565–582.

H.W. Koertzen, J.D. Van Wyk, and J.A. Ferreira. 1995. Design of the half-bridge, series resonant converter for induction cooking. In *Power Electronics Specialists Conference*, 1995. PESC '95 Record, 26th Annual IEEE, Vol. 2. 729–735 vol.2.

Lai R.-S. and Ngo K.D.T. 1994. A PWM method for reduction of switching loss in a full-bridge inverter. In *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 1994. APEC '94. Conference Proceedings 1994. Ninth Annual. 122–127 vol.1.

Lucia O., Burdio J.-M., Millan I., Acero J., and Llorente S. 2009a. Efficiency optimization of half-bridge series resonant inverter with asymmetrical duty cycle control for domestic induction heating. In *Power Electronics and Applications*, 2009. EPE '09. 13th European Conference on. 1–6.

Lucia O., Burdio J.-M., Millan I., Acero J., and Puyal D. 2009b. Load-Adaptive Control Algorithm of Half-Bridge Series Resonant Inverter for Domestic Induction Heating. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 56, 8 (Aug 2009), 3106–3116.

Meng L. C., Cheng K.W.E., and Chan Ka Wing. 2011. Systematic Approach to High-Power and Energy-Efficient Industrial Induction Cooker System: Circuit Design, Control Strategy, and Prototype Evaluation. *Power Electronics, IEEE Transactions on* 26, 12 (Dec 2011), 3754–3765.

Meng L. C., Cheng K.W.E., Chan K.W., and Lu Y. 2012. Variable turn pitch coils design for heating performance enhancement of commercial induction cooker. *Power Electronics, IET* 5, 1 (January 2012), 134–141.

Millan I., Puyal D., Burdio J.-M., Bernal C., and Acero J. 2007. Improved Performance of Half-Bridge Series Resonant Inverter for Induction Heating with Discontinuous Mode Control. In *Applied Power Electronics Conference, APEC 2007 - Twenty Second Annual IEEE*. 1293–1298. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/APEX.2007.357682>

Miyagi D., Saitou A., Takahashi N., Uchida N., and Ozaki K. 2006. Improvement of zone control induction heating equipment for high-speed processing of semiconductor devices. *Magnetics, IEEE Transactions on* 42, 2 (Feb 2006), 292–294.

Nishida T., Moiseev S., Hiraki E., and Nakaoka M. 2003. Duty cycle controlled soft commutation high frequency inverter for consumer induction cooker and steamer. In *Industrial Electronics Society, 2003. IECON '03. The 29th Annual Conference of the IEEE, Vol. 2*. 1846–1851 Vol.2. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/IECON.2003.1280341>

Ogura K., Gamage L., Ahmed T., Nakaoka M., Hirota I., Yamashita H., and Omori H. 2004. Performance evaluation of edge-resonant ZVS-PWM high-frequency inverter using trench-gate IGBTs for consumer induction cooking heater. *Electric Power Applications, IEE Proceedings - 151*, 5 (Sept. 2004), 563–568.

Onishi Y., Momota S., Kondo Y., Otsuki M., Kumagai, and Sakurai K. 1998. Analysis on device structures for next generation IGBT. In *Power Semiconductor Devices and ICs*, 1998. ISPSD 98. Proceedings of the 10th International Symposium on. 85–88.

Park Nam-Ju, Lee Dong-Yun, and Hyun Dong-Seok. 2007. A Power-Control Scheme with Constant Switching Frequency in Class-D Inverter for Induction-Heating Jar Application. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 54, 3 (June 2007), 1252–1260.

Sinha D., Sadhu P.K., Pal N., and Bandyopadhyay A. 2010. Computation of inductance and AC resistance of a twisted litz-wire for high frequency induction cooker. In *Industrial Electronics, Control Robotics (IECR)*, 2010 International Conference on. 85–90.

Sugimura H., Saha B., S. Sumiyoshi, H. Omori, Sang-Pil Mun, Soon-Kurl Kwon, E. Hiraki, and M. Nakaoka. 2008b. New Built-In Induction Heating Cooker Using High-Frequency ZVS-PWM Converter with Single Stage Circuit Topology. In *Industry Applications Society Annual Meeting, 2008. IAS '08. IEEE*. 1–6.

Sugimura H., Sang-Pil Mun, Soon-Kurl Kwon, Sumiyoshi S., Omori H., Hiraki E., and Nakaoka M. 2008a. A novel type single-stage ZVS-PWM high-frequency load resonant inverter with high performance PFC rectifier for consumer IH appliances. In *Electrical Machines and Systems*,

2008. *ICEMS 2008. International Conference on*. 1215–1221.

Viriya P., Sittichok S., and Matsuse K. 2002. Analysis of high-frequency induction cooker with variable frequency power control. In *Power Conversion Conference, 2002. PCC-Osaka 2002. Proceedings of the*, Vol. 3. 1502–1507 vol.3.

Waage S. A. 2007. *Re-considering Product Design: a Practical Journal of Cleaner Production*.

Wang S.P., Konishi Y., Nakaoka M., and Lin D. C. 1996a. A novel type high-frequency load-resonant inverter with ZVS-PWM scheme. In *Industrial Technology, 1996. (ICIT '96), Proceedings of The IEEE International Conference on*. 395–399.

Wang S.P., Konishi Y., Nakaoka M., and Lin D. C. 1996b. A novel type high-frequency load-resonant inverter with ZVS-PWM scheme. In *Industrial Technology, 1996. (ICIT '96), Proceedings of The IEEE International Conference on*. 395–399.

Industrial Technology, 1996. (ICIT '96), Proceedings of The IEEE International Conference on. 395–399.

Yasui K., Mihara M., Omori H., and Nakaoka M. 2007. Latest Developments of Soft-Switching Pulse Modulated High Frequency Conversion Systems for Consumer Induction Heating Power Appliances. In *Power Conversion Conference - Nagoya, 2007. PCC '07*. 1139–1146.

Yeon Jae-Eul, Park Min-Young, Cho Kyu-Min, and Kim Hee-Jun. 2013. A new high voltage shorted-anode IGBT with intrinsic body diode improves performance of single-ended induction cooker. In *Power Electronics and Applications (EPE)*, 2013 15th European Conference on. 1–9.

Yonemori H., Kobayashi M., and Suzuki K. 2008. Temperature control of a double-coil drive type IH cooker by means of the PDM control provided with audio noise suppression. In *Electronics, Circuits and Systems, 2008. ICECS 2008. 15th IEEE International Conference on*. 914–917.



## ARTICULISTAS INVITADOS



**UNIVERSIDAD DE CUENCA**  
Facultad de Ingeniería

## *Publicación de contaminantes atmosféricos de la estación de monitoreo de la EMOV-EP de Cuenca, utilizando servicios estándares OGC*

*Chester Andrew Sellers Walden*  
Instituto de Estudios de Régimen Seccional Del Ecuador  
Ciudad de Cuenca  
Universidad del Azuay  
Cuenca, Ecuador  
csellers@uazuay.edu.ec

*Claudia Viviana Espinoza Molina*  
Empresa Municipal de Movilidad Tránsito y Transporte de la  
Ciudad de Cuenca  
EMOV-EP  
Cuenca, Ecuador  
cespinoza@emov.gob.ec

### Abstract

Air pollution is a threat to human health and the environment itself. It requires taking action about prevention, control and mitigation of impacts. For this purpose, the Municipal Canton of Cuenca through the Municipal Transit Mobility and Transport deployed a continuous monitoring station of air pollutants. This monitoring station, however, has limitations related to the publication of the information captured which currently is published only in printed documents and lacking of web publication. The aim of this work is to develop a mechanism to manage and publish the recorded information with the continuous monitoring station of air pollutants aiding the local authorities, technical and civil society in general. This is done by generating an overall or general air quality index (IGCA in Spanish) and by publishing have been used the national standard, this is the Unified Text of Secondary Environmental Legislation (TULSMA in Spanish) and the international standard of the Environmental Protection Agency (EPA). For web publishing, it has been used the standard Sensor Observation Service (SOS) of the Open Geospatial Consortium (OGC). The results are presented as a platform for management, monitoring and publication of Cuenca city air pollutants (O<sub>3</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>). Besides presenting the overall air quality index and indexes for each recorded pollutant, it is also published statistical graphs showing the temporary behavior of pollutants. This platform has the potential to become a tool for environmental management and decision making contributing to the "buen vivir" (well being/living) of Cuenca.

**Keywords-** Atmospheric Contaminants, Sensor Observation Service, Sensor Enablement, Unified Text of the Secondary Environmental Legislation (TULSMA), Environmental Protection Agency (EPA)

### Resumen

La contaminación del aire ambiente es una constante amenaza para la salud humana y el ambiente, requiriendo la toma de decisiones respecto a la prevención, control y mitigación de sus impactos. Para tal fin el GAD Municipal del cantón Cuenca, y en particular la Empresa Municipal de Movilidad Tránsito y Transporte (EMOV-EP), dispone de una estación de monitoreo continuo de agentes contaminantes atmosféricos. Este sistema de monitoreo, sin embargo, presenta limitaciones relacionadas con la publicación de la información capturada, siendo actualmente publicada únicamente en medios impresos y almacenada sin publicación en la web. El objetivo de este trabajo es desarrollar un mecanismo para gestionar y publicar la información registrada en la estación de monitoreo continuo de agentes contaminantes atmosféricos para beneficio de autoridades locales, técnicos y la sociedad civil en general. Esto se realiza a través de la generación de un índice general de la calidad aire (IGCA) y la publicación de dicha información en la web por medios que sean de fácil acceso y comprensión para la sociedad en común. Para el IGCA se utiliza la normativa nacional Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria (TULSMA) y la normativa internacional proporcionada por Environmental Protection



Agency (EPA). Para la publicación web se utiliza el servicio estándar Sensor Observation Service (SOS) del Open Geospatial Consortium (OGC). Los resultados se presentan como una plataforma base para la gestión, monitoreo y publicación de los contaminantes atmosféricos de la ciudad (O<sub>3</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>). Además de presentar un índice general de calidad del aire (IGCA) e índices por contaminante registrado, también se publican gráficas estadísticas del comportamiento temporal de las variables contaminantes. Esta plataforma presenta el potencial de convertirse en una verdadera herramienta para la gestión ambiental y la toma de decisiones que contribuya con el buen vivir de los Cuencanos.

**Palabras Clave** — Contaminantes Atmosféricos, Sensor Observation Service, Sensor Web Enablement, Texto Unificado de la Legislación Ambiental Secundaria (TULSMA), Agencia de Protección Ambiental (EPA).

## INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica y la alteración de su equilibrio es una constante amenaza para la salud humana y el ambiente per se. El monitoreo ambiental demuestra relaciones de respuestas cada vez más rápidas entre el estado de la calidad del aire y la calidad de salud y vida [1]. Las afecciones que se presentan sobre varios sistemas vitales de los seres humanos y ecosistemas expuestos a una constante contaminación del aire, tienen un costo psicológico y económico que estamos asumiendo las sociedades y que tiene un constante y notable incremento en nuestro país y especialmente en Cuenca, reporte de la Alcaldía de Cuenca. 2012. Red de Monitoreo EMOV EP. Informe de la calidad del aire, año 2011.

Esta realidad genera la necesidad de tomar decisiones urgentes para la prevención, control y mitigación de los impactos de la contaminación. Razón por la cual somos testigos de la implementación y despliegue de redes de sensores que miden el estado del entorno en el que vivimos. Estos sensores aportan grandes volúmenes de datos en formatos, escalas y unidades de medida diferentes. Los sensores observan información de diversa índole y naturaleza relacionada con actividades humanas como el transporte y

emisiones industriales o con fenómenos naturales como radiación solar y vulcanismo, entre otros [1], [2].

En Cuenca, se monitorea la calidad del aire mediante sensores pasivos desde el año 2005. La Empresa Municipal de Movilidad Transito y Transporte de la ciudad de Cuenca (EMOV-EP) dispone de una estación de monitoreo continuo en tiempo real con sensores dedicados a medir agentes contaminantes atmosféricos. La estación está equipada para registrar, a intervalos de 1 segundo, varios elementos contaminantes atmosféricos. Entre estos constan cinco elementos principales aportantes a la contaminación atmosférica: Ozono (O<sub>3</sub>), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y Material Particulado 2,5um (PM<sub>2.5</sub>). Sin embargo, a pesar de disponer de este sistema de monitoreo, se han detectado dos limitaciones que afectan la posibilidad de realizar análisis temporal e interpretar el comportamiento de estos contaminantes. La primera es que los principales contaminantes atmosféricos no se analizan para obtener un índice general de calidad del aire de la ciudad. La segunda limitación se relaciona con la gestión de esta información. Por un lado, se almacena en un repositorio de datos CSV y XLSX, es decir en archivos de tipo texto. Por otro lado, la información ha sido publicada únicamente en medios impresos pero no en medios digitales. Un trabajo relacionado en este aspecto es el de la Red de Monitoreo Ambiental de la ciudad de Cuenca [3], pero el mismo realiza el diseño lógico del sistema sin llegar a su implementación así como tampoco basa el sistema en el servicio estándar de sensores.

Este trabajo desarrolla un mecanismo para gestionar y publicar la información registrada en la estación de monitoreo continuo de agentes contaminantes atmosféricos para beneficio de autoridades locales, técnicos y la sociedad civil en general. Esto se realiza a través la generación de un índice general de la calidad aire (IGCA) y la publicación de dicha información en la web por medios que sean de fácil acceso, fácil comprensión y de provecho para la sociedad. Para la generación del IGCA se utiliza la normativa nacional Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria [4] y la normativa internacional proporcionada por Environmental Protection Agency (EPA) [5]. Para la publicación de la información se utiliza

el servicio estándar Sensor Observation Service (SOS) del Open Geospatial Consortium (OGC) que proporciona acceso estructurado y estándar a la información registrada por sensores [6].

El ámbito de aplicación de este trabajo se localiza en la ciudad de Cuenca, cantón del mismo nombre, provincia del Azuay. La capital cuencana se caracteriza por estar localizada en un valle de origen glacial con una cota (altura) promedio de 2550 msnm, presenta una morfología irregular y compleja característica de los valles interandinos, tiene una temperatura promedio de 16.1 grados Celsius y una presión barométrica local promedio de 751.895 mmHg.

La ciudad cuenta con una estación automática de monitoreo en tiempo real de contaminantes atmosféricos (Tabla 1), estación cuyo rango efectivo de cobertura es de 4 km de radio, es decir que abarca la mayor parte de ciudad (hacia el Norte limitando con Pumayunga, parroquia Sinincay, al Sur Virgen de la Nube, Parroquia Turi, al Este con el límite parroquial de San Joaquín y al Oeste con la intersección de la Panamericana Norte y la Avenida Gonzales Suarez) (Figura 1). La estación se encuentra localizada en los altos del edificio de la EMOV-EP con las siguientes coordenadas 721895.66 E, 9679548.85 N, y utiliza el acrónimo MUN.

Tabla 1.- Elementos monitoreados estación tiempo real

Contaminante	Símbolo
Material Particulado 2,5 um	PM <sub>2.5</sub>
Dióxido de Nitrógeno	NO <sub>2</sub>
Dióxido de Azufre	SO <sub>2</sub>
Monóxido de Carbono	CO
Ozono	O <sub>3</sub>

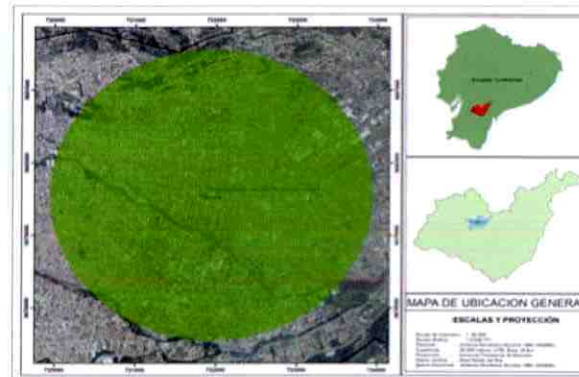


Figura 1.- Alcance nominal estación "MUN"

## MÉTODOS

Primero se describe la obtención del índice de calidad del aire (ICA), del índice general de calidad del aire (IGCA), y luego la implementación de los mecanismos de publicación.

### ÍNDICE CALIDAD DEL AIRE (ICA)

El cálculo del índice de calidad del aire (ICA) para un tipo de contaminante dado se basa en el valor promedio generado en el periodo de tiempo consultado del contaminante (Ecuación 1) (EPA - Environmental Protection Agency, 1999).

ICA = Índice de calidad del aire.

C<sub>p</sub> = Concentración promedio observada y corregida.

BPHi = Punto de ruptura mayor o igual a C<sub>p</sub>

BPLo = Punto de ruptura menor o igual a C<sub>p</sub>

IHi = Valor del ICA correspondiente a BPHi

ILo = Valor del ICA correspondiente a BPLo

La concentración promedio observada (C<sub>p</sub>) se obtiene en dos pasos. Primero, se calcula el promedio de las mediciones (C<sub>o</sub>) en un rango de tiempo. Sin embargo, previo a esto, deben realizarse varios pasos tendientes a homogenizar las unidades de los datos capturados por los sensores a partes por millón (ppm), con la excepción del material particulado de 2.5um que se mantiene en microgramos por metro cubico (ug/m<sup>3</sup>). También, deben eliminarse los registros pertenecientes a la calibración de sensores y registros erróneos debido a fallas eléctricas u otros fallos registrados que pueden afectar la valoración de cada contaminante o del índice general de calidad del aire. Finalmente, los valores se redondean a tres decimales. Segundo, el valor promedio (C<sub>o</sub>) debe ser corregido según las condiciones locales [4]. Esta corrección resulta de tomar en cuenta la temperatura (t) y presión barométrica (P<sub>bl</sub>) del lugar y momento en que se tomaron las observaciones (Ecuación 2). Se obtiene un valor de corrección, el cual se debe multiplicar por los valores registrados de cada contaminante, para así obtener la concentración promedio observada y corregida (C<sub>p</sub>). Seguido, para un periodo de tiempo dado se obtiene el promedio, mínimo y máximo registrados para la concentración corregida por contaminante (C<sub>p</sub>).



$$C_p = C_o * \frac{760 \text{ mm Hg}}{P_{bl} \text{ mmHg}} * \frac{(273 + t)^\circ K}{298 K}$$

Cp = Concentración Corregida  
Co = Concentración Observada  
Pbl = Presión Barométrica Local  
t = Temperatura

Los valores BPHi, BPLo, IHi, ILo se obtienen tal como se muestra en la tabla 2. La tabla 2 fusiona tablas de referencia de EPA para evaluar la concentración de los contaminantes y establecer los índices. La fusión de tablas se realizó para facilitar tanto el ingreso como la consulta de estos parámetros en la base de datos. Esta tabla está conformada principalmente por tres tipos de columnas, la primera columna de nombre ICA, representa los rangos de valores de 0 a 500 de los índices posibles según los parámetros establecidos por EPA; una columna de nombre COLOR que representa la codificación en formato de colores asociada al rango de valores posibles de índices; y las restantes columnas que representan el contaminante, su unidad de medida en ppb y ppm con las concentraciones mínimas y máximas para cada rango de valores índices ICA, es decir los puntos de ruptura mínimo y máximo.

Tabla 2. - Clasificación rango de valores contaminantes EPA. Fuente [13].

ICA	COLOR	O3 8h ppb	O3 8h ppm	PM2.5 24h ug/m3	PM2.5 1h ug/m3	CO 8h ppm	SO2 24h ppb	SO2 24h ppm	NO2 1h ppb	NO2 1h ppm
0 - 50	Verde	0,000	3,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
51 - 100	Amarillo	59,000	0,059	54,000	15,400	4,400	34,000	0,034	0,000	0,000
101 - 150	Naranja	60,000	0,060	55,000	15,500	4,500	35,000	0,035	0,000	0,000
151 - 200	Rojizo	75,000	0,075	154,000	40,400	9,400	144,000	0,144	0,000	0,000
201 - 250	Rosado	76,000	0,076	155,000	40,500	9,500	145,000	0,145	0,000	0,000
251 - 300	Púrpura	95,000	0,095	254,000	65,400	12,400	234,000	0,224	0,000	0,000
301 - 350	Rojo	95,000	0,095	255,000	65,500	12,500	235,000	0,225	0,000	0,000
351 - 400	Naranja	115,000	0,115	354,000	150,400	15,400	304,000	0,304	0,000	0,000
401 - 450	Rosado	116,000	0,116	355,000	150,500	15,500	305,000	0,305	0,000	0,000
451 - 500	Púrpura	374,000	0,374	424,000	250,400	30,400	604,000	0,604	124,000	1,240
				425,000	250,500	30,500	605,000	0,605	125,000	1,250
				604,000	500,400	50,400	1004,000	1,004	204,000	2,040

A continuación se muestra un ejemplo de aplicación de la ecuación 1. Considere el valor promedio observado y corregido (Cp) de ozono 0.030 ppm registrado en un período de tiempo determinado. En la tabla 2 se localiza la columna que representa el contaminante ozono ("O3- 8h ppm"). Se busca el rango en el que se encuentra el valor citado, para este caso (BPHi = 0.059, BPLo = 0.000). Se verifica que cae en el rango de la zona de color verde que corresponde a ICA (IHi = 50, ILo = 0), valores que se reemplazan en la ecuación 1.

$$ICA_{O3} = IHi - ILo BPHi - BPLo * Cp PLo + ILo$$

$$ICA_{O3} = 50 - 00.059 - 0.000 * 0.030 - 0.000 + 0$$

$$ICA_{O3} = 50 - 0.059 * 0.030$$

$$ICA_{O3} = 25.42$$

El valor obtenido 25.42 recae en el rango de 0 a 50 correspondiente al color verde, indicando que la calidad del aire para ozono es BUENA y no existen restricciones para ningún grupo ni actividad al aire libre (Tabla 3).

**ÍNDICE GENERAL DE CALIDAD DEL AIRE (IGCA)**

El procedimiento anterior se aplica de igual forma a todos los contaminantes atmosféricos (CO, NO2, SO2, O3, PM2.5) que son registrados por la estación MUN. Luego, para la determinación del índice de calidad general del aire (IGCA) se procede a evaluar qué elemento contaminante presenta el mayor valor índice (máximo color) y se asume a éste como el índice general de calidad del aire que representa a todos los elementos registrados. En otras palabras el índice máximo de todos los elementos determinará el índice general de calidad del aire registrado en la estación.

Según el grado de contaminación ICA se presenta una codificación por colores (Tabla 3), donde cada color corresponde a un rango de valores y peligrosidad de las condiciones de contaminación presentes al momento de la observación. Estos rangos codificados tienen asociados un aviso de las implicaciones generales a la salud, si los hubiere, en caso de exposición (Tabla 4).

Tabla 3.- Codificación rangos ICA. Fuente: [14].

Valores Indices de Calidad del Aire (ICA)	Niveles de cuidado para la salud	Colores
Cuando el ICA se encuentra en este rango:	Las condiciones son:	Simbolizado con el color
0 - 50	Óptimo	Verde
51 - 100	Modificado	Amarillo
101 - 150	Desfavorable para grupos sensibles	Naranja
151 - 200	Desfavorable	Rojizo
201 - 300	Muy Desfavorable	Púrpura
301 - 500	Peligroso	Marrón

Tabla 4.- Consideraciones para la salud en relación al IGCA. Fuente: [14].

Índice de Calidad del Aire General	Las condiciones de salud
51 - 100	Modificado Personas especialmente sensibles deberían considerar limitar su exposición.
101 - 150	Desfavorable para grupos sensibles Personas con problemas pulmonares, respiratorios, alergias y otros problemas deberían considerar limitar su exposición.
151 - 200	Desfavorable Personas con problemas pulmonares, respiratorios, alergias y otros problemas deberían considerar limitar su exposición.
201 - 300	Muy Desfavorable Personas con problemas pulmonares, respiratorios, alergias y otros problemas deberían considerar limitar su exposición.
301 - 500	Peligroso Todos los grupos deben limitar su exposición al ambiente.

**SENSOR OBSERVATION SERVICE (SOS)**

Sensor Web Enablement (SWE) es un grupo de especificaciones del OGC de interfaces y codificaciones que permiten la integración e interoperabilidad en tiempo real de redes de sensores heterogéneas. Estas especificaciones son útiles para acceder y distribuir de una forma estandarizada datos de sensores que son útiles para la creación de aplicaciones, plataformas y productos relacionados inundaciones, monitoreo de contaminación móviles, webcams y robots, así como sensores remotos de captura de imágenes sean estos sensores remotos satelitales o aéreos [7] [2] [8].

El Servicio de Observación de Sensores (SOS) es uno de los servicios web de SWE para consultar los datos de sensores en tiempo real y series temporales de datos. Los datos de los sensores ofrecidos son codificados en XML y comprenden descripciones de los propios sensores, es decir metadatos, que son codificados en el Lenguaje de Modelado de Sensores (SensorML) [9] mientras que los valores observados son codificados según la especificación de Observaciones y Mediciones (O&M) [10]. El servicio web, así como el esquema de las observaciones, son estándares abiertos definidos. Más en concreto, la implementación del servicio de SOS permite [7].

- Descubrir sistemas de los sensores, observaciones y procesos de observación.
- Determinar las capacidades del sensor y la calidad de las mediciones.
- Acceder a los parámetros del sensor que automáticamente permiten a software procesar y geo-localizar las observaciones.
- Recuperar en tiempo real las observaciones de series de datos y coberturas en la codificación estándar.
- Acceder a las observaciones de interés.
- Proporcionar notificaciones de los sensores o de los servicios de sensores basados en criterios especificados por el usuario.

La figura 2 muestra el diagrama UML básico para poder registrar los datos de los sensores en conformidad con la especificación SOS ([7] [11] [12]). Esta estructura es fundamental para ser implementada en el esquema de la base de datos.

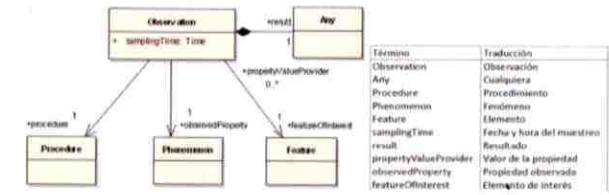


Figura 2.- Esquema UML general de la base de datos en conformidad con la especificación SOS. Fuente: [11]

**IMPLEMENTACIÓN**

La implementación se llevó a cabo siguiendo 5 etapas:

**ETAPA I. CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE LOS DATOS REGISTRADOS POR LA ESTACIÓN MUN.**

La captura de datos de los sensores de la estación es cada segundo y se transmiten a un servidor local cada minuto. Los datos se almacenan en formato CSV y XLSX, registrándose el tipo de elemento observado, el intervalo de la captura de la observación, la hora y fecha de la observación, un valor redondeado y el valor crudo observado por el sensor. Los datos almacenados se encuentran en formato RAW, esto significa que las magnitudes y unidades son propias de cada elemento registrado (Tabla 5). Esta información será posteriormente tratada y procesada en la etapa III para el cálculo del ICA e IGCA. Estos archivos son almacenados en un repositorio que se encuentra en las oficinas centrales de la EMOV-EP.

Tabla 5.- Elementos y unidad de medida registrados

Contaminante	Símbolo	Datalogger	Unidad
Material Particulado 2,5 um	PM2.5	ug/m <sup>3</sup>	Microgramos por metro cubico
Dióxido de Nitrógeno	NO2	ppb	Partes por Billón
Dióxido de Azufre	SO2	ppb	Partes por Billón
Monóxido de Carbono	CO	ppm	Partes por Millón
Ozono	O3	ppb	Partes por Billón

**ETAPA II. BASE DE DATOS E INSERCIÓN DE REGISTROS**

Se creó en PostGIS el esquema de tablas y relaciones necesarias para el registro apropiado de los datos provenientes de la estación de monitoreo, en base a los requerimientos a las especificaciones de SOS establecido por OGC. El esquema completo de las tablas puede ser consultado en [12].



Con la base de datos creada, se insertaron los registros históricos de la estación de monitoreo MUN comprendidos en el periodo enero del 2013 hasta mayo del 2013. La figura 3.a muestra un fragmento de código SQL para la inserción de un registro histórico. La figura 3.b explica la estructura y los parámetros SQL utilizados en el código de inserción de registros de contaminantes. La figura 3.c presenta los parámetros básicos que son necesarios para cumplir con la especificación SOS, por ejemplo el tipo de contaminante, sus descripciones, códigos, sensores, los valores registrados, el día, hora, minuto y segundo de la observación.

Capa de publicación: El cliente web SOS ha sido implementado con el cliente OpenLayers, también de código abierto. Una explicación detallada de la instalación y funcionamiento de estos servicios se puede encontrar en: (52°North, n.d.-b).

**ETAPA V. PRUEBAS DE FIABILIDAD Y FUNCIONAMIENTO.**

Antes de proceder a la publicación web, se realizaron pruebas de funcionamiento para mejorar la interacción del usuario con la interface web. Además se realizaron pruebas de tiempos de descarga de datos provenientes del servidor central de la EMOV-EP y de tiempo de respuesta de la base de datos en periodos de consulta extensos, cuyos resultados son presentados en la siguiente sección.

**RESULTADOS**

Los resultados se presentan como una plataforma base para la gestión, monitoreo y publicación de los contaminantes atmosféricos de la ciudad. Además de presentar un índice general de calidad del aire (IGCA) e índices por contaminante registrado, también se publican gráficas estadísticas del comportamiento temporal de las variables contaminantes. Los resultados son accesibles en la siguiente dirección web: <http://gis.uazuay.edu.ec/OpenLayers-2.12/sos/>.

La figura 4 muestra el cliente web. En la parte superior del cliente se encuentran los botones de consulta de los cinco contaminantes monitoreados y del índice general de calidad ambiental IGCA. Pulsando sobre los iconos de los contaminantes se observa el último valor registrado en la base de datos. Debajo, se observa el mapa de la ciudad de Cuenca con la localización de la estación de monitoreo y su área potencial de 4 km. Al pie y a la derecha de la imagen, se muestran gráficos estadísticos que ayudan a una mejor comprensión de las concentraciones de los contaminantes.



Figura 4.- Plataforma base de monitoreo

Figura 3. Inserción de registros históricos en base de datos: a) Código para SQL; b) Descripción parámetros INSERT; c) Parámetros SQL INSERT

**ETAPA III. CÁLCULO DEL ÍNDICE GENERAL DE CALIDAD DEL AIRE**

El procesamiento y cálculo del índice de calidad del aire por elemento contaminante y del índice general de calidad del aire se realizó de acuerdo a lo expuesto en la sección de métodos. Este cálculo se realiza a nivel de base de datos.

**ETAPA IV. IMPLEMENTACIÓN DE SERVICIO SOS Y CLIENTE WEB.**

En esta etapa se plantea la publicación web del índice de calidad del aire, que a este punto se encuentran calculado a nivel de base de datos. La arquitectura de los servicios implementados se basa en tres capas:

Capa de recursos: Los datos crudos han sido almacenados en la base de datos PostGIS descrito en la etapa II. Los datos procesados para el cálculo del IGCA ha sido descrito en la etapa III.

Capa de servicios: El servicio SOS ha sido implementado utilizando el siguiente software open source: Apache, Apache Ant, Eclipse y North52 SOS.

En función del valor IGCA obtenido y según su rango y color, se puede examinar el significado del índice en la tabla de comparaciones. Esta codificación de colores se asociada a un mensaje de alerta indicando las implicaciones a la salud del índice consultado, es decir los grupos sensibles y las precauciones que se debe tomar (Figura 5).



Figura 5. Consulta sobre implicaciones para la salud

Se presentan también gráficos estadísticos del comportamiento diario de los contaminantes (Figura 6.a) y el comportamiento mensual de estos (Figura 6.b).

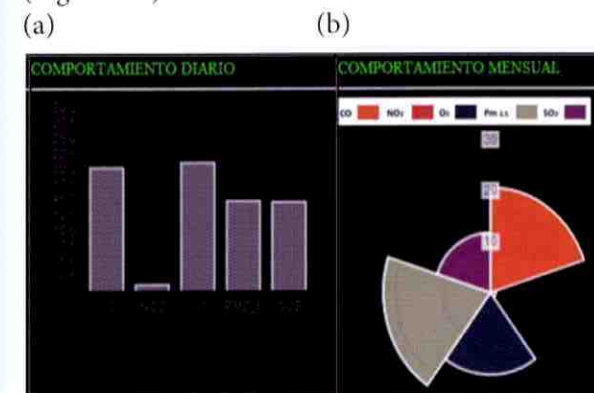


Figura 6. Gráfico estadístico comportamiento de contaminantes. (a) diario y (b) mensual

El cliente permite consultar observaciones entre rangos de fechas. Así se personalizan los reportes de acuerdo a las necesidades, pudiendo hacer consulta de registros históricos para establecer las condiciones registradas en un periodo de tiempo pasado. La figura 7.a muestra una gráfica estadística sobre comportamiento de la variable contaminante en un periodo de tiempo consultado. Esta gráfica, a su vez, se asocia a otras dos tablas de datos que muestran las estadísticas de los valores consultados (máximo, mínimo, promedio y número de mediciones) y los datos o valores individuales de cada medición en el periodo de tiempo consultado (Figura 7.b).



Figura 7. Consulta de observaciones en un rango de tiempo dado. (a) Gráfica de comportamiento O3 y (b) Estadística y datos consultados O3.

**PRUEBAS DE FIABILIDAD**

Las pruebas de tiempo de descargas vía FTP con el servidor de la EMOV-EP, proporcionaron resultados de tasa de transferencia promedio de 1.15 minutos, que no representan una alta carga transaccional por lo que este tipo de comunicación para la réplica de datos no es un factor relevante para el sistema, ya que presenta la seguridad del caso y los datos se pueden acceder cada hora, con lo que la publicación de los índices se ajusta a las disponibilidad del servidor remoto que en este caso sería de cada hora. A mayor disponibilidad de descarga de datos, mayor será la cadencia de presentación de los índices de contaminación atmosférica en el cliente.

Para las pruebas de tiempo de respuesta y rendimiento se realizaron consultas entre rangos de fechas que involucren un gran volumen de datos a ser consultados y presentados tanto en la base de datos como en el cliente implementado. Se consultó el contaminante OZONO, entre el 7 de mayo 2013 y el 25 de mayo 2013, obteniéndose un total de 26382 registros. El tiempo estimado de respuesta de la base de datos fue de 0.0713 milisegundos, mientras que en el cliente de 1.5 segundos. Considerando la cantidad de registros obtenidos de la consulta, los tiempos de respuesta obtenidos están en rangos aceptables de rendimiento tanto para la base de datos como para el cliente SOS implementado. La gran cantidad de registros en el periodo seleccionado es debido a que se están registrando y visualizando los datos según como fueron ingresados por la estación de monitoreo, esto es cada segundo.

**DISCUSIÓN**

En la implementación se ha trabajado exclusivamente con datos históricos. Para los datos en tiempo real se planea implementar un canal de comunicaciones FTP, para capturar y replicar los datos en el servidor local de la Universidad del Azuay. Esta conexión para el consumo de datos en tiempo real será iterativa, automática y de acuerdo a la disponibilidad de servicio del servidor remoto. Los datos registrados serán ingresados vía SQL en la base de datos PostGIS ya instalada en el servidor de la Universidad del Azuay para su posterior procesamiento. En cuanto al enlace de datos vía FTP, si bien no es la forma más eficiente para la



adquisición de datos, proporciona la seguridad y cadencia de respuesta suficiente para poder asegurar la transmisión correcta de los datos. En desarrollos futuros se prevé establecer un enlace directo de fibra óptica.

La base de datos implementada soporta la estructura estandarizada de SOS con la capacidad de registrar nuevos sensores, descripciones de los sensores, localización de los sensores y demás información necesaria para el manejo del sistema de gestión de contaminantes atmosféricos. La información contenida en la base de datos se encuentra normalizada, esto es en las mismas unidades de medida y corregidas con los parámetros locales de temperatura y presión barométrica.

Se utilizó software open source para la base de datos, servicio SOS y cliente ligero SOS. Esto permite evitar costos de licenciamiento además de poder personalizar el cliente, y adaptarlo mejor a las prestaciones buscadas en la implementación. Otra consideración de vital importancia es que los servicios y el cliente implementado cumplan con todas las especificaciones establecidas por OGC y SWE para el manejo e incorporación de sensores y la información generada por estos sensores. Finalmente, también se buscó presentar los datos de forma intuitiva y amigable para el usuario.

El cliente web se implementó con OpenLayers SOS. Se optó por este cliente ya que es personalizable y se puede manipular el código fuente para presentar los datos, gráficos y reportes de forma que se ajuste a las necesidades. Adicionalmente es de fácil implementación. Otros clientes que se revisaron no presentaban un nivel personalización deseable en un sistema de estas características. Adicionalmente, se prevé en el futuro complementar el cliente web con un manual de usuario para facilitar su uso por parte del público en general.

## CONCLUSIONES

El presente trabajo ha permitido que tanto la ciudadanía como el personal técnico y científico especializado de la EMOV-EP dispongan de una herramienta para la gestión, monitoreo y publicación de la calidad ambiental de la ciudad de Cuenca, en donde cada persona sin importar

su nivel de conocimientos, puede acceder a los reportes de los contaminantes atmosféricos de la estación de monitoreo continuo. La interface es fácil de usar y la información se encuentra en formato de índices que son de fácil comprensión e intuitivos. Esta plataforma sirve de base para futuros desarrollos que mejoren su interface, extiendan las herramientas de gestión de la información, y aumenten las variables a ser monitoreadas como por ejemplo: temperatura, radiación solar, presión barométrica, precipitación, radiación ultravioleta, ruido, índices de tráfico etc. e inclusive observaciones proporcionadas por los mismos ciudadanos a partir de estaciones meteorológicas hogareñas o dispositivos móviles (información geográfica voluntaria). Esta plataforma presenta el potencial de convertirse en una verdadera herramienta para la gestión ambiental y la toma de decisiones que aseguren el buen vivir de los Cuencanos.

## AGRADECIMIENTOS

La Universidad del Azuay y el autor de este artículo, agradecemos a la EMOV-EP, en la persona de la funcionaria Ing. Claudia Espinoza, por la apertura y predisposición para facilitar el acceso a la información que ha sido utilizada para el análisis de carácter académico.

## REFERENCIAS:

- [1] B. Brunekreef and S. T. Holgate, "Air pollution and health," *Lancet*, vol. 360, no. 9341, pp. 1233-42, Oct. 2002.
- [2] G. Percivall, C. Reed, and J. Davidson, "Open Geospatial Consortium Inc . OGC White Paper OGC \* Sensor Web Enablement : Overview And High Level Architecture .," no. December, pp. 1-14, 2007.
- [3] A. Espinoza Molina, "Diseño de un sistema de información geográfica para la Red de Monitoreo Ambiental de la ciudad de Cuenca. Quito, 2011. Retrieved from <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/2042/1/104351.pdf>," 2011.
- [4] TULSMA. Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio de Ambiente. Retrieved from : [http://www.quitoambiente.gob.ec/index.php?option=com\\_k2&view=item&id=125%3Atexto-unificado-de-legislacion%C3%B3n-ambiental-secundaria-del-ministerio-de-ambiente-tulas&lang=es](http://www.quitoambiente.gob.ec/index.php?option=com_k2&view=item&id=125%3Atexto-unificado-de-legislacion%C3%B3n-ambiental-secundaria-del-ministerio-de-ambiente-tulas&lang=es)
- [5] EPA - Environmental Protection Agency. 2009. A Guide to Air Quality and Your Health. Retrieved from [http://www.epa.gov/airnow/aqi\\_brochure\\_08-09.pdf](http://www.epa.gov/airnow/aqi_brochure_08-09.pdf).
- [6] Bröring, A, Stasch, C., & Echterhoff, J. 2012. OGC Sensor Observation Service Interface Standard. Retrieved from <http://www.opengeospatial.org/standards/sos>.

[7] Bröring, A, Echterhoff, J, Jirka, S., Simonis, I., Everding, T., Stasch, C., Liang, S., et al. 2011. New generation sensor web enablement. *Sensors*, 11(3), 2652-2699.

[8] Rueda, C., & Gertz, M. 2008. Real-Time Integration of Geospatial Raster and Point Data Streams. *Scientific and Statistical Database Management*, 0619139, 605-611.

[9] Botts, M., & Robin, A. 2007. OpenGIS Sensor Model Language (SensorML) Implementation Specification. Retrieved from <http://www.opengeospatial.org/standards/sensorml>.

[10] Cox, S. 2011. OGC Observations and Measurements - XML Implementation. Retrieved from <http://www.opengeospatial.org/standards/om>.

[11] 52°North. -a. SOS data model and data base implementation. Retrieved from <https://wiki.52north.org/bin/view/SensorWeb/SosDataModeling>.

[12] 52°North. -b. Sensor Observation Service - implementation. Retrieved b from <http://52north.org/communities/sensorweb/sos/index.html>.

[13] EPA - Environmental Protection Agency. 1999. Air Quality Index Reporting; Final Rule - Part 3. Retrieved from [http://www.epa.gov/ttn/oarpg/t1/fr\\_notices/airqual.pdf](http://www.epa.gov/ttn/oarpg/t1/fr_notices/airqual.pdf).

[14] EPA - Environmental Protection Agency. 2009. A Guide to Air Quality and Your Health. Retrieved from [http://www.epa.gov/airnow/aqi\\_brochure\\_08-09.pdf](http://www.epa.gov/airnow/aqi_brochure_08-09.pdf).



# Estudio de comportamiento hidráulico de Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial

Josue Bernardo Larriva Vásquez  
Gerencia de Agua Potable  
ETAPA EP  
Cuenca, Ecuador  
jlarriva@etapa.net.ec

## Abstract

Prior to the evaluation of the efficiency of a reactor for treating waste water is necessary to characterize hydraulically in order to evaluate its operation. Several authors have formulated fluid dynamic models to show the operation of natural ponds or constructed wetlands is important to characterize a type of reactor before evaluating the applicability of a technology to particular conditions of a given region.

This work was performed as part of the treatability study of rural water communities of Cuenca, Ecuador, using Artificial Wetlands subsurface flow, and evaluates the hydraulic performance of these by expressions known of the theory reactor doing tracer tests, in order to characterize the operation of the reactor according to the type of flow.

**Keywords**— Wetlands, flow models, series tank model.

## Resumen

Previo a la evaluación de la eficiencia de un reactor para el tratamiento de aguas residuales, es necesario poder caracterizarlo, desde el punto de vista hidráulico con el fin de poder valorar su funcionamiento. Si bien, varios autores han formulado modelos fluido dinámicos para mostrar el funcionamiento de tecnologías naturales, como lagunas o pantanos artificiales, siempre es importante poder caracterizar un tipo de reactor antes de evaluar la aplicabilidad de una tecnología a condiciones particulares de una determinada región.

El presente trabajo se realiza como parte del estudio de tratabilidad de aguas residuales rurales de las comunidades de Cuenca, Ecuador, mediante el uso de Humedales Artificiales de flujo sub-superficial, y evalúa el funcionamiento hidráulico de los mismos mediante la aplicación de expresiones

conocidas en la teoría de reactores y la realización de pruebas de trazadores, con el fin de caracterizar el funcionamiento de los reactores de acuerdo al tipo de flujo que se produce en los mismos.

**Palabras Clave** — Humedales, modelos de flujo, tanques en serie.

## I. INTRODUCCIÓN

Los tratamientos llamados no convencionales o tecnologías blandas se muestran como una alternativa para el tratamiento de las aguas residuales para comunidades pequeñas o sistemas rurales, ya que no son costosos ni requieren altos consumos energéticos, además la operación y mantenimiento de estos, no requieren de personal especializado ni procesos complicados.

A nivel mundial, se ha extendido cada vez más el uso de los Humedales Artificiales o Wetlands, los cuales funcionan a partir de los mecanismos propios que usa la naturaleza para la depuración de las aguas residuales, donde se combinan procesos físicos, químicos y biológicos entre el suelo, las plantas, los microorganismos y la atmósfera, dando lugar a la ocurrencia de procesos de sedimentación, filtración, absorción, degradación biológica, fotosíntesis, fotooxidación y toma de nutrientes por parte de la vegetación mediante el metabolismo.

Existen 2 tipos de humedales artificiales, de acuerdo al tipo de flujo: Los de flujo superficial, en los que el agua fluye expuesta a la atmósfera, y los conocidos como de flujo subsuperficial, en el que el agua fluye a través de un material de soporte, generalmente grava; se observa, entonces, que la circulación del agua a través del suelo o material de soporte parece ser siempre más efectiva que la circulación de superficie, para muchos de los mecanismos de degradación de los contaminantes presentes en las aguas residuales.

Estudios publicados demuestran la capacidad de los humedales de flujo horizontal sub-superficial para remover cantidades significativas de materia orgánica, nitrógeno, fósforo, sólidos suspendidos, bacterias y metales pesados del agua residual [1].

Sin embargo, la adaptación de cualquier tecnología a las condiciones propias de un lugar requiere de estudios o valoraciones previas que conduzcan a la obtención de coeficientes propios de diseño o adaptaciones a la metodología de diseño, utilizada en lugares en donde estos procesos ya han sido estudiados.

El presente trabajo se realiza como parte de los estudios de tratabilidad, mediante humedales de flujo sub-superficial para las condiciones de los sistemas rurales ubicados en los Andes Ecuatorianos de la provincia del Azuay, en donde las poblaciones se asientan sobre los 2.500 m.s.n.m. El clima durante el año va de templado a frío, y las condiciones de funcionamiento del sistema de alcantarillado cuentan con cargas orgánicas bajas, debido a la dilución que ocurre por la introducción de agua de origen pluvial en los sistemas sanitarios. Todas estas condiciones conducen a esperar eficiencias menores en la remoción de contaminantes.

El objetivo de los estudios hidráulicos realizados es caracterizar el tipo de flujo en los humedales sub-superficiales, a partir de pruebas de trazadores y basado en la aplicación de expresiones conocidas de otros sistemas de tratamiento biológicos, aplicando la teoría de reactores.

Los principales criterios de diseño usados para el dimensionamiento de este tipo de humedales pasan por la profundidad de los mismos, en función de la vegetación emergente a utilizar, el área de la sección transversal, para lo cual es muy importante el valor de la conductividad hidráulica del material de soporte. Sin embargo, el área superficial a utilizarse es, sin duda, el parámetro más importante, ya que la mayoría de las metodologías modernas de diseño se basan en limitar la carga orgánica y la carga hidráulica por unidad de área que debe aplicarse a un humedal artificial para lograr efluentes de 20 mg/l de DBO y 30 mg/l de SS.

De acuerdo con lo planteado en la EPA [2], se recomienda la siguiente ecuación para el cálculo del área superficial en Humedales de flujo horizontal.

$$A_s = \frac{[Q(\ln C_o - \ln C_e)]}{K_T d n} \quad (1)$$

Esta se deriva del modelo aplicado para flujo pistón, que relaciona la eficiencia de remoción con el tiempo de retención:

Dónde:

$$C_e/C_o = \exp(-K_T t) \quad (2)$$

Ce: es la concentración de DBO5 del efluente (mg/l)

Co: es la concentración de DBO5 del afluente (mg/l)

KT: es la constante dependiente de la temperatura (d-1)

t: es el tiempo de retención (d)

d: es la profundidad del lecho (m)

n: es la porosidad del medio (como fracción)

As: es el área superficial del sistema (m<sup>2</sup>)

También se han planteado modelos de reacción base área para el análisis del flujo en reactores, como flujo pistón y como mezcla completa [3].

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp\left(\frac{K_{fp}}{q}\right) = \left(1 + \frac{K_N}{Nq}\right)^{-N} \quad (3)$$

Dónde:

Kfp: es la constante de reacción de primer orden base área para flujo pistón (m/año)

KN: es la constante de reacción de primer orden base área para N tanques en serie (m/año)

N: es el número de tanques de mezcla completa en serie supuesto.

q: es la carga hidráulica (m/año).



El uso de las ecuaciones antes recomendadas sin una adecuada interpretación del comportamiento del flujo puede llevar a errores en el dimensionamiento de los sistemas y a su incorrecto funcionamiento, desde el punto de vista del tratamiento biológico. Por ello la necesidad de poder caracterizar hidráulicamente el reactor a utilizar, previo al análisis del funcionamiento biológico.

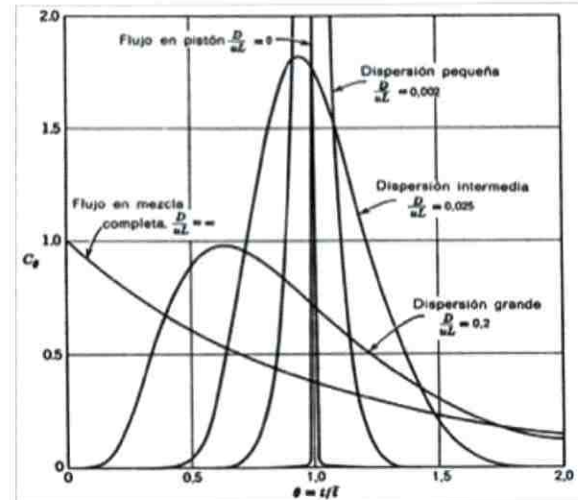


Figura 4.- Plataforma base de monitoreo.

Para poder evaluar la tendencia del flujo en un reactor como flujo pistón o como mezcla completa se puede utilizar el valor del módulo de dispersión del sistema, como se observa en la figura 1.

Varios investigadores [4] han planteado ecuaciones aplicables a reactores estrechos en función de las medidas geométricas del mismo, para la valoración del módulo de dispersión, siendo la de mejor aplicación la siguiente:

$$\frac{D}{uL} = 0.001 \left( \frac{R}{uK_D} \right)^{0.386} \frac{b^2}{Lh} \quad (4)$$

Dónde:

R: es el radio hidráulico del canal equivalente = 2h+b.

H: es la altura del agua (m).

b: es el ancho del canal equivalente (m).

L: es la longitud (m).

u: es la velocidad aparente del flujo (m/s).

KD: es la conductividad hidráulica Darciana (m/s).

A partir de este parámetro se pueden aplicar modelos como el de Tanques en Serie con retardo que puede reproducir el funcionamiento de los humedales artificiales. Crites y Tchobanoglous [5], obtuvieron las curvas del efluente para uno, dos, cuatro, seis, y hasta setenta y cinco reactores en serie y notaron que el modelo que incluye de cuatro a seis reactores de mezcla completa en serie puede ser usado para describir las características hidráulicas de los humedales artificiales.

Adicionalmente, investigadores como Wolf y Resnik han propuesto un método que analiza la totalidad de la curva de concentración contra tiempo y no solo las tendencias centrales [6]. Si se tabula la curva tiempo concentración y si denominamos F(t) a la fracción de volumen que sale del reactor antes del tiempo de retención teórico t<sub>0</sub>, la ecuación de la misma es (Gonzalez Diaz 2011):

$$F(t) = \left( 1 - \frac{C}{C_0} \right) = 1 - e^{-\eta \frac{(t-\theta)}{t_0}} \quad (5)$$

En la que:

Donde p es la fracción de flujo considerado como pistón, m es la fracción del volumen considerado muerto, θ es el desplazamiento de la curva debido a los espacios muertos y caracteriza a la eficiencia de la mezcla, cuyos valores pueden ser calculados por métodos gráficos, como se observa en la figura 2.

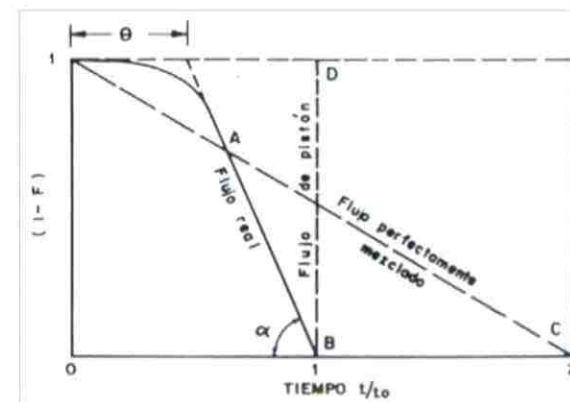


Fig. 2. Determinación gráfica de θ y α.

## II. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este trabajo, se utilizó las instalaciones de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ucubamba, pertenecientes ETAPA EP y, además, se utilizó tres reactores (tanques de acero inoxidable) de sección transversal trapezoidal de 2.8 m de largo, 0.60 m de profundidad, 1.30 m de ancho superior y 1.20 m de ancho inferior. Como material de soporte, se utilizó grava de 18 a 25 mm, con una porosidad del 38%. Su colocación fue aleatoria, ocupando un volumen efectivo de 0.6 m<sup>3</sup>.



Fig. 4. Estructura de entrada.

El suministro de agua residual se realiza mediante bombeo desde el cajón de reparto, posterior al sistema de cribado y desarenado, de la Planta de Tratamiento de Ucubamba hacia un decantador primario, desde el cual se abastece a los reactores, el cual cuenta con un tamiz ubicado en la parte superior del mismo como se observa en la figura 6, dicho decantador primario evaluado para el caudal mayor a tratarse representa un periodo de retención de 3 horas con lo que se asegura su funcionamiento como tratamiento primario.

Para las pruebas de trazadores se utilizó sal, realizándose medidas indirectas de la concentración, a través del valor de la conductividad presente en el agua. Para la medición de la conductividad, se fabricó tres dispositivos con un microprocesador capaz de guardar en memoria los datos obtenidos y ser programados para diferentes tiempos de lecturas. Estos dispositivos fueron calibrados mediante soluciones con concentraciones de sal conocidas y preparadas en laboratorio; para la toma de muestras se utilizaron los pozos de muestreo ubicados en los reactores.



Fig. 5. Ubicación de pozos y equipos de muestreo.



Fig. 3. Reactores utilizados.

Los reactores fueron diseñados con una pendiente de 1% para garantizar un gradiente hidráulico. Como estructura de entrada se colocó piedra de 18 a 25 cm de diámetro para evitar obstrucciones en el sistema y sobre esta zona se colocó un tubo de pvc en forma de flauta de 25 mm de diámetro perforado con 10 agujeros de 9 mm de diámetro a cada lado. Adicionalmente, como estructura de entrada se colocó un baffle de acero inoxidable en los 30 centímetros superiores del área de entrada, lo que obliga a que el agua salga por la parte inferior y así minimizar las zonas muertas.

Para recoger el agua se utilizó otro tubo de pvc en forma de flauta de 50 mm de diámetro perforado con 10 agujeros de 9mm de diámetro, precedido así mismo de otro baffle de acero inoxidable mediante el cual se asegura la utilización de todo el volumen del reactor. El efluente de los tres reactores se vierte hacia el drenaje de planta de tratamiento.



Para el material de soporte se realizó las pruebas de granulometría, peso específico, porosidad y para la obtención de la conductividad se fabricó un permeámetro, a partir del cual se obtuvo las propiedades hidráulicas del material, las cuales se muestran en la tabla 1:

TABLA 1 PROPIEDADES HIDRAULICAS DEL MATERIAL DE SOPORTE

Parámetros	Unidad	Valor
n: Coef. de fórmula exponencial	-	0,6627
Kn: Conductividad hidráulica	m / s	0,1866
k: Permeabilidad intrínseca	m <sup>2</sup>	2,153E-7
K <sub>D</sub> : Conductividad darciana	m / s	1,613
K <sub>T</sub> : Conductividad turbulenta	m / s	0,1333

### III. RESULTADOS

Se realizaron 8 pruebas entre enero y febrero del 2014 para tiempos de retención hidráulico de 1.5 y 1 día, en estas se tomaron los valores de conductividad alternadamente entre los pozos de muestreo ubicados en el primero y segundo tercio del reactor y en la salida del mismo. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 6.

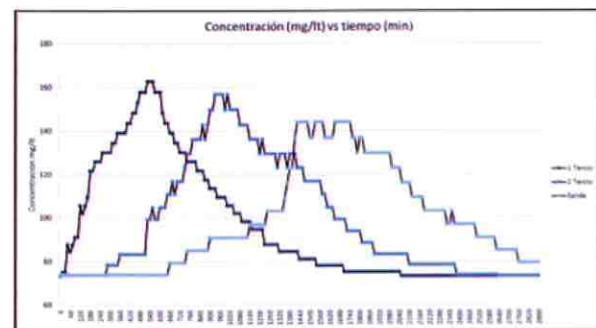


Fig. 6. Valores de concentración vs tiempo.

Las curvas que se muestran corresponden a las pruebas realizadas el 18 y 22 de enero por ser aquellas con mejor calidad de datos, en las mismas se puede observar las curvas obtenidas por las pruebas de trazadores:

Para la aplicación del modelo de tanques en serie con retardo se procedió a normalizar las curvas, calcular la variación entre el tiempo medio observado vs. el tiempo medio teórico y el valor de la varianza adimensional al cuadrado, que no es otra cosa que el momento de segundo orden de la

curva dividida para el cuadrado del momento de primer orden.

A partir de este valor, se puede obtener el valor del Módulo de dispersión de la curva, el número de tanques en serie característico (que es el inverso de la varianza adimensional) y el tiempo de retardo teórico. Las curvas normalizadas para el 2 tercio y la salida del reactor vs las curvas calculadas con este método se pueden apreciar en la figura 7 y tabla II.

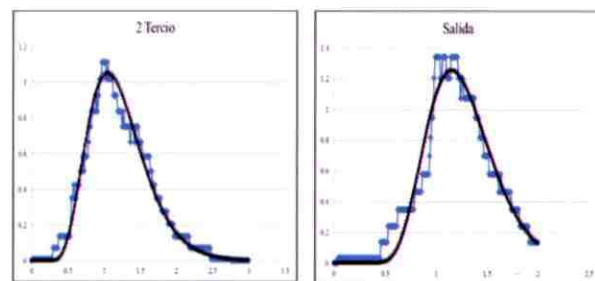


Fig. 7. Valores de concentración vs tiempo.

TABLA II RESULTADOS DEL MODELO DE TANQUES EN SERIE

Relación Largo/Ancho	0.75	1.5	2.25
tep - t observado	0.382	0.210	0.203
Varianza adimensional	0.562	0.177	0.113
Módulo de dispersión D/uL	0.362	0.107	0.047
No Tanques en serie	2	6	9
Retardo calculado	0.158	0.217	0.264

Como se puede observar, los resultados obtenidos muestran que este método puede reproducir de manera adecuada el funcionamiento del humedal de flujo subsuperficial, y que las diferencias obtenidas pueden deberse a la precisión con que trabajaron los instrumentos de medida. Se observa en los valores calculados que conforme aumenta la relación largo/ancho mejora la tendencia al flujo pistón, pues disminuye el módulo de dispersión.

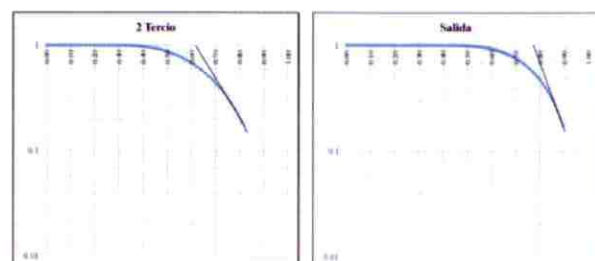


Fig. 8. Curvas para el método de Wolf y Resnick.

Para la aplicación del método de Wolf y Resnick se tomaron en cuenta únicamente los primeros valores

de las series, se trazó una curva de tendencia en escala semi logarítmica y se trazó la tangente con el fin de poder evaluar los valores de  $\theta$  y  $\alpha$  para las curvas anteriormente mostradas. Los resultados se muestran en la figura 8 y la Tabla III.

TABLA III RESULTADOS DEL MODELO DE WOLF Y RESNICK

Relación Largo/Ancho	0.75	1.5	2.25
$\theta$	0.18	0.62	0.77
$\alpha$	60	70	85
% Flujo pistón	42%	76%	89%
% Zonas muertas	57%	35%	27%

### IV. CONCLUSIONES

Si bien los modelos matemáticos utilizados, así como la formulación de los mismos, no son nuevos en el campo del tratamiento de aguas residuales mediante métodos naturales, es importante poder caracterizar el reactor a utilizarse desde el punto de vista hidráulico, y poder identificar la tendencia de funcionamiento del mismo. En el caso de la presente experiencia, se puede concluir que los resultados que se obtengan en las pruebas biológicas pueden ser manejados con ecuaciones de reacción de primer orden correspondientes al flujo pistón, y en función de la tabulación de los mismos obtener las constantes de reacción del sistema.

Durante la realización de las pruebas se pudo observar, sobre todo, en el arranque del sistema, la presencia de cortocircuitos y flujos preferenciales, los mismos que daban como resultado varios picos en la curva de concentración vs tiempo. Estos fueron corregidos mediante el sellado del baffle

de salida, para asegurar que todo el flujo transite por debajo de éste antes de salir del reactor. Esta experiencia evidencia la importancia del correcto funcionamiento de las estructuras de entrada y salida, así como su mantenimiento para asegurar que toda el agua residual tenga los tiempos de retención suficientes para su tratamiento.

Finalmente, de la experiencia realizada se puede concluir como una adecuada relación largo/ancho asegura la tendencia en el comportamiento del flujo. Del presente trabajo se puede concluir que una relación 2:1 o 3:1 se podría considerar suficiente para asegurar la tendencia al flujo pistón en humedales artificiales de flujo sub superficial.

### REFERENCIAS

- [1] C. Polprasert "Organic Waste Recycling - Technology and Management" 2nd Ed., John Wiley & Sons, Chichester, England, 1996.
- [2] EPA, "Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewater" Office of Research and Development. Cincinnati, Ohio, 2000.
- [3] R. H. Kadlec, R.L. Knight "Treatment Wetlands" Lewis Publishers, Boca Raton, New York, 1996.
- [4] O. González Díaz, "Metodología para el diseño de Humedales de flujo sub-superficial" Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol XXXII No 1 Abr 2011, pp 61-70.
- [5] R. Crites, G Tchobanoglous "Small and Decentralized Wastewater Management Systems" Ed. McGraw-Hill, New York, 1998.
- [6] Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental - CEPIS "Tratamiento de agua para consume humano" Perú, 2004



# Sistema de monitoreo hidrometeorológico de ETAPA EP

Josue Bernardo Larriva Vásquez  
Gerencia de Agua Potable y Saneamiento  
ETAPA EP  
Cuenca, Ecuador  
jlarriva@etapa.net.ec

Carlos Javier Fernandez de Córdova Webster  
Gerencia de Agua Potable y Saneamiento  
ETAPA EP  
Cuenca, Ecuador  
jfernand@etapa.net.ec

## Abstract

The Company ETAPA EP, since 1997, maintains and operates a network of hydrometeorological monitoring in a large area of the Paute river basin, mainly in the sub-basins of the rivers Tomebamba Yanuncay Tarquí and Machángara. Initially the network had 18 stations and over the years this has increased now to 57, most of which have been modernized and equipped with a transmission system in real time.

The project is structured so it can work in conjunction with the risk management plan for water and sanitation infrastructure owned by the company, because critical sections of the rivers of the city have been identified, floodplains, and the company is working in rainfall runoff models based on rainfall occurred in previous days and the prognosis for subsequent hours, in order to have in the near future with an early warning system.

**Keywords:** Hydrometeorological monitoring, risk management, early warnings .

## Resumen

La Empresa ETAPA EP mantiene y opera desde el año 1997, una red de monitoreo hidrometeorológico en gran parte de la cuenca del río Paute, principalmente, en las subcuencas de los ríos Tomebamba, Yanuncay, Machángara y Tarquí. En un inicio, dicha red contaba con 18 estaciones y con el paso de los años, ésta se ha incrementado, actualmente, a 57; la mayoría de las cuales han sido modernizadas y cuentan con un sistema de transmisión a tiempo real.

El proyecto se ha estructurado para que pueda trabajar en conjunto con el plan de gestión de riesgos de la infraestructura de agua potable y saneamiento con que cuenta la Empresa, ya que se han identificado secciones críticas en los ríos de la ciudad, las playas de inundación, y se está trabajando en los modelos de precipitación escurriente para dichos cauces en función de las lluvias ocurridas y el pronóstico para las horas subsiguientes, con la finalidad de contar en un futuro cercano con un sistema de alertas tempranas.

**Palabras Clave** — Monitoreo hidrometeorológico, gestión de riesgos, alertas tempranas.

## I. INTRODUCCIÓN

En el año 1997 el Cuerpo Suizo de Socorro (CSS), a través del Proyecto PRECUPA, diseña e implementa la red hidrometeorológica unificada de la cuenca del río Paute (RHUP) [1] y en el año 1997 se entrega a ETAPA EP su operación y mantenimiento.

La red se compone de varios tipos de estaciones, como son:

- Hidrológicas que miden el nivel del agua en los ríos.
- Pluviométricas para registrar la precipitación.
- Mixtas, que está compuesta por las dos anteriores.
- Meteorológicas que, a más de la precipitación, miden otros parámetros como: presión atmosférica,

temperatura y humedad del aire, velocidad y dirección del viento.

En un inicio la red tenía 18 estaciones, pero con el paso de los años, el número de estaciones se fue incrementado llegando a tener, en el 2012, más de 30 estaciones; nueve de estas estaciones transmiten los datos por señal de radio VHF, cada cuatro horas hacia una estación base ubicada en Ucubamba, y para el resto de estaciones se debía bajar la información directamente en campo.

En función de los datos obtenidos de esta red, se elaboró los anuarios para estos puntos, los mismos que han servido de base para una gran cantidad de estudios hidrológicos de nuestra ciudad.

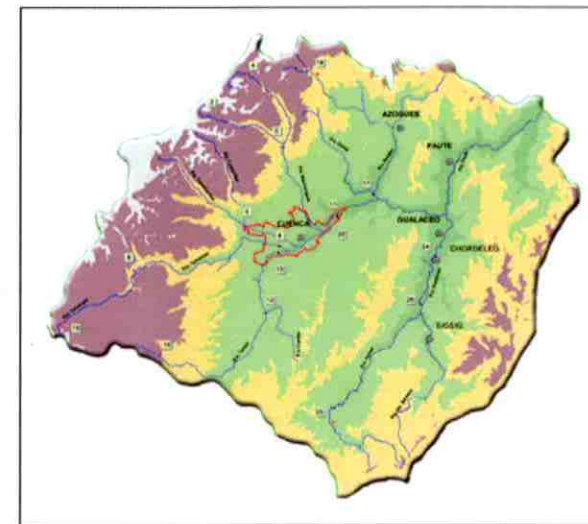


Fig. 1. Estaciones de la Red Hidrometeorológica Unificada del río Paute (RHUP).

## II. PLAN DE GESTION DE RIESGOS

Durante los años 2010 - 2011 ETAPA EP contrata los estudios para la implementación de un Plan de Gestión de Riesgos para los sistemas de agua potable y alcantarillado que se encuentran ubicados dentro del área de influencia de la segunda fase de los Planes Maestros para la ciudad de Cuenca, en donde los principales objetivos fueron:

- Identificar y evaluar las amenazas actuales y potenciales para el conjunto de obras.
- Determinar la vulnerabilidad a la que están expuestas la infraestructura de los sistemas de agua potable y saneamiento.

Realizar un estudio de análisis de riesgos (en función de amenazas y vulnerabilidad).

Establecer escenarios de riesgo, valorarlos, evaluarlos y priorizarlos.

Elaborar un Plan de Mitigación de Riesgos

Formular el Plan de Contingencia y de Acción en Emergencia.

Durante dichos estudios, realizados por AMRA [2], se hicieron análisis de riesgos para diferentes eventos naturales y de origen antrópico a los cuales se encuentra expuesta la infraestructura de la empresa, y haciendo una valoración sobre probabilidad de ocurrencia y población afectada por diferentes eventos se pudo determinar que la vulnerabilidad más grande de estos sistemas se da frente a eventos de crecidas o sequías en los cursos hídricos de la ciudad. Otro factor importante es el de la vulnerabilidad frente a deslizamientos en ciertas áreas de la ciudad, que afectan de igual forma a la infraestructura de redes y para los cuales se observó que existe una relación entre los deslizamientos y los picos en las intensidades de lluvias producidos.

Por estas razones, se llegó a determinar la necesidad de mejorar el sistema de monitoreo de la empresa, ampliando el número de puntos de control y cambiándolo por sistemas con transmisión de datos en tiempo real, a partir del cual se pueda implementar un sistema de alerta temprana, considerando que las reducidas dimensiones de las cuencas de los ríos de la ciudad y los consiguientes tiempos breves de respuesta hacen necesario el recurso a las previsiones meteorológicas para una aceptable mitigación del riesgo hidráulico.

Como parte de la consultoría realizada en el período indicado, se desarrolló un modelo sintético (black box o empírico) que no pretendía representar física o matemáticamente los procesos hidrológicos y los fenómenos físicos que intervienen en la transformación lluvia-caudal, sino la búsqueda de un operador matemático que relacionara, del mejor modo posible, la entrada y salida del sistema o el flujo meteórico, con el caudal afluente hacia la sección de cierre de la cuenca hidrográfica.

En mayor detalle, el modelo analítico elaborado para la evaluación de los caudales a partir de las



medidas pluviométricas es compuesto por dos funciones, como se indica en la siguiente ecuación:

$$Q = f(hr) + f(hd) \quad (1)$$

- La función  $f(hr)$  tiene en cuenta las contribuciones pluviométricas recientes ( $hr$ ).
- La función  $f(hd)$  depende de las lluvias lejanas en el tiempo ( $hd$ ).

En la práctica, se ha asumido que la formación de la crecida está constituida por la suma de dos efectos: el primero debido a las lluvias caídas, en un intervalo temporal inmediatamente anterior a la crecida y de duración comparable con el tiempo de concentración de la cuenca; el segundo debido a las lluvias lejanas en el tiempo (también pocas horas), que aumentan la saturación del terreno reduciendo la capacidad de infiltración.

Sobre la base de los datos de lluvia y caudal registrados en las cuencas del Machángara (estación Machángara dj Chulco) y del Tomebamba (estación Matadero en Sayausí), se determinó expresiones analíticas que estimarán del mejor modo posible los valores de los caudales pico. La ecuación que provee los mejores resultados es la siguiente:

$$Q_{max} = a \cdot hr + e \cdot hd \quad (2)$$

Donde (Figura 2):

$t$ : es el instante en que se registra el caudal pico,  $Q_{max}$

$hr$ : es la altura de lluvia acumulada caída en un número de horas igual a  $r$  dentro del tiempo  $t-r$  y el tiempo  $t$ .

$hd$ : es la altura de lluvia acumulada caída en un número de horas iguales a  $d$  dentro del tiempo  $t-r-d$  y el tiempo  $t-r$ ;

$a$ ,  $b$ ,  $e$  y  $f$ : son parámetros sometidos a calibración. Minimizando las desviaciones entre las evaluaciones obtenidas, mediante la ecuación propuesta y los valores de los caudales pico registrados en los dos ríos, se ha conseguido los valores de las duraciones  $r$  y  $d$  y de los parámetros de calibración, los cuales se observan en la Tabla 1.

TABLA 1 VALORES DE LAS DURACIONES R Y D Y DE LOS PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN

Río	r	d	a	b	e	f
Machangara	2	36	0.2227	1.4724	26.2895	0.0100
Tomebamba	3	84	0.7151	0.9193	142.094	-0.1691

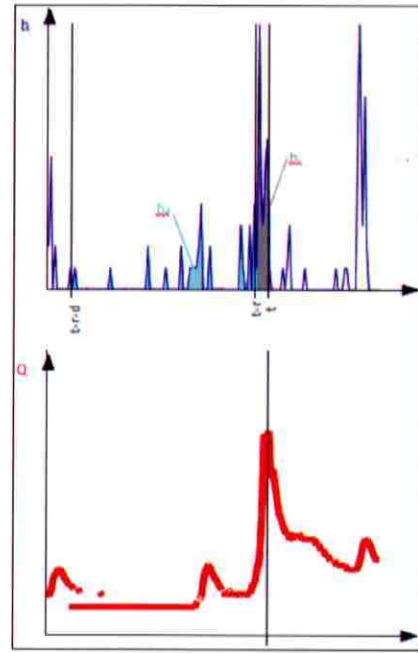


Fig. 2. Relación de la lluvia y el caudal.

Sin embargo, la estimación efectuada no resulta completamente satisfactoria para los valores más elevados del caudal para la estación Matadero en Sayausí, debido a dos posibles causas: un eventual error de medida del caudal o que las medidas pluviométricas efectuadas en un único punto por medio de pluviógrafo, no son suficientemente representativas, y, por tanto, es necesario que las funciones de transformación lluvia-caudal propuestas sean mejoradas mediante la densificación de estaciones de lluvia y el procesamiento de un mayor número de datos.

Finalmente, se procedió también a determinar para cada río, a localizar algunas secciones "sensibles" a fenómenos de inundación, para las cuales se han calculado las escalas de flujo (diagramas altura de agua,  $h$  - caudal,  $Q$ ) de dichas secciones, obteniéndose los caudales de desborde para las mismas.

En la figura 3, se puede observar la ubicación de las secciones sensibles para cada río, así como el área de inundación para un período de 50 años, la cual fue actualizada a partir del proyecto Macua [3].



Fig. 3. Secciones sensibles en los ríos.

Para el río Tomebamba, los puntos en donde se ha identificado las secciones más críticas son junto al Coliseo Mayor, en donde el caudal de desborde es del orden de 85 m<sup>3</sup>/s y en Cahapata en donde es de 150 m<sup>3</sup>/s.

Para el río Yanuncay, la sección crítica se ha identificado en la Av. Primero de Mayo en donde el caudal de desborde es del orden de 70 m<sup>3</sup>/s.

Para el río Machangará la sección crítica se ha identificado en Ochoa León en donde el caudal de desborde es del orden de 40 m<sup>3</sup>/s.

Para el río Tarqui la Empresa, en convenio con la SENAGUA, está realizando los estudios de vulnerabilidad para identificar zonas con problemas y necesidades de obras de mitigación.

En cuanto al manejo de indicadores de sequía, y con el fin de hacer comparables los datos recogidos en diferentes sistemas de explotación, se estableció que se debía utilizar un Índice de Estado,  $I_e$ , que tomando los valores medios, máximos y mínimos, transforma la medición en un valor adimensional que varía entre 0 y 1, ya que existe la necesidad de homogeneizar los indicadores en un valor numérico adimensional capaz de cuantificar la situación actual respecto de la histórica, y posibilitar una comparación cuantitativa entre los distintos indicadores seleccionados.

La expresión del Índice de Estado " $I_e$ " es la siguiente:

$$I_e = 1 + (V_i - V_{med}) / (V_{max} - V_{min}) \quad (3)$$

En donde:

$V_i$ : es el valor de la medida obtenida en el mes de

seguimiento

$V_{med}$ : es el valor medio en el periodo histórico  
 $V_{max}$ : es el valor máximo en el periodo histórico  
 $V_{min}$ : es el valor mínimo en el periodo histórico

Los diferentes niveles de sequía se clasifican de la siguiente manera:

- Estado de normalidad: indica que los indicadores de sequía están por encima de los valores medios registrados en las series históricas de los indicadores

- Estado de pre-alarma: se activa cuando los indicadores descienden por debajo de los valores medios históricos, por lo que es conveniente extremar el control

- Estado de alarma: se activa cuando es necesario poner en marcha medidas de conservación del recurso y de gestión de la demanda que permitan su mantenimiento en aplicación de las medidas de ahorro pertinentes

- Estado de emergencia: se activa cuando es ineludible la aplicación de medidas excepcionales. Como se puede observar, en este caso, también es necesario llevar un monitoreo de las fuentes hídricas de las que se abastece la ciudad y debe llevarse en una plataforma con la capacidad suficiente de poder alertar, automáticamente, a la Empresa cuando se llega a los niveles de alarma descritos.

Finalmente, los estudios sugerían que en el caso de eventos extremos es necesaria la implementación de protocolos de emergencias y conformación de un comité quien dirija las acciones durante dichos eventos, de acuerdo a la normativa nacional [4], debiendo indicar que en la práctica, con el paso de los años esta función fue asumida por el COE cantonal, del cual la Empresa es parte.

Por ello, y como consecuencia del plan de gestión de riesgos para agua potable, y la necesidad de incorporar nuevas estaciones para el monitoreo ambiental en las cuencas altas de los ríos que sirven como fuente de agua potable para la ciudad, se diseñó un plan de mejoramiento para la red que incluía la compra de nuevos equipos, el cambio de plataforma de transmisión de datos, para la mayoría de estaciones y la densificación de pluviómetros en la zona urbana de la ciudad.



### III. RED ACTUAL

Durante los años 2012 – 2013 se trabajó para implementar el plan de mejoramiento para la RHUP a cargo de ETAPA EP y, actualmente, se cuenta con una red de 57 estaciones, de las cuales 12 estaciones meteorológicas automáticas, 7 estaciones pluviométricas y 14 estaciones hidrológicas cuentan con transmisión en tiempo real, obteniéndose las siguientes ventajas:

- Mayor precisión de los datos hidrometeorológicos medidos.
- Transmisión de datos a través de señal GPRS o CDMA y en intervalos de tiempo menores con respecto a las estaciones que transmiten vía radio VHF (5 min para estaciones GPRS y 1 hora para estaciones con CDMA).
- Acceso y configuración de estaciones vía remota a través de la tecnología GPRS y CDMA, y dataloggers, completamente programables que permiten la conexión con cualquier tipo de sensor.
- Estaciones completamente autónomas que se alimentan a través de baterías conectadas a paneles solares.
- Software para gestión de estaciones que permite descargas de datos en línea, verificación de funcionamiento y transmisión simultánea hacia varios servidores de almacenamiento.

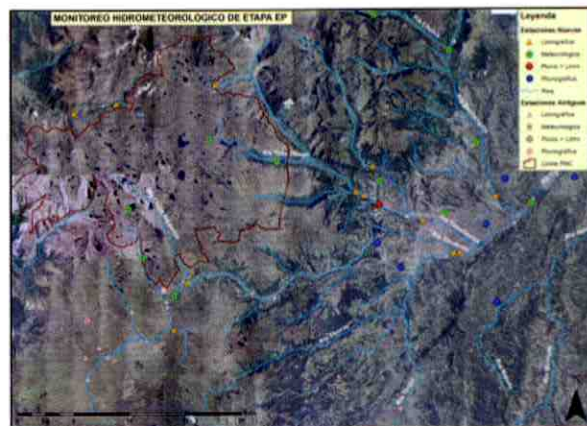


Fig. 4. Ubicación de las estaciones actuales.

Sin embargo, los esfuerzos realizados en este tema, no solo le corresponden a la Empresa, ya que la Subsecretaría de la Demarcación Hidrográfica del río Santiago –SENAGUA se encuentra liderando un proceso, para conformar la “Red Hidrometeorológica del río Paute”, unificando

las diferentes redes que tienen entidades como: INAMHI, CELEC EP - HIDROPAUTE, UNIVERSIDAD DE CUENCA, EMAPAL y ETAPA EP, que es la entidad que cuenta con el mayor número de estaciones, para lo cual se está llevando un proceso para unificar los estándares en cuanto a equipos, precisión y uso de la información que se genera. De manera particular, ETAPA EP mantiene convenios con las instituciones antes mencionadas, de los cuales el más reciente, firmado en el año 2013 con CELEC EP permitirá modernizar 8 estaciones adicionales.

La aplicación web para visualización de datos con que cuenta, actualmente, ETAPA EP se encuentra instalada sobre el Datacenter de la empresa, en donde se almacenan los datos con la mayor seguridad, y desde donde accede no solo el personal propio que monitorea estos parámetros, sino que también ha sido compartida a otras instituciones locales que manejan gestión de riesgos como son el ECU911 y el Consejo de Seguridad Ciudadana.

Adicionalmente, y para completar el proyecto de monitoreo, se está trabajando en dos proyectos importantes. El primero es la elaboración de una aplicación informática que permita hacer una gestión estadística de los datos que genera la red, que incluye correcciones de posibles lecturas erradas, relleno de datos y generación automática de reportes de valores estadísticos, aplicación que servirá en un futuro para el manejo de toda la información recolectada por la red para fines científicos.

Y el segundo, la incorporación dentro de la red del monitoreo de parte de los colectores de alcantarillado de la ciudad, que por tratarse de un sistema combinado se ve afectado en su funcionamiento, cuando se presentan lluvias prolongadas o de intensidades altas.



Fig. 5. Ubicación de las estaciones para alcantarillado.

### IV. CONCLUSIONES

El proceso de modernización del sistema de monitoreo hidrometeorológico de ETAPA EP le ha permitido contar con mayores elementos para el manejo y gestión de las cuencas de las cuales se abastece la ciudad y le permite una mayor capacidad de respuesta frente a eventos extremos que puedan afectar su infraestructura o los servicios que presta. En cuanto al tema de gestión de riesgos, se está implementando el sistema de alertas tempranas contra inundaciones, para lo cual es necesario completar algunos estudios hidrológicos adicionales e ir mejorando, paulatinamente, las ecuaciones que relacionan precipitación y escorrentía para cada cuenca en función de los datos que se están obteniendo. Finalmente, se espera que, con la base de datos generada por la red, se aportará a proyectos futuros de la ciudad relacionados con estudios de estimación de caudales máximos y mínimos, hidrología urbana, calidad de agua y caudal ecológico, indicadores de manejo de cuencas, balances hídricos, entre otros.

### REFERENCIAS

- [1] P. Basape, “Prevención de Desastres Naturales en la Cuenca del Paute” (PRECUPA 1994-1998), Cooperación Ecuador-Suiza, Informe Final. Vol. 1 y 2, Cuenca, 1998.
- [2] AMRA Analysis and Monitoring of Environmental Risk “Consultoría para el Plan de Gestión de Riesgos en los sistemas de agua potable y saneamiento de la ciudad de Cuenca” ETAPA EP, May 2011.
- [3] R. Zeas “Establecimiento de un Plan de Manejo para Cuencas de Ríos Andinos” (MACUA). FUNDACYT (Fundación para la Ciencia y Tecnología), 1997.
- [4] Manual del Comité de Operaciones de Emergencia, Secretaría Técnica de Gestión de Riesgos, 2010.



## Gestión de los Desechos Infecciosos en el cantón Cuenca

Edison Fernando Muñoz Pauta  
Dpto. Disposición Final y Desechos Peligrosos  
Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca "EMAC EP"  
Ingeniería Civil - Universidad Católica de Cuenca  
Cuenca, Ecuador  
fmunoz@emac.gob.ec / f21munozp@gmail.com

### Abstract

Infectious waste management represents a technical and environmental severe problem that has not been solved yet by the majority of cities from Ecuador. However, this fact is not true for the city of Cuenca, in which since 1996 a separate collection system for this type of waste was implemented. Currently, the Public Municipal Cleaning Company "EMAC EP" has an infectious waste management system, which includes its selective collection, transportation, treatment, and ultimate disposal. Thus, this process follows both technical and environmental regulations established in this country. The principal aspects, on which the currently system has been supported, are also described in order to share Cuenca's experience as a reference for the management of infectious wastes.

**Keywords** — infectious waste, collection, sterilization autoclaves.

### Resumen

La gestión de los desechos infecciosos representa un grave problema técnico y ambiental que no ha sido resuelto todavía por la mayoría de las ciudades del Ecuador, con excepción de la ciudad de Cuenca, en la cual desde el año 1996 se implementó un sistema de recolección selectiva para este tipo de desechos. Actualmente la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca "EMAC EP" cuenta con un sistema de gestión de desechos infecciosos que incluye la recolección selectiva, transporte, tratamiento y disposición final de los mismos, cumpliendo con la normativa técnica y ambiental vigentes en el país. Con el objeto de que la experiencia de Cuenca pueda servir como una referencia para la gestión de los desechos infecciosos, también se describe los aspectos fundamentales sobre los cuales se sustenta el actual sistema implementado.

**Palabras clave** — desechos infecciosos, recolección, esterilización, autoclaves

## I. INTRODUCCIÓN

En la mayoría de las ciudades del Ecuador, los desechos infecciosos son recolectados y dispuestos conjuntamente con los desechos sólidos domiciliarios, lo que genera graves problemas técnicos y ambientales que atentan contra la salud pública y el ambiente en general, tales como: pinchazos que sufren los obreros de recolección y los recicladores que manipulan las fundas de basura, así como la proliferación de vectores sanitarios como moscas, roedores y animales domésticos que entran en contacto con este tipo de desechos y que, posteriormente, se convierten en agentes potenciales de transmisión de enfermedades.

Ante esta problemática, desde marzo de 1996, el I. Municipio de Cuenca, implementó un servicio de recolección selectiva de desechos infecciosos en 27 establecimientos de salud y, a partir del año 1998 asumió esta competencia la EMAC. Cabe mencionar que, esta experiencia única en el país, hasta ese entonces, sirvió de base para que el Ministerio de Salud elabore y emita, en enero de 1997, el "Reglamento de Manejo de Desechos Sólidos en los Establecimientos de Salud de la República del Ecuador".

## II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA IMPLEMENTADO EN CUENCA

La gestión de desechos infecciosos que ha implementado la EMAC EP, se sustenta basa en los siguientes aspectos:

### A. Contratación de los servicios con Gestores Ambientales Autorizados

De acuerdo con lo establecido en los "Procedimientos para el registro de generadores de desechos peligrosos, gestión de desechos peligrosos previo al licenciamiento ambiental, y para el transporte de materiales peligrosos", constante en el Acuerdo No. 026, el cual fue emitido por el Ministerio del Ambiente, el pasado 12 de mayo de 2008, cualquier persona natural o jurídica, pública o privada, que preste los servicios para cualquiera de las fases del manejo de desechos peligrosos, debe obtener la respectiva Licencia Ambiental y su registro como Gestor Ambiental ante el MAE. Para dar cumplimiento a este Acuerdo, la EMAC EP ha suscrito los siguientes contratos:

- 1) Prestación de servicios para la recolección selectiva de desechos infecciosos, cuyo pago se realiza a base de la distancia recorrida por los dos vehículos utilizados para tal efecto
- 2) Prestación de servicios para el tratamiento de los desechos infecciosos, cuyo pago se realiza a base del peso de desechos entregados al Contratista.

### B. Soporte legal para la prestación de los servicios

Ante el insuficiente o nulo apoyo de las diferentes Instituciones públicas que legalmente deberían efectuar un control sobre el manejo de los desechos infecciosos en las distintas fuentes generadoras, el 08 de marzo de 2012, la I. Municipalidad de Cuenca, emitió la "Ordenanza para la Gestión de Desechos Sólidos Infecciosos y Especiales generados en el cantón Cuenca", la cual le faculta a la EMAC EP, a realizar controles en la clasificación, separación y almacenamiento de los desechos infecciosos en los distintos establecimientos de salud y similares. En este instrumento legal también se establece la obligatoriedad que tienen los generadores de este tipo de desechos, de entregar los mismos a la EMAC EP, para su recolección selectiva y su posterior tratamiento y disposición final.

Es importante mencionar que esta Ordenanza también define los establecimientos que deben suscribir un contrato de prestación de servicios para el manejo de desechos infecciosos, como

requisito previo a la emisión del respectivo permiso municipal de funcionamiento.

### C. Disponibilidad de vehículos adaptados para la recolección selectiva de desechos infecciosos

De acuerdo a lo establecido en el Acuerdo No. 026 del MAE, los vehículos destinados para la recolección y transporte de los desechos infecciosos, deben poseer las siguientes características técnicas: sistema mecanizado de carga y descarga, sistema de enfriamiento (refrigeración), sistema de captación de lixiviados y caja hermética (furgón).

Para el caso de Cuenca, se disponen de dos vehículos: un camión con un furgón de 15 m<sup>3</sup> de capacidad y una camioneta con un furgón de 4 m<sup>3</sup> de capacidad. Ambos vehículos cumplen también con las características técnicas descritas anteriormente.



Fig. 1 Camión de 15 m<sup>3</sup> para la recolección de desechos infecciosos



Fig. 2 Camioneta de 4 m<sup>3</sup> para la recolección de desechos infecciosos



La verificación del cumplimiento de las rutas de recolección y determinación del recorrido diario de cada vehículo, se realiza mediante los reportes y seguimiento en línea del rastreo satelital con el que cuentan estos dos vehículos.

**D. Determinación de la frecuencia de recolección**

La frecuencia de recolección selectiva a los distintos usuarios del servicio fue establecida a base de la tasa diaria de generación de desechos infecciosos, la misma que se presenta seguidamente:

TABLA I. FRECUENCIA DE RECOLECCIÓN SELECTIVA DE DESECHOS INFECCIOSOS EN EL CANTÓN CUENCA

Descripción	Tasa de generación (kg día-1)	Frecuencia de recolección
Gran generador	$P \geq 10$	Lunes a sábado
Mediano generador	$1 \leq P < 10$	Lun - Mie - Vie ó Mar - Jue - Sab
Pequeño generador	$0,4 \leq P < 1$	Una vez por semana
Micro generador	$P < 0,4$	Previa llamada a la EMAC EP

Cabe mencionar que, para el caso de los micro generadores, el servicio se presta en 24 horas de receptada la llamada en "Atención al Cliente" de la EMAC EP

**E. Organización del sistema de recolección**

Con base a la frecuencia de recolección establecida, la distribución de los vehículos se realizó de la siguiente manera:

- a) Para la atención a los grandes y medianos generadores, la mayoría de los cuales se emplazan en la terraza baja de la ciudad, el servicio es prestado por el camión.
- b) Los pequeños y micro generadores, así como los usuarios ubicados en las parroquias rurales, son atendidos por la camioneta.

En cada vehículo labora un chofer y un obrero de recolección, quienes laboran de lunes a viernes de 08H00 a 12H00 y de 14H00 a 18H00 y, los sábados de 08H00 a 13H00.

**F. Tratamiento de los desechos infecciosos**

Este servicio se presta a través de una empresa que

tiene su Planta de Tratamiento en Nobol, provincia del Guayas.

Los desechos recolectados en el cantón Cuenca son transportados por este contratista, hacia la referida Planta, en un camión dotado de un furgón de 16 m3 de capacidad, el cual también posee las características técnicas exigidas para este tipo de vehículos.



Fig. 3 Camión de 16 m3 utilizado para el transporte de desechos infecciosos

Los desechos son sometidos a un proceso de esterilización, mediante el uso de un autoclave de 4 m3, luego de lo cual son transportados hacia el Relleno Sanitario de Pichacay de la ciudad de Cuenca, en un volquete de 10 m3 de capacidad, por parte del mismo contratista.



Fig. 4 Autoclave de 4 m3 de capacidad, utilizado para el tratamiento de los desechos infecciosos



Fig. 5 Volquete de 10 m3 de capacidad, empleado para el transporte de desechos inactivados hacia el Relleno Sanitario de Pichacay

Como se puede colegir, el costo de transporte Cuenca - Nobol - Cuenca, incide notablemente en el costo del contrato suscrito para la prestación de este servicio, aspecto que fue analizado por la EMAC EP, para emprender con el proyecto de construcción de su propia Planta de Esterilización.

**G. Capacitación a los usuarios sobre la gestión de desechos sólidos, con énfasis en los clasificados como infecciosos**

Previo a la suscripción del respectivo contrato de prestación de servicios, la EMAC EP dicta una capacitación sobre la gestión de los desechos sólidos a los nuevos usuarios que solicitan los servicios, actividad que ha permitido concienciar a los profesionales de la salud y a las personas que en forma directa o indirecta generan o manipulan este tipo de desechos y a los establecimientos o instituciones que lo solicitan.

**H. Facturación y recaudación de los costos por la prestación de los servicios**

Como se describió anteriormente, el manejo de los desechos infecciosos que presta la EMAC EP incluye la recolección selectiva en todo el cantón Cuenca, el transporte hacia la Planta de Tratamiento en Nobol, la esterilización mediante autoclavado, el transporte hasta el relleno sanitario de la ciudad de Cuenca y su disposición final en el Relleno Sanitario de Pichacay, servicios cuyos costos son asumidos por los usuarios. Para tal efecto se suscribe un "Contrato de Prestación de Servicios" entre la EMAC EP y cada uno de los clientes.

Durante la recolección selectiva, los desechos infecciosos entregados por los usuarios, son pesados en una balanza electrónica digital, la cual cuenta con su certificado de calibración emitido por el INEN. Mensualmente, se elabora la factura correspondiente y, dentro de los primeros diez días laborables del mes siguiente a la prestación del servicio de recolección, los usuarios deben cancelar el valor correspondiente, directamente en la EMAC EP.

En la siguiente tabla se muestran los costos vigentes a octubre de 2014.

TABLA II. COSTOS DEL MANEJO DE DESECHOS INFECCIOSOS EN EL CANTÓN CUENCA (A OCTUBRE DE 2014)

PESO (kg.)	COSTO (DÓLARES)
0,10	1,42
0,50	2,08
1,00	2,90
5,00	9,46
10,00	17,67
20,00	34,07
30,00	50,47
40,00	66,88
50,00	83,28
60,00	99,69
70,00	116,09
80,00	132,50
90,00	148,90
100,00	165,31
200,00	329,35
300,00	493,40
400,00	657,44
500,00	821,48
1.000,00	1.641,71

**I. Prestación de los servicios a nivel domiciliario**

Para el caso de personas que padecen enfermedades y que, por esta razón, inevitablemente generan desechos infecciosos, la EMAC EP también realiza la recolección selectiva y tratamiento de los mismos. Para acceder a este servicio el paciente o alguna persona que le atienda, debe justificar dicha enfermedad mediante la presentación del certificado de salud respectivo, luego de lo cual debe asistir a la capacitación antes referida.

Una vez registrado, se lo clasifica como micro generador y se presta los servicios sin ningún costo, el cual es asumido en forma solidaria por el resto de usuarios.

**J. Certificación ISO 9001:2008 del proceso de gestión de desechos infecciosos**

Desde el año 2011, el Sistema de Calidad implementado por la EMAC EP en todos los servicios que están bajo su responsabilidad, incluida la gestión de desechos infecciosos, cuenta con la certificación internacional ISO 9001:2008, aspecto que implica el mejoramiento continuo de este servicio.



### III. RESULTADOS

- Incremento significativo del número de usuarios, según se muestra en la siguiente figura.

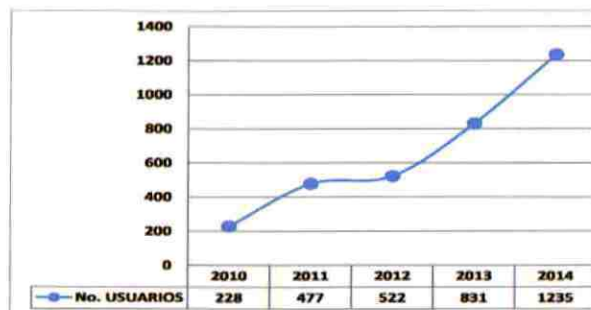


Fig. 6 Incremento anual del número de usuarios en el cantón Cuenca

- A través de las labores de capacitación que se brinda a los usuarios, paulatinamente, se viene incrementando la responsabilidad en el manejo de los desechos infecciosos.
- La calidad de los servicios prestados ha permitido que los usuarios cancelen oportunamente las facturas que la EMAC EP emite mensualmente, debiendo mencionarse que la cartera vencida es del 2,9 %. De estos resultados se colige que se está fomentando la "cultura de pago" por estos servicios.
- El incremento del número de usuarios, especialmente de los dos hospitales públicos más grandes del cantón Cuenca en el año 2011, ha permitido el aumento considerable de la cantidad de desechos infecciosos que han sido recolectados y tratados por la EMAC EP, lo que puede verificarse en la siguiente figura.

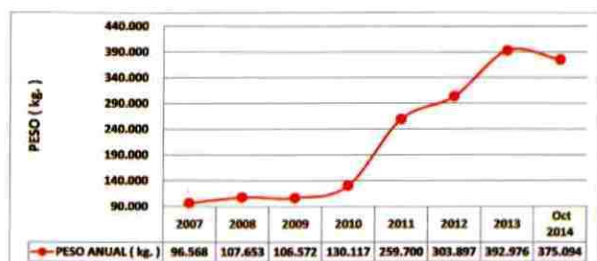


Fig. 7 Recolección selectiva y tratamiento de desechos infecciosos en el cantón Cuenca

- Desde mayo de 2014, la EMAC EP ha iniciado la construcción y equipamiento de la "Planta de Esterilización de Residuos Infecciosos", que a nivel público, es la primera que cuenta con la Licencia Ambiental otorgada por el MAE. Esta Planta se encuentra emplazada en el mismo predio del Relleno Sanitario de Pichacay y se prevé que inicie su operación en los primeros meses del año 2015. Dicha planta estará dotada de dos autoclaves de 2 m<sup>3</sup> de capacidad cada uno. La inversión total que se estima para este proyecto es de alrededor de USD \$. 2'000.000.

### IV. CONCLUSIONES

Según información del Programa Nacional de Gestión Integral de Desechos Sólidos que promueve el Ministerio del Ambiente, a noviembre de 2014, el 35% de los 221 Municipios del Ecuador cuentan con un relleno sanitario, lo que implica que en la mayoría de ciudades del país, la basura es dispuesta en botaderos de basura a cielo abierto. Si ésta es la realidad nacional, se puede concluir entonces que la situación del manejo de los desechos infecciosos, es realmente alarmante, dada su peligrosidad y además porque generalmente éstos son manipulados indistintamente con el resto de desechos recolectados por los Municipios. A base de los registros que mantiene la EMAC EP, correspondientes al año 2013, en el cantón Cuenca los desechos infecciosos que fueron recolectados y tratados, representan el 0,30% del peso de los desechos sólidos que fueron dispuestos en el Relleno Sanitario de Pichacay.

Así mismo, a base de los pesos registrados en el año 2013, en los desechos infecciosos se han encontrado desechos anátomo-patológicos (1,74%) y desechos cortopunzantes (3,77%).

Una vez que la Planta de Esterilización de la EMAC EP entre en funcionamiento se reducirán los costos de transporte, lo que implica también una futura reducción de los costos que actualmente son facturados a los usuarios.

La nueva Planta de Esterilización está proyectada para atender al cantón Cuenca y a las ciudades de la región austral, aspecto que permitirá contribuir con una solución técnica y ambiental en el corto plazo.

### AGRADECIMIENTOS

Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca "EMAC EP", por el apoyo de su personal para recopilar y procesar la información requerida.

### REFERENCIAS

[1] "Contrato de prestación de servicios para la recolección selectiva y transporte de desechos hospitalarios peligrosos en el cantón Cuenca". EMAC EP. 2014.

[2] "Contrato de prestación de servicios para el tratamiento de desechos hospitalarios peligrosos". EMAC EP. 2014.

[3] "Ordenanza para la Gestión de Desechos Sólidos Infecciosos y Especiales generados en el cantón Cuenca". EMAC EP. 2012.

[4] "Procedimientos para el registro de generadores de desechos peligrosos, gestión de desechos peligrosos previo al licenciamiento ambiental, y para el transporte de materiales peligrosos". Acuerdo No. 026 - MAE. Quito, Ecuador 2008.

[5] Foro Técnico Gestión Integral de Residuos Sólidos en el Ecuador. MAE. 2014.

[6] "Reglamento sustitutivo al Reglamento para el manejo adecuado de los desechos infecciosos generados en las instituciones de salud en el Ecuador". Ministerio de Salud Pública. 2010.





# Aprovechamiento del biogás del relleno sanitario de Pichacay para la generación de energía eléctrica

Arévalo, César V.  
 Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC EP)  
 Cuenca, Ecuador

## Resumen

En este artículo se presenta los resultados teóricos y prácticos de la cantidad de biogás generado en el Relleno Sanitario de Pichacay, Cuenca – Ecuador, utilizando modelos matemáticos y mediciones de campo.

Palabras clave: biogás; electricidad; relleno sanitario; Pichacay

## I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Con el propósito de aprovechar el alto porcentaje de materia orgánica contenida en los residuos sólidos recolectados en la ciudad de Cuenca – Ecuador y dispuestos en el relleno sanitario de “Pichacay”, se realizó una investigación con miras a lograr tres objetivos: estimar mediante modelos matemáticos, la cantidad de biogás que se genera en el relleno sanitario, medir la cantidad real de biogás a través de perforaciones en la masa de basuras y, ajustar los resultados teóricos de los modelos para realizar proyecciones hacia el futuro y determinar el mejor uso para el biogás.

## II. CANTIDADES Y COMPOSICIÓN DE LOS DESECHOS SÓLIDOS DEPOSITADOS EN EL RELLENO SANITARIO

En la siguiente tabla se prestan las cantidades de desechos proyectados que ingresarían al relleno sanitario hasta el año 2012 y, las cantidades reales anuales medidas en la báscula.

TABLE I. INGRESO DE DESECHO 2001 – 2006 (ACTUAL) Y 2007 A 2021 (PROYECCIÓN) [1]

Año	Ingreso Anual (toneladas)
2001	33,262
2002	103,636
2003	106,542
2004	109,247
2005	112,005
2006	114,781
2007	117,600
2008	121,039
2009	123,975
2010	126,963
Año	Ingreso Anual (toneladas)
2011	129,942
2012	132,960
2013	136,658
2014	139,785
2015	142,958
2016	146,129
2017	149,344
2018	153,300
2019	156,625
2020	159,995
2021	163,400
Total	2,680,147

El porcentaje en peso de la materia orgánica contenida en los desechos sólidos, muestra una tendencia a la baja; sin embargo, todavía se mantiene en niveles que superan el 55%, como se aprecia en la Tabla II.

TABLE II. INGRESO DE DESECHO 2001 – 2006 (ACTUAL) Y 2007 A 2021 (PROYECCIÓN) [1]

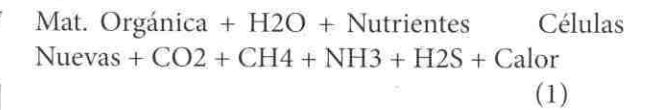
Año	Mat. Orgánica	Papel y cartón	Plásticos
1985	61.90%	7.40%	4.60%
1990	62.94%	13.57%	3.99%
1995	67.81%	11.25%	5.61%
2001	53.80%	7.55%	14.96%
2007	54.49%	8.88%	11.34%
2012	60.70%	5.62%	13.33%

## III. FACTORES TÉCNICOS QUE INFLUYEN EN LA CANTIDAD Y CARACTERÍSTICAS DEL BIOGÁS

Para que un relleno sanitario funcione como un “bioreactor anaerobio” con estándares de eficiencia para obtener como producto residual una buena cantidad de biogás con un alto porcentaje de metano; es necesario controlar, entre otros, los siguientes parámetros técnicos básicos, que el relleno sanitario de Cuenca los gestiona apropiadamente: posee una adecuada impermeabilización del suelo de fondo con arcilla y geomembrana, dispone de un sistema de drenaje de lixiviados que permita la evacuación de los mismos fuera de la masa de basuras, tipo dren francés (geotextil, tubería perforada y piedra), una eficiente compactación para eliminar en la medida de lo posible los espacios vacíos entre los desechos, alcanzando un peso específico de entre 0,8 y 1,0 ton/m<sup>3</sup>; se cubre los desechos diariamente con una capa de tierra compactada de 20 cm de espesor, lo que garantiza condiciones anaerobias, la altura de las terrazas supera los 35 metros y, dispone de un sistema apropiado de cunetas de coronación para reducir el ingreso de las aguas lluvias hacia la masa de desechos.

## IV. BASES TEÓRICAS DE LA DESCOMPOSICIÓN ANAEROBIA DE LA MATERIA ORGÁNICA

En ausencia de oxígeno y bajo la acción de los microorganismos y bacterias anaerobias, se produce la descomposición de la materia orgánica, siguiendo de manera resumida la formulación química que se describe a continuación [2]:



## V. BASES CONCEPTUALES Y FORMULACIÓN MATEMÁTICA PARA ESTIMAR LA GENERACIÓN DE BIOGÁS EN UN RELLENO SANITARIO

Todos los modelos matemáticos utilizan una ecuación diferencial con decaimiento de primer orden, pues conforme pasa el tiempo la materia orgánica en descomposición anaerobia reduce su generación de biogás. La solución de la ecuación resulta ser una integral que transformada en sumatoria se presenta de la siguiente manera:

$$Q = \sum n (1/\%vol)^k ML_0 e^{-k(t-tlag)} \quad (2)$$

Donde:

Q cantidad total del biogás generado (m<sup>3</sup> normales).

n número total de años modelado.

t tiempo en años, desde el inicio de la disposición de los desechos.

tlag tiempo estimado entre el depósito del desecho y la generación del metano.

%vol porcentaje volumétrico estimado de metano en el biogás del relleno.

L<sub>0</sub> volumen estimado de metano generado por tonelada de desecho sólido.

k tasa estimada de descomposición del desecho orgánico.

M masa de desecho en el lugar por año t (toneladas).

Como se puede apreciar, en la fórmula intervienen algunos factores que deben asumirse, dependiendo de las condiciones particulares de cada relleno sanitario. Para el caso de Cuenca – Ecuador, se corrió el modelo utilizando los parámetros de la consultora Carbon Trade Ltda., U.S. México y el de la Guía desarrollada por el IPCC (Comité Internacional Para el Cambio Climático), conforme se presentan en la Tabla III.



TABLE III. PARÁMETROS DE MODELO [1]

Parámetro	Fuente	Valor	Fundamento
L <sub>0</sub>	CTL	90 m <sup>3</sup>	Orgánicos altos con lluvias moderadas
	U.S.EPA México	84 m <sup>3</sup>	Lluvias moderadas
	Guía IPCC	70.8 m <sup>3</sup>	Calculado del contenido de carbono disponible, promedio para otros sitios en Ecuador
K	CTL	promedio 0.062	Calibrado para sitios similares
	U.S.EPA México	0.08	Lluvias moderadas
	Guía IPCC	0.05	Lluvias moderadas
%vol	CTL	50% v/v	Norma aceptada para concentración promedio de metano en biogás de relleno bajo condiciones de extracción
	U.S.EPA México	50% v/v	
	Guía IPCC	50% v/v	

VI. RESULTADOS DE LAS ESTIMACIONES TEÓRICAS

Aplicando la formulación matemática descrita para cada grupo de parámetros, se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla IV y fig. 1.

TABLE IV. RESULTADOS DEL MODELO DE BIOGÁS [1]

Año	Modelo CTL m <sup>3</sup> /hr	Modelo LMOP México m <sup>3</sup> /hr	Modelo IPCC m <sup>3</sup> /hr	Promedio m <sup>3</sup> /hr @ 50%CH <sub>4</sub>
2007	737	756	423	638
2008	836	878	497	737
2009	929	996	571	832
2010	1,015	1,109	643	923
2011	1,097	1,219	715	1,010
2012	1,175	1,324	785	1,095
2013	1,250	1,427	854	1,177
2014	1,322	1,526	923	1,257
2015	1,393	1,623	991	1,336
2016	1,462	1,718	1,058	1,413
2017	1,529	1,810	1,125	1,488
2018	1,595	1,900	1,191	1,562
2019	1,661	1,989	1,257	1,635
2020	1,726	2,076	1,322	1,708
2021	1,790	2,162	1,387	1,780
2022	1,756	2,246	1,452	1,818
2023	1,638	2,074	1,381	1,698
2024	1,446	1,914	1,314	1,558
2025	1,287	1,767	1,249	1,434
2026	1,153	1,631	1,189	1,324
2027	1,040	1,506	1,131	1,225

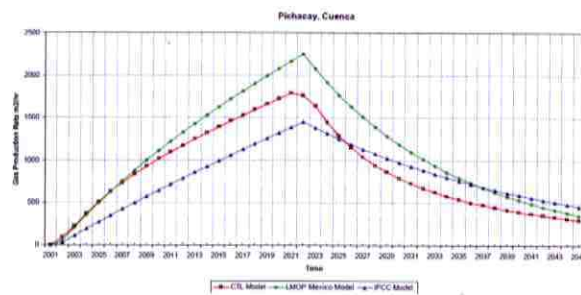


Fig. 1. Línea base de Emisiones de Biogás [1]

VII. ESTUDIOS DE CAMPO DESARROLLADOS POR "EASTERN RESEARCH GROUP, INC. Y CARBÓN TRADE, LTD."

Para determinar con un mayor grado de precisión la cantidad de biogás, que efectivamente se está generando en el relleno sanitario de "Pichacay", con el apoyo de la US EPA (Agencia de Medio Ambiente de los EU), se contrató con el consorcio "Eastern Research Group, Inc. y Carbon Trade, Ltd." la realización de un estudio con esta finalidad. El estudio consistió en captar y bombear el biogás de tres pozos ubicados de manera estratégica, dos de los cuales fueron perforados y el tercero consistió en uno de los pozos ya existentes en el relleno.



Fig. 2. Pruebas de campo

Las características de los pozos y los criterios de selección, se presentan en la siguiente tabla.

TABLE V. CARACTERÍSTICAS DE LOS POZOS [1]

Pozo y tipo	Ubicación	Criterio para su selección	Prof. de perforación	Nivel de lixiviados
1 (perforado)	Plat. 6	Ubicado a 10m de la cara de la plataforma	7.5 m	5.5 m
2 (chimenea de gas pasivo)	Plat. 6	Ubicado en la orilla de la cara de la plataforma		
3 (perforado)	Plat. 6	Ubicado en el centro del sitio	11.0 m	6.5 m

Los resultados de los ensayos de bombeo realizados en el mes de marzo de 2007, se presentan en los siguientes gráficos:

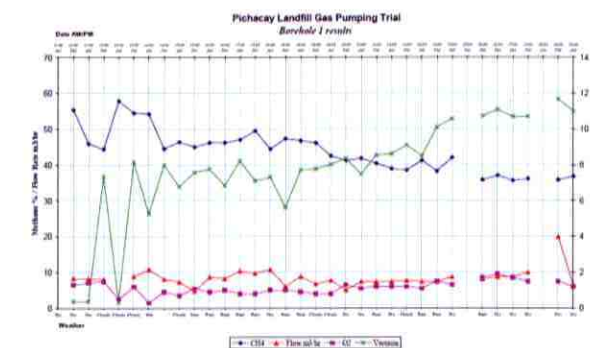


Fig. 3. Resultados del pozo 1 [1]

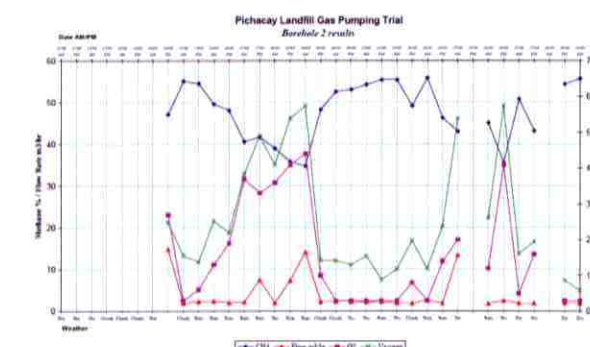


Fig. 4. Resultados del pozo 2 [1]

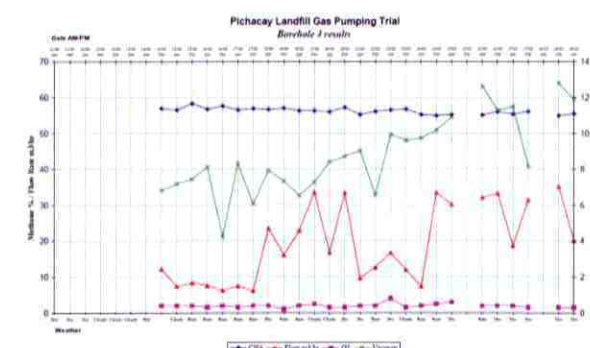


Fig. 5. Resultados del pozo 3 [1]

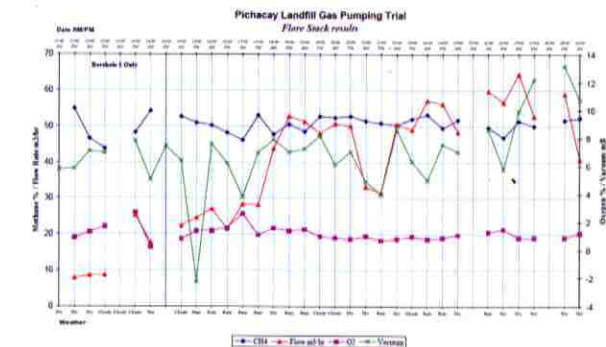


Fig. 6. Resultados del quemador [1]

VIII. DISPONIBILIDAD DE BIOGÁS EN EL RELLENO SANITARIO

Además de los resultados de campo obtenidos, es necesario considerar entre otros los siguientes aspectos técnicos, para establecer la cantidad de biogás que se estaría generando en el relleno sanitario: el área monitoreada con las perforaciones abarca una superficie limitada al 15% de las 2,05 Ha que se hallaban rellenas hasta esa época; el radio de influencia del pozo, es decir hasta qué distancia a la redonda se estima que se capta el gas, dato que depende de la profundidad de los pozos, en el presente caso se estima como razonable un radio de influencia de 15 m y una profundidad útil de 3 m; se consideró también como despreciable la entrada de oxígeno desde la superficie hacia los pozos durante el bombeo debido a la buena capa de cobertura del relleno.

Asumiendo los supuestos descritos se estima que la disponibilidad de biogás en el relleno asciende a:

$$52,2 \text{ m}^3 / \text{h} / 2.120 \text{ m}^2 = 0,0246 \text{ Nm}^3 / \text{h} / \text{m}^2 \quad (3)$$

Como el área estimada y disponible para la extracción de biogás es de 20.500 m<sup>2</sup> se determina que en el mismo se estarían generando alrededor de 504 m<sup>3</sup> / h de biogás con un contenido medio del 50% de metano.

$$0,0246 \text{ Nm}^3/\text{h}/\text{m}^2 \times 20.500 \text{ m}^2 = 504 \text{ m}^3/\text{h} @ 50\% \text{ metano} \quad (4)$$

IX. AJUSTES A LOS VALORES CALCULADOS DE LAS CANTIDADES DE BIOGÁS Y POTENCIAL DE ENERGÍA TÉRMICA

Con el valor obtenido en los ensayos de campo, se procedió a corregir la cantidad estimada a través de



los modelos matemáticos (promedio) y a proyectar las cantidades hacia el futuro. Adicionalmente, considerando un poder calorífico del metano de 35,5 MJ / m<sup>3</sup> y dado que el contenido de metano en el biogás del relleno es del 50% se ha estructurado la siguiente tabla que permite conocer el potencial de energía térmica aprovechable existente en el relleno sanitario de Cuenca.

TABLE VI. ESTIMADO DE ENERGÍA TERMAL DISPONIBLE [1]

Año	Promedio m <sup>3</sup> /hr disponible @50% CH <sub>4</sub>	Energía Térmica MJ/hr	Energía Térmica mmBTU/hr	Energía Térmica kW
2007	504	8,946.0	8,473	2,485.0
2008	562	9,975.5	9,448	2,771.0
2009	618	10,969.5	10,389	3,047.1
2010	671	11,910.3	11,280	3,308.4
2011	721	12,797.8	12,121	3,554.9
2012	770	13,667.5	12,944	3,796.5
2013	817	14,501.8	13,734	4,028.3
2014	862	15,300.5	14,491	4,250.1
2015	907	16,099.3	15,247	4,472.0
2016	950	16,862.5	15,270	4,684.0
2017	992	17,608.0	16,676	4,891.1
2018	1,033	18,335.8	17,366	5,093.3
2019	1,074	19,063.5	18,055	5,295.4
2020	1,115	19,791.3	18,744	5,497.6
2021	1,154	20,483.5	19,400	5,689.9
2022	1,168	20,732.0	19,635	5,758.9
2023	1,092	19,383.0	18,357	5,384.2
2024	999	17,732.3	16,794	4,925.6
2025	919	16,312.3	15,449	4,531.2
2026	848	15,052.0	14,256	4,181.1
2027	786	13,951.5	13,213	3,875.4

**X. CAPACIDADESTIMADA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

Asumiendo que se utilice un motor de bujías para la generación de energía eléctrica, y se considere las bajas en la eficiencia de estos equipos al trabajar a la altura de “Pichacay” (2700 msnm) y, que el equipo esté disponible un 85% del tiempo total de trabajo al año, se estructuró la siguiente tabla, en la cual se presentan los valores esperados de generación de energía eléctrica.

TABLE VII. ESTIMADO DE ENERGÍA TERMAL DISPONIBLE [1]

Año	Promedio m <sup>3</sup> /hr disponible @50% CH <sub>4</sub>	Capacidad en Bruto kW	Capacidad Neta kW	Exportado MWH <sup>1</sup> @5% carga parasita
2007	504	944	896	6,671
2008	582	1,090	1,035	7,706
2009	656	1,229	1,167	8,689
2010	728	1,363	1,294	9,635
2011	797	1,493	1,418	10,558
2012	864	1,618	1,537	11,444
2013	929	1,740	1,653	12,308
2014	992	1,858	1,765	13,142
2015	1,054	1,974	1,875	13,961
2016	1,115	2,089	1,984	14,772
2017	1,174	2,199	2,089	15,554
2018	1,232	2,308	2,192	16,321
2019	1,290	2,416	2,295	17,088
2020	1,348	2,525	2,398	17,855
2021	1,404	2,630	2,498	18,600
2022	1,434	2,686	2,551	18,994
2023	1,339	2,508	2,382	17,736
2024	1,229	2,302	2,186	16,276
2025	1,132	2,120	2,014	14,996
2026	1,045	1,957	1,859	13,842
2027	967	1,811	1,720	12,807

**XI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

• Se analizó varias alternativas para utilizar la capacidad térmica del biogás: distribución a familias colindantes al relleno sanitario, envasado y venta del gas licuado, uso en hornos de ladrillos, evaporación de los lixiviados y, generación de energía eléctrica. De estas opciones resultó ser la más recomendable la generación de energía eléctrica, por su sostenibilidad económica y significativas ventajas ambientales.

• Esta investigación permitió a la EMAC EP conformar, previo un concurso internacional, una empresa de economía mixta con BGP Engineers de Holanda para concretar la construcción y operación de una planta de generación de energía eléctrica de 2 MW de capacidad, con una inversión de alrededor de USD \$ 2'700.000,00.

• La cantidad de energía que suministrará la planta, abastecerá aproximadamente a 8.000 hogares que consuman alrededor de 180 Kwh/mes.

• A través de la combustión del metano en los motores para la generación eléctrica, se reducirán las emisiones anuales de CO<sub>2</sub>eq del relleno sanitario en más de 60.000 toneladas, lo que equivale a sacar de circulación alrededor de 14.000 vehículos tipo Gran Vitara SZ por año.

**REFERENCIAS**

[1] Eastern Research Group, Inc., Carbon Trade, Ltd., “Estudio de Prefactibilidad del Potencial del Biogás: Relleno Pichacay”. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA).Cuenca, 2007.  
 [2] G. Tchobanoglous, H. Theisen, and S. Vigil, “Gestión Integral de Residuos Sólidos,” McGRAW-HILL. Mexico, vol. 1, Febrero 1998 .



## Cuenca Ciudad Digital

Una propuesta de Ciudad

Boris Piedra Iglesias  
Gerencia de Telecomunicaciones  
Empresa de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca, ETAPA EP  
Cuenca, Ecuador  
gpiedra@etapa.net.ec

### Abstract

This paper briefly describes the concept of digital city, its characters and experiences throughout the world, Latin America and Ecuador. A general proposal for a strategy to build Cuenca as a digital city is given.

**Keywords**—digital city; smart city; ICT

### Resumen

Este documento describe brevemente el concepto de ciudad digital, sus características, experiencias a lo largo del mundo, Latinoamérica y el Ecuador. Una propuesta general sobre una estrategia para construir Cuenca como una ciudad digital está dada.

**Palabras Clave**—ciudad digital; ciudad inteligente; TIC

## I. INTRODUCCIÓN

Enrique Peñalosa, ex alcalde de Bogotá, dijo: “Una ciudad avanzada no es aquella donde los pobres pueden moverse en auto, sino una donde los ricos usan el transporte público”. Esta frase no precisamente dirigida hacia el uso de las TIC y su incidencia en la vida diaria de una persona, grafica en su totalidad la orientación que debe dársele al uso de la tecnología en la construcción de una nueva estructura de ciudad, orientada hacia el desarrollo del ser humano en su integridad y dirigida hacia democratizar todos sus servicios. En el caso de las TIC, esto aplica al acceso al Internet y otros avances telemáticos.

La idea de ciudad digital no está dirigida hacia la búsqueda de un esquema de convivir urbano en el que la tecnología sea herramienta indispensable en cada faceta de la vida de una persona, más bien su orientación lleva a desarrollar un esquema, en el que la tecnología sea un medio de apoyo para facilitar la vida diaria del ciudadano.

Este trabajo muestra el concepto general y los elementos básicos de la propuesta que desarrolla la Empresa de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca, ETAPA EP, para convertir a Cuenca en la primera verdadera ciudad digital en el Ecuador.

## II. CIUDAD DIGITAL O CIUDAD INTELIGENTE?

El concepto de Ciudad Digital es frecuentemente confundido y utilizado indistintamente con el concepto de Ciudad Inteligente. Sin caer en el absurdo de pretender una definición exacta de estos términos, la cual consideramos no existe, y más bien, con el fin de establecer límites claros a estas ideas y ubicar a la presente propuesta dentro de su real alcance, se tratará de establecer una conceptualización de los mismos, remarcando sus diferencias.

Ciudad Digital no es una plataforma tecnológica implementada por decisión de una administración pública. Es un proceso de aprendizaje en el que se combina tecnología, capacidades, liderazgos y sobre todo los objetivos que pretenden alcanzar todos los ciudadanos

La definición dada por la Asociación Hispanoamericana de Centros de Investigación y

Empresas de Telecomunicaciones (AHCET) en su Manual para el Desarrollo de Ciudades Digitales en Iberoamérica, es la que más se apega al alcance de la presente propuesta: “Aquella en la que, utilizando los recursos que brindan la infraestructura de telecomunicaciones y de informática existentes, entre ellas la denominada Internet, brinda a sus habitantes un conjunto de servicios digitales a fin de mejorar el nivel de desarrollo humano, económico y cultural de esa comunidad, tanto a nivel individual como colectivo”.

El concepto de ciudad digital no sólo se basa en adquirir servicios en portales Web, sino va más allá, hacia el objetivo de construir una plataforma transversal que usa a las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) como eje de desarrollo de todos los sectores sociales en cualquier aspecto posible, como salud, servicios públicos, comunicación y cooperación entre ciudadanos, comercio y educación.

Mariano Gamboa, Coordinador General de la Coordinación General de Servicios de Tecnologías de Información y Comunicaciones del CINVESTAV (Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional) en México, al referirse al desarrollo de ciudades digitales señala que “La otra cuestión en juego tiene que ver con la ubicuidad, cuya finalidad es que cualquier persona sin importar el momento, lugar y dispositivo pueda acceder a los portales Web, realizar tareas y comunicaciones sin restricción para obtener todo tipo de información así como generar conocimiento”.

Los beneficios de convertir a una ciudad en ciudad digital abarcan todas las áreas, administración pública, educación, salud, seguridad y economía del municipio, por solo mencionar unos ejemplos.

En el caso de la modernización de la administración pública, se trata de transformarla con la integración, vía sistemas telemáticos, de todas las entidades directas e indirectas. Se deben integrar las estructuras tributaria, financiera y administrativa; aumentar la recaudación tributaria; mejorar la fiscalización; generar un acceso más rápido a la información y servicios; y propiciar la comunicación vía VoIP (voz sobre protocolo de Internet).

En salud, la administración integrada de los centros de asistencia médica y la interconexión

con servicios de emergencias, o mediante el uso de nuevas tecnologías, tales como: videoconferencia y telemedicina permiten mejorar, ostensiblemente, los niveles de atención al ciudadano.

En seguridad, la tecnología permite mejorar los índices de seguridad por medio de la interconexión de instituciones como la policía y bomberos o la instalación de cámaras de vigilancia por Internet, en los puntos más vulnerables de la ciudad.

En lo económico, el acceso a Internet permite a los micro y pequeños empresarios generar más negocios o desarrollar sus actividades a través de la una mejora en la comunicación con entidades gremiales o empresarios de otras regiones por medio de Internet o de telefonía VoIP.

El teletrabajo permite reforzar el ideal de vivir rodeado de un ambiente agradable y con ello definir una mejor calidad de vida. De igual manera, esto afecta positivamente al transporte, congestión vehicular y afectaciones ambientales.

El concepto de Ciudad Inteligente lo asumiremos más bien desde el punto de vista dado por el Centro de Investigación de Telecomunicaciones (Cintel), que la considera como “Aquella urbe caracterizada por el uso intensivo de las tecnologías en la creación y mejoramiento de los sistemas que componen la ciudad”. Esta definición muestra que el término “Ciudad Inteligente” tiene su centro en el desarrollo tecnológico de una ciudad y no en el concepto filosófico que define el modo de vida en una Ciudad Digital. En una Ciudad Inteligente se da fortaleza a la implementación de tecnologías que permiten sistemas tales como: los siguientes a citarse como ejemplos:

- Dispositivos que en tiempo real miden el tráfico sobre diferentes vías para recomendar las mejores opciones a los conductores.
- Dispositivos que marcan en tiempo real la ocupación de los estacionamientos públicos.
- Geolocalización en tiempo real de los vehículos de transporte colectivo.
- Dispositivos que miden los niveles de carga de los contenedores de basura para optimizar las rutas de recolección.



- Dispositivos que miden el nivel de contaminación ambiental.
- Medidas en tiempo real de alertas sobre desastres naturales.
- Video seguridad en las ciudades, tanto en lugares públicos como en edificaciones privadas.

Concluiremos este planteamiento de definiciones básicas con una frase que muestra el verdadero camino que deben seguir las sociedades que deciden vivir en una ciudad digital, expresada por Alfonso Vegara Gómez, analista de la influencia de la tecnología en la sociedad, en su artículo "La Ciudad Digital": "En el siglo XXI la condición de la urbanidad civilizada se puede basar menos en la acumulación de objetos y más en el flujo de información, menos en la centralidad geográfica y más en la conectividad electrónica, menos en el aumento del consumo de los recursos escasos y más en su gestión inteligente. Descubriremos cada vez más que podemos adaptar los lugares existentes a las nuevas necesidades conectando de nuevo el equipamiento, modificando la informática y reorganizando las conexiones red, sin necesidad de demoler las estructuras físicas y construir otras nuevas".

### III. CONSTRUCCIÓN DE UNA CIUDAD DIGITAL

En términos muy generales, la construcción de una ciudad digital requiere de ejes muy específicos, sin que esta afirmación pretenda constituirse en la propuesta de una receta única:

1. Diagnóstico de la ciudad donde se implementará el proyecto.
2. Establecimiento de un plan estratégico para implementación del concepto de ciudad digital.
3. Desarrollo de infraestructura.
4. Creación de contenidos aplicables a la realidad y necesidades locales acompañados de los sistemas digitales correspondientes.
5. Difusión y capacitación.

La importancia del desarrollo de estos ejes con una visión fundamentalmente local es enorme, pues el riesgo de querer imponer soluciones tecnológicas llave en mano a través de soluciones concebidas muchas veces para otras realidades, sin evaluar convenientemente la integración y articulación de las mismas con las existentes, podría conducir al rechazo de la población.

La construcción de la ciudad digital involucra a todos los miembros y entes que conforman la sociedad, haciéndoles desarrollar papeles totalmente activos en las definiciones e implantación de modelos. En resumen, los agentes involucrados son:

- El Gobierno Local quien actúa como verdadero motor de este tipo de iniciativas y debe actuar como desencadenante de su puesta en marcha. Es el responsable del proyecto, impulsor y encargado de la gestión.
- Instituciones Gubernamentales por su papel de complementar al Gobierno Local en la búsqueda de satisfacer las diferentes necesidades de los ciudadanos.
- Ciudadanos.
- Actores Económicos no solamente como beneficiarios sino como elementos activos en los procesos de financiamiento a largo plazo del proyecto.
- Operadores de Redes y Servicios de Telecomunicaciones.
- Proveedores de Contenidos.
- Medios de Comunicación y Agencias de Monitoreo de Información.
- Universidades y en general centros educativos.

En términos generales, el desarrollo de un proyecto de ciudad digital, parte de la detección de los servicios requeridos por los ciudadanos, continúa con la implementación de la infraestructura necesaria para brindar esos servicios y termina con el aseguramiento de los métodos de acceso indispensables para todos los habitantes.

Nuevamente a manera de referencia, se describe a continuación un Modelo Básico de Implantación

de un Proyecto de Ciudades Digitales, desarrollado por la Asociación Española de Usuarios de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información (AUTELSI).

En términos generales, el modelo se desarrolla en los siguientes pasos:

1. Nombramiento de la Comisión Organizadora bajo el liderazgo del Gobierno Local.
2. Análisis de aspectos regulatorios previos.
3. Diagnóstico de Servicios.

- 3.1 Definición de las necesidades básicas de los ciudadanos en:

Servicios Administrativos relacionados al Gobierno Local vinculados a Derechos Ciudadanos, Gestión Financiera y Trámites y Licencias.

Servicios Públicos vinculados a Información, Turismo, Cultura y Ocio, Educación y Formación, Promoción Económica y Empleo, Sanidad, Movilidad, Participación y Seguridad.

Servicios Privados vinculados a Teletrabajo, Entorno Doméstico y Banca Online.

- 3.2 Definición de las necesidades avanzadas de los ciudadanos sobre los mismos servicios definidos anteriormente.

4. Diagnóstico de Infraestructuras.

- 4.1 Diagnóstico de Infraestructura de telecomunicaciones.

- 4.2 Diagnóstico de hardware y software.

5. Diagnóstico de capacidades de acceso para los ciudadanos.

- 5.1 Diagnóstico de acceso en espacios públicos, principalmente en centros de comunicación o telecentros y zonas de acceso público inalámbrico.

- 5.2 Diagnóstico del acceso privado.

6. Elaboración de un informe inicial.

7. Definición de áreas de trabajo y necesidades de asesoría externa.

8. Definición del esquema de financiamiento.

9. Definición del Plan de Acción.

10. Definición del Plan de Difusión y Capacitación.

11. Ejecución.

### IV. PARÁMETROS PARA LA MEDICIÓN DEL AVANCE EN LA CONSTRUCCIÓN DE UNA CIUDAD DIGITAL

Los aspectos básicos para medir el grado de avance que ha tenido una ciudad en su transformación a ciudad digital son: economía, movilidad, medioambiente, habitantes, forma de vida y administración.

Como nos habíamos permitido anticipar en las definiciones generales, la disponibilidad y la calidad de la infraestructura de las TIC no son el único rasgo importante de una ciudad digital ni la única característica que ayuda a definir este concepto. Aspectos posiblemente más importantes son el papel que cumple el capital humano, la educación, y la capacidad económica que tiene la población.

#### Modelo de Evaluación de la LEILAC

A modo de referencia, la Red de Living Labs y Espacios de Evaluación de América Latina y el Caribe, LEILAC, ha desarrollado los siguientes criterios de certificación y de evaluación de una ciudad digital inteligente y de un espacio de innovación de desarrollo económico, cultural y social:

1. El Territorio

- 1.1. La cartografía de las competencias del territorio.



- 1.2. Los flujos e intercambios territoriales de saberes y conocimientos.
  - 1.3. La economía local de los enlaces: El territorio y sus socios locales, regionales y nacionales.
  - 1.4. La cooperación descentralizada y sus objetivos temáticos a nivel internacional
2. La sociedad Civil: Lugar del ciudadano en el proceso de innovación
    - 2.1. El mapa de las infraestructuras, de los sitios de innovación dedicados al ciudadano y los nuevos lugares de acceso a las redes.
    - 2.2. Los lugares dedicados al acompañamiento de los proyectos de la sociedad civil.
    - 2.3. Los lugares dedicados a reflexiones comunes con investigadores y empresas sobre el futuro de su territorio.
    - 2.4. Los laboratorios vivos existentes y en construcción
  3. Las Empresas y su puesta en red
    - 3.1. Los tecno parques y parques científicos
    - 3.2. Las redes empresariales y las herramientas de acompañamiento (plataformas, geo localizaciones...).
    - 3.3. Las estrategias de creación de empresas y generación de nuevos empleos, incubadoras, semilleros y sus conexiones.
    - 3.4. Los clústeres y la clusterización de los territorios
  4. La Investigación y las Universidades
    - 4.1. El mapa de los lugares de educación, formación, investigación, universidades privadas y públicas.
    - 4.2. La investigación y los estudios sobre el territorio y su futuro, sobre la innovación incremental, abierta y la economía del conocimiento.

- 4.3. Las relaciones entre universidades y centros de formación con el tejido empresarial.
- 4.4. Las relaciones con los actores territoriales, alcaldías y organizaciones regionales y nacionales.

## V. EXPERIENCIAS A NIVEL MUNDIAL

Europa, Norteamérica y Asia han sido, en ese orden, las regiones que más han impulsado la creación de ciudades digitales. Latinoamérica, sin embargo, no ha estado demasiado atrás en esta tentativa.

El calificativo de primera experiencia de "ciudad digital" se le otorga a Cleveland, EE UU en donde en 1986 se implementa Cleveland Free Net, como un espacio para proveer servicios de telemedicina y tele-asistencia, interconectando al personal sanitario y habilitando el acceso de todos los habitantes a información y servicios de salud, utilizando únicamente módems y computadoras, sin la intervención de Internet. En Europa, la primera Ciudad Digital surgió en Ámsterdam, Holanda en 1994 con el establecimiento de De Digitale Stad, con manifiesto compromiso de la administración local en la promoción, puesta en marcha y mantenimiento de un foro ciudadano. En Iberoamérica, se crea en 2001 la Red Iberoamericana de Ciudades Digitales con el objetivo de promover el desarrollo de la Sociedad de la Información a través de la cooperación entre ciudades, articulando al conjunto de actores claves: gobiernos nacionales y locales, sector privado, organizaciones, municipios y agentes locales. En Asia, el primer proyecto de Ciudad Digital se constituyó en Singapur en 1992 aunque muy poco después se desarrollaron importantes iniciativas en Corea y en Malasia.

De Digitale Stad pretendía conectar el mundo digital con el mundo de la política, desarrollar democracia a través de medios digitales, acceso público al Internet y conectar diferentes organizaciones. Al final del proceso se llegó a la conclusión de que, únicamente, el primero de los objetivos indicados no había sido alcanzado.

Dentro de la Comunidad Europea, España ha reportado importantes experiencias. Barcelona, ha

alcanzado niveles sumamente altos de participación ciudadana en la plataforma tecnológica ciudadana. Servicios inteligentes de movilidad y transporte, de la gestión energética de alumbrado o de utilización del agua, sistemas de acceso público a las gestiones administrativas, los trámites burocráticos o sistemas digitales de gestión de los servicios sanitarios y salud están al orden del día en toda la urbe. Sistemas tan avanzados como de seguimiento de pacientes crónicos con la conexión de datos entre hospitales, centros de salud primaria, grupos de investigación y laboratorios han sido implementados. Para un habitante de Barcelona ya no es extraño saber cuánto tiempo tardará el autobús en llegar a su parada (en las pantallas informativas o consultando desde el móvil a través del código de la parada), la posibilidad de detectar sitios de parqueo libres, las luminarias públicas que alumbran en función de las condiciones ambientales, etc. Tampoco es extraño realizar una visita virtual a los museos de la ciudad.

Ciudades medianas o pequeñas como Rivas en España, iniciaron su conversión a Ciudad Digital, a mediados de la década anterior con la implementación de infraestructura de acceso a Internet. En la actualidad, tiene una red que une a todas las entidades públicas y sistemas inalámbricos que permiten el acceso a toda la población en zonas públicas, tiene un sistema de seguridad centralizado, semáforos inteligentes, telefonía IP para todas las entidades del ayuntamiento y un sistema inteligente de manejo de los sistemas públicos de iluminación.

Otras ciudades españolas iniciaron hace poco su proceso de conversión. Málaga, Santander y Zaragoza lanzaron en el 2011 su Proyecto "I+D Ciudad 2020", con una inversión superior a los 20 millones de dólares. Sobre una plataforma basada en Internet, se integraron las nuevas herramientas desarrolladas en el proyecto, para facilitar la gestión energética en edificios y espacios públicos, la gestión del transporte y la movilidad, y la sostenibilidad medioambiental, los tres aspectos que más impacto tienen en la calidad de vida del ciudadano. Gracias a las nuevas soluciones de gestión diseñadas, los responsables de la ciudad disponen de información integrada en tiempo real sobre la ciudad y sus diferentes recursos, que pueden ver sobre el propio mapa de la localidad. De esta forma, pueden tomar decisiones con una mayor

agilidad y eficacia. El proyecto también desarrolló una aplicación para dispositivos móviles desde la que los ciudadanos pueden acceder de forma sencilla e intuitiva a las diferentes herramientas que ofrece Ciudad 2020, así como a otras externas relacionadas con la ciudad en ámbitos como ocio, turismo, educación, sanidad, etc.

En el 2011, Boston fue elegida como la ciudad digital número uno de los Estados Unidos. En esta ciudad se han desarrollado aplicaciones como aquella que informa a los teléfonos móviles sobre semáforos dañados, una red que informa sobre oportunidades de trabajo para jóvenes, formularios con quejas en línea sobre problemas en la infraestructura pública y otras. Con la ayuda de una subvención de 4,3 millones USD dada por la Administración Nacional de Telecomunicaciones e Información (NTIA), la ciudad ha invertido grandes sumas en un programa que ofrece formación, ordenadores y oportunidades a las comunidades con menor conectividad. El dinero ha financiado tres programas de formación de fondo sobre cómo la conexión de banda ancha de alta velocidad a Internet puede mejorar la calidad de vida y las perspectivas de trabajo. Se ha subsidiado equipamiento y capacitación a toda la población, favoreciendo a los sectores social y económicamente marginados.

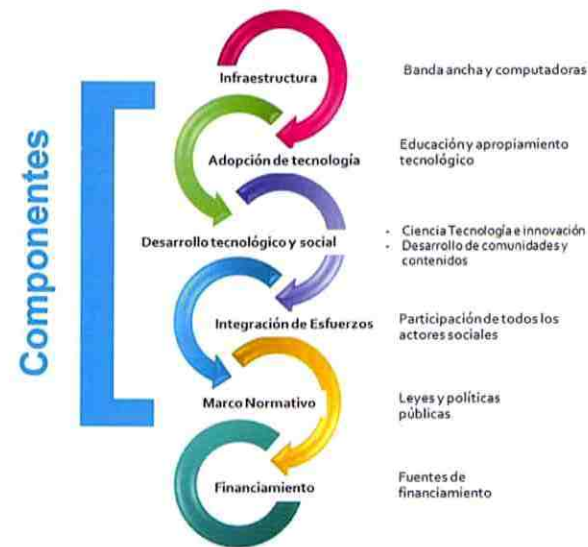
En Asia, en ciudades como Tokio, el sistema de alertas tempranas de sismos está conectado al servicio móvil de mensajería de texto. El gobierno electrónico es un modelo de gestión en Seúl donde, a través del sistema Oasis, los ciudadanos envían sugerencias en línea sobre políticas públicas. Masdar, en Emiratos Árabes, es una urbe futurista en construcción, que estará lista en el 2020 y su eficiencia gira entorno a tecnologías limpias y baja huella ecológica.

New Songdo City, cerca de Seúl, es una de las ciudades digitales más grandes del mundo.

En Latinoamérica, México y Colombia, países con realidades sociales similares al Ecuador han implementado procesos de gran éxito a pesar de las innegables restricciones económicas.

Los componentes del proyecto México Capital Digital se describen en la siguiente figura:





La coordinación del Proyecto en México DF lo lleva el Consejo para el Desarrollo del Distrito Federal como Ciudad Digital y del Conocimiento. Este organismo lo forman representantes de la Administración Pública del DF y miembros del sector académico, sociedad civil e iniciativa privada.

Medellín es la segunda ciudad más grande de Colombia, con cerca de 2,5 millones de habitantes. Un total de 1,5 millones se han beneficiado de Medellín Digital. Medellín Digital trabaja con un equipo de cerca de 50 personas en cuatro pilares claves que le permiten llevar a cabo su misión. Esos pilares son Conectividad, Apropiación, Contenidos y Comunicación Pública. El pilar de Conectividad tiene como objetivo garantizarle a la comunidad una conexión eficiente como el primer paso en la construcción de territorio digital. El componente de Contenidos de Medellín Digital, acerca a la comunidad a la tecnología y a los medios digitales. Sus sitios permiten que los usuarios interactúen por medio de blogs, wikis, chats, redes sociales y otras aplicaciones. El pilar de Comunicación Pública hace la labor de visibilizar el trabajo de todas las áreas de Medellín Digital y de ampliar su alcance para que su trabajo no sea conocido no sólo en la ciudad, sino en la región, el país y el mundo.

Desde Medellín Digital existe el convencimiento de que hay 13 áreas temáticas a través las cuales se puede propiciar y profundizar en el desarrollo de una ciudad digital: salud, educación, emprendimiento, movilidad, turismo, gobierno,

seguridad, cultura, prevención, comunidades, contenidos, innovación y participación.

El avance de otros países latinoamericanos tampoco es despreciable.

En Perú, el distrito de Los Olivos en Lima se convirtió en el 2011 en la primera ciudad digital de ese país.

Para la implementación total de este proyecto, se ha tendido 90 kilómetros de fibra óptica, con el objetivo de interconectar a 60.000 viviendas de Los Olivos con colegios, comisarías, sedes municipales, centros médicos y hospitales.

También permite acceder a la base de datos del distrito. Se han instalado 33 puntos de interconexión, mediante fibra óptica, con la base de datos municipal ubicada en un complejo preparado para la investigación tecnológica, la capacitación para el trabajo y la creación de empresas. A la red se incorporaron, paulatinamente, las diferentes instituciones de Los Olivos, lo que permite intercambiar datos y compartir una serie de recursos, además de brindar servicios de alta calidad a los usuarios.

En Argentina, uno de los proyectos más prometedores desarrollados en ciudades medianas ha sido puesto en marcha en la ciudad de Rosario. Rosario Ciudad Digital se basa en un modelo de gestión que lleva el estandarte de democratizar el acceso a la información; de promover y estimular el desarrollo social, económico y educativo; de mejorar la calidad de los servicios públicos, de mejorar el crecimiento de las áreas comprometidas con un alcance a toda la población en su conjunto.

En Brasil, aparte de los excelentes resultados en las principales metrópolis, los desarrollos alcanzados en ciudades medianas y pequeñas son destacables. En el Estado de Bahía, uno de los estados de menor desarrollo relativo, dos años después de haberse iniciado el programa de ciudades digitales, se inauguró, en Vitória da Conquista, la primera Ciudad Digital. Se inauguraron también de manera simbólica otras ocho ciudades digitales en Guanambi, Itaberaba, Itabuna, Juazeiro, Lauro de Freitas, Nilo Peçanha, Pirai do Norte e Uruçuca. Todos esos municipios cuentan con una red de fibra óptica para conectar a internet a las entidades públicas municipales y los espacios de

acceso gratuito para la población. A más de eso, las ciudades también disponen de aplicativos para modernizar la gestión de las prefecturas y el acceso a servicios públicos. Los principales hospitales cuentan con conexión a internet que será usada para transmitir exámenes de salud de los pacientes atendidos que vienen de otras ciudades, lo que evita el desplazamiento para la retirada de los resultados. En estos proyectos se definieron tres ejes principales para la preparación del trabajo: la arquitectura de la red, el diseño de la gestión y el diseño del control social. Se definieron cuatro áreas de actividad: .gov, encargada de desarrollar los servicios públicos electrónicos y facilitar el gobierno electrónico; .edu, encargada de desarrollar nuevas metodologías pedagógicas en sus aulas informáticas a través de la adaptación de los parámetros curriculares actualmente oficiales; .org, encargada de poner en marcha centros de telecomunicaciones, ofrecer diversos servicios y desarrollar labores formativas; y .com, encargada de ofrecer a la comunidad acceso a internet a precios asequibles. El tercer punto fundamental, control social, se ha ejercido a través de la formación de un Consejo Asesor Municipal con el cometido de estudiar el impacto territorial de los cambios en la ciudad.

## VI. EXPERIENCIAS EN ECUADOR

Ecuador no ha estado lejano a los procesos de construcción de ciudades digitales, a través de proyectos desarrollados a lo largo del país pero, principalmente, en las dos grandes ciudades, Guayaquil y Quito.

En el presente año, ha tomado fuerza el proyecto Guayaquil Ciudad Digital como un proyecto municipal con el fin de proveer a la ciudad de varios servicios digitales como acceso a internet gratuito en 6.000 sectores de la ciudad, dotar a escuelas y colegios fiscales y fiscomisionales de computadoras para el acceso a esta tecnología, además del proyecto de la entrega de tablets a los bachilleres recién graduados. Está programada la licitación internacional para la instalación de 6000 puntos de servicio de Internet gratuito (wifi) en toda la ciudad, proyecto que se espera concluir en el 2019. En Guayas, según datos del INEC, solo el 40% de la población tiene acceso a Internet.

Se ha implementado el primer servicio de Telemedicina del país permitiendo dar servicios especializados de salud al ciudadano en sitios remotos donde no podían beneficiarse de este tipo de servicio. El servicio de telemedicina permite a los pacientes de los hospitales municipales recibir diagnósticos y tratamientos a distancia de especialistas de otros recintos hospitalarios eliminando el problema de las distancias y acortando los tiempos en las consultas. La municipalidad de Guayaquil tiene planteado instalar 8 máquinas similares a cajeros automáticos para que los ciudadanos puedan realizar los trámites ordinarios que se realizan con el municipio; este servicio prevé servir, también, como una fuente de consulta sobre todos los servicios que el cabildo ofrece.

En Quito, se está desarrollando un proceso de construcción y ejecución de la Agenda Digital y Socialmente Innovadora Quito 2022. Esta Agenda se considera la herramienta estratégica del Distrito Metropolitano para lograr el crecimiento de la ciudad de forma planificada y organizada apuntalada en las Tecnologías de la Información y la Comunicación. Dentro de esta agenda, el concepto de Ciudad digital con un horizonte en el año 2022 es un eje central. Esta visión, bajo un proceso de 360° no implica reflejar sólo la infraestructura tecnológica, sino que empodera y activa procesos relacionados con el impulso de la economía digital, la democratización y acceso a las Tecnologías de la Información, la activación y retención de talento, la modernización de la administración con servicios electrónicos, uso de la tecnología en los procesos de transparencia y gobierno abierto, la activación de sectores estratégicos como el turismo o el impulso de la innovación social entre otros.

El Municipio de Quito trabaja en la vinculación de herramientas tecnológicas para el acceso y los trámites en línea. En el Distrito Metropolitano, la cobertura de Internet es de 30%.

En Loja se dio inicio hace pocas semanas a su propia tentativa de construir la ciudad digital. En diferentes parques de Loja, se prevé que los ciudadanos podrán acceder a internet de forma gratuita. Este proceso se ampliará posteriormente a paradas de transporte público y barrios. El Municipio de Loja en convenio con una empresa privada, dotaron desde el pasado septiembre de internet gratuito a las plazas, parques y ocho escuelas municipales. Se ha planteado como



objetivo que, hasta el 2025, Loja sea una ciudad digital e inteligente.

Como ejemplo de proceso en ciudad pequeña, en septiembre del 2012, la Alcaldía de Atuntaqui, anunció que esa ciudad se convertirá en la primera ciudad del país con un sistema de conectividad integral.

Un problema sustancial en los proyectos de muchas ciudades pequeñas y medianas radica en el hecho de que el liderazgo lo están tomando empresas operadoras de telecomunicaciones y no los Gobiernos Locales, lo cual desde el inicio dificultará el proceso de participación y apropiación ciudadana.

La experiencia de Cuenca, en este tema, se reduce al equipamiento de entidades educativas y un acceso a Internet hasta la fecha limitado a algunas zonas públicas. El camino hacia la ciudad digital está todavía por trazarse.

## VII. ALCANCE DEL PROYECTO CUENCA CIUDAD DIGITAL

En un escenario mundial cambiante principalmente por el motor que representan las Tecnologías de Información y Comunicación, la decisión de convertir a Cuenca en Ciudad Digital es impostergable.

Bajo este contexto, el Proyecto Cuenca Ciudad Digital pretende con horizonte al año 2019 construir el esquema social, cultural, económico y tecnológico que permita calificar a Cuenca como una ciudad en la que "utilizando los recursos que brindan la infraestructura de telecomunicaciones y de informática existentes, entre ellas la denominada Internet, brindará a sus habitantes un conjunto de servicios digitales a fin de mejorar el nivel de desarrollo humano, económico y cultural de la comunidad, tanto a nivel individual como colectivo". El desarrollo de las plataformas tecnológicas que permitan convertir a la ciudad en Ciudad Inteligente deberá ser un trabajo a desarrollarse en forma paralela o a futuro por las empresas de la Corporación Municipal y la iniciativa privada.

Bajo el liderazgo del Municipio de Cuenca y con la participación como actores de las entidades gubernamentales que apoyan a los servicios locales, de las universidades y entidades académicas, de la industria de contenido, de las entidades responsables de la seguridad pública, de la iniciativa económica privada, de los medios de comunicación, de la ciudadanía en general y contando a ETAPA EP, el operador público municipal de telecomunicaciones, como facilitador del proceso, el proyecto pretende alcanzar en este quinquenio:

- El desarrollo de los aplicativos y contenido digital que permitan al ciudadano acceder a todas las facilidades y servicios de las empresas públicas municipales y del Gobierno Local, a través de sus dispositivos de acceso a las redes y particularmente a Internet. Igualmente, se deberán desarrollar los aplicativos necesarios para facilitar el vivir diario del ciudadano originados en actividades de la iniciativa privada.

- El desarrollo y ejecución de un programa de capacitación masiva sobre el uso de las TIC, que permita que toda la ciudadanía esté familiarizada con el uso de las plataformas tecnológicas a implementarse. Este programa debe instituirse como un mecanismo permanente dentro de la acción del Gobierno Local. Deberá darse trato preferente a los sectores tradicionalmente excluidos de la tecnología por factores como edad, género, ubicación geográfica y condiciones económicas.

- El desarrollo e implementación de la infraestructura de telecomunicaciones y hardware necesario que garantice la provisión de los servicios soportados sobre la plataforma tecnológica y el acceso de la población a los mismos. Esto en lo referente al concepto de ciudad digital.

- La implementación de las soluciones tecnológicas más importantes en el camino de construcción de la ciudad inteligente. Se sugieren como fundamentales las soluciones que apoyen en los procesos de movilidad, transporte, seguridad y mejoramiento de la eficiencia en los sistemas de recolección de basura.

## VIII. ESTRATEGIA DEL PROYECTO

Si bien Cuenca no ha sobresalido dentro del país por su gestión en la construcción de la Ciudad Digital, tiene elementos estratégicamente importantes para el éxito del proyecto:

1. Un Gobierno Local consciente de la necesidad de entrar en el camino que lleva a la Ciudad Digital.
2. Una ciudad con un alto nivel de preparación académica en su población.
3. Una empresa municipal operadora de telecomunicaciones,
4. Una cobertura de acceso al servicio de Internet que bordea el 60% de la población.
5. Una ciudad universitaria.
6. Una importante industria local de desarrollo de aplicaciones informáticas.

Siguiendo el Modelo Básico recomendado por la AUTELESI y considerando los elementos estratégicos antes mencionados, el esquema estratégico recomendado para la implementación del proyecto es el siguiente:

1. Nombramiento de la Comisión Organizadora bajo la presidencia de un delegado del Alcalde y con la actuación como facilitador de la misma de un delegado de ETAPA. Deben integrarla necesariamente las universidades locales, los organismos vinculados a la seguridad pública, representantes de entidades gubernamentales, representantes locales de la industria de software, representantes de las cámaras de la producción y representantes de la ciudadanía. Esta Comisión Organizadora deberá nombrar un Comité Operativo del Proyecto.
2. Nombramiento de comisiones sectoriales divididas por tipos de actividades a ser consideradas en el proceso de construcción de la ciudad digital: Administración Pública Local, Servicios Gubernamentales, Seguridad, Movilidad y Transporte, Servicios Públicos

Municipales, Educación y Capacitación, Servicios de Información Pública, Servicios de Iniciativa Privada. Esto estará a cargo de la Comisión Organizadora.

3. Definición de las necesidades básicas de los ciudadanos a cargo de las comisiones sectoriales.
4. Definición de las necesidades avanzadas de los ciudadanos sobre los mismos servicios definidos anteriormente, a cargo de las comisiones sectoriales.
5. Diagnóstico de la Infraestructura de telecomunicaciones, a cargo de ETAPA.
6. Diagnóstico de hardware y software, a cargo de una comisión técnica especializada nombrada por la Comisión Organizadora.
7. Diagnóstico de acceso en espacios públicos, principalmente en centros de comunicación o telecentros y zonas de acceso público inalámbrico, a cargo de ETAPA.
8. Diagnóstico del acceso privado, a cargo de ETAPA.
9. Elaboración de un informe inicial a cargo del Comité Ejecutivo, en base a los informes parciales de las comisiones sectoriales, de ETAPA y la comisión técnica de hardware y software.
10. Contratación de asesorías a cargo del Municipio.
11. Definición del esquema de financiamiento por parte del Comité Ejecutivo del Proyecto.
12. Definición del Plan de Acción por parte de la Comisión Organizadora.
13. Definición del Plan de Difusión y Capacitación por parte del Comité Ejecutivo del Proyecto.
14. Ejecución.



## IX. CONCLUSIONES

La construcción de Cuenca Ciudad Digital debe convertirse en un objetivo de ciudad con el fin de asegurar que las TIC se conviertan en una verdadera herramienta que asegure el buen vivir de todos sus habitantes. De las experiencias que se han desarrollado a lo largo de todo el mundo es, sin embargo, indispensable extraer algunas conclusiones importantes:

- El proceso de construcción de una ciudad digital no es exacto, no obedece a una receta única, sino más bien debe acondicionarse a la realidad de cada ciudad.
- Las decisiones más importantes del proceso tienen que ser tomadas por los actores locales y no por consultores externos.
- El proceso requiere el aprovechamiento del mejor capital humano local.

- El liderazgo del Gobierno Local es indispensable.
- La infraestructura tecnológica es solo una herramienta en la implantación de la ciudad digital y jamás debe ser confundida con una finalidad u objetivo.
- La ciudadanía es el agente más importante en la toma de decisiones y en la definición de objetivos del proyecto.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Comisión de Ciudades Digitales de la Asociación Española de Usuarios de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información, Manual Ciudades Digitales, 2007.
- [2] A. Vegara Gómez, "La Ciudad Digital," Revista Globalización del Conocimiento, mayo 2006.
- [3] A. Rivera, "Ciudades Digitales "Utopía o Realidad"" Revista PC World, diciembre 2008.

## Movilidad del Cantón Cuenca

*"hacia el modelo de ciudad que todos queremos"*  
 Christian Marcelo Moyano Tobar  
 Dirección Municipal de Tránsito  
 Gobierno Autónomo Descentralizado de Cuenca  
 Cuenca, Ecuador  
 cmoyano@cuenca.gob.ec

### Abstract

The propitiate necessary and sufficient conditions for sustainable mobility is the greatest challenge of municipal governments, forms of movement of people necessarily have to be articulate urban-regional model with the strategies of mobility and accessibility of citizens, for themselves establish the model of city we want in the short, medium and long term.

Cuenca is a medium city, and as such, presents the typical problems of a territory spread and accessibility problems with high levels of congestion on the main corridors and an imbalance in the distribution of public space, therefore, the determination of clear policies by the municipal administration are essential to think and built around the human.

The development of this paper focuses on the description of the city of Cuenca in terms of mobility indicators, performing an analysis of the current problems and possible steps to achieve "the model of city we all want".

**Keywords-** Sustainable mobility, mobility management, traffic congestion, transport modes.

### Resumen

El propiciar las condiciones necesarias y suficientes para lograr una movilidad sostenible y sustentable es el mayor reto de los gobiernos municipales, las formas de desplazamiento de las personas necesariamente tienen que articular el modelo urbano-territorial con las estrategias de movilidad y accesibilidad de los ciudadanos, para sí establecer el modelo de ciudad que deseamos en el corto, mediano y largo plazo.

Cuenca es una ciudad de población media, y como tal, presenta los problemas típicos de un territorio

disperso y con problemas de accesibilidad para sus habitantes, con altos niveles de congestión vehicular en sus principales corredores y con un desequilibrio en el reparto del espacio público, por ello, la determinación de políticas claras por parte de la administración municipal son fundamentales para conseguir una ciudad pensada y construida entorno al ser humano como actor fundamental.

El desarrollo del presente documento se centra en la descripción de la ciudad de Cuenca en función de indicadores de movilidad, realizando un análisis de la problemática actual y los posibles pasos a seguir para lograr "el modelo de ciudad que todos queremos".

**Palabras clave:** Movilidad sostenible, gestión de movilidad, congestión vehicular, modos de transporte.

## INTRODUCCIÓN

El acelerado y constante desarrollo de las ciudades de población media en América Latina ha generado serios inconvenientes en la planificación urbana y territorial, teniendo como consecuencia serios problemas para garantizar un adecuado acceso y movilidad a los ciudadanos. Las proyecciones estiman que dentro de una generación, más de la mitad de la población mundial vivirá en el área urbana de las ciudades, lo que representa un problema que hay que afrontarlo con decisión y rapidez, pero sobre todo con un enfoque innovador que permita que las ciudades del futuro conserven una dinámica sostenible, deseada por la sociedad.

En los últimos años el concepto de sociedad sostenible ha ganado un espacio importante dentro de la planificación urbana, es un término que proviene del concepto de

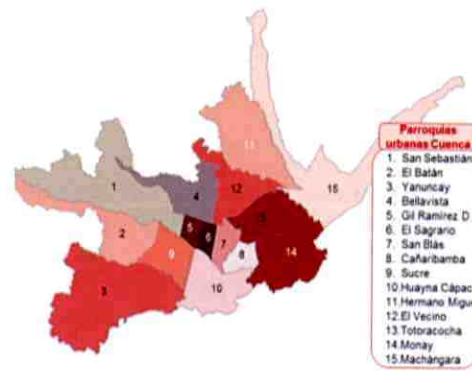


desarrollo sostenible que “satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”. En este sentido, una sociedad sostenible debe tener por estrategia aplicar este principio a sus políticas, teniendo en cuenta que propende por una prosperidad económica, una calidad ambiental y una equidad social. La movilidad y su expresión más tangible, el transporte público y privado, presenta un alto grado de violación de los principios sostenibles respecto a los recursos (Daly, 1990; Szyliowicz 2003). En este sentido, existen varias visiones sobre el cómo poder conseguir una sociedad sostenible; en el caso de Cuenca, ciudad que goza de servicios básicos con coberturas sumamente elevadas en el suministro y dotación de agua potable, alcantarillado, energía eléctrica y telecomunicaciones, recolección de desechos sólidos; en los últimos años la gestión de la movilidad se han convertido en un problema a tener consideración de manera emergente.

La gestión de movilidad es un término utilizado para describir las estrategias que propician un uso más eficiente de los recursos de transporte, enfatizando el movimiento de personas y bienes; minimizando el movimiento de vehículos, con una priorización del transporte público en todas sus modalidades (transporte masivo de pasajeros en buses de alta y media capacidad, sistemas de transporte sobre rieles, transporte público en la modalidad de taxi urbano, y en los últimos años con medios de transporte no motorizados y alternativo [3], en ese contexto la ciudad de Cuenca ha apostado por generar políticas que consideren al transporte público como un “derecho social”.  
CUENCA EN CIFRAS DE MOVILIDAD

El Cantón Cuenca es la capital de la provincia del Azuay y según los datos de Ecuador, en cifras – boletín de Cuenca, tiene una población de 505.585 habitantes. Según el censo poblacional del 2010, el 66% de la población es urbana distribuidas en 15 parroquias y el 34% es rural, emplazadas en 21 parroquias, cuya tasa de crecimiento poblacional anual es del 2,1%. El acelerado proceso de urbanización en el área urbana consolidada en los últimos 10 años ha contribuido al incremento de presiones en los centros urbanos, pues las parroquias siguen siendo dependientes en servicios y generación de empleo del área urbana, a pesar a los intentos de la municipalidad por generar nuevas centralidades [4].

GRAFICO N°1 - PARROQUIAS URBANAS Y RURALES DEL CANTÓN CUENCA



FUENTE: DIRECCIÓN MUNICIPAL DE TRANSITO DE CUENCA - ESTUDIOS DEL SISTEMA INTEGRADO TARIFARIO DEL TRANSPORTE PUBLICO DE CUENCA

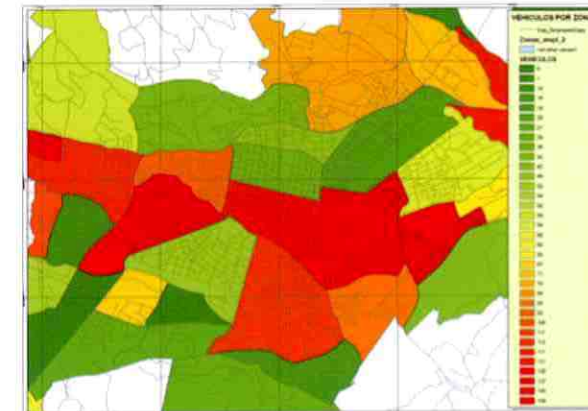
Existe un parque automotor de más 104.000 vehículos registrado en el año 2013, con una tasa de crecimiento vehicular que en los últimos años oscila entre el 10 – 12% anual, una flota de buses urbanos compuesta por 475 unidades, 3557 taxis convencionales, el 42.6% de la población urbana posee vehículo privado y el 85.2% de los hogares urbanos posee al menos un vehículo, el 14.8% posee entre dos y tres vehículos por familia con un índice promedio de ocupación entre 1 – 1.4 pasajeros/vehículo, cifras que nos dan una clara idea que el espacio físico de las vías son ocupadas para movilizar vehículos y no personas, en contra posición a una adecuada gestión de movilidad [4].

Lo preocupante de las cifras, anteriormente expuestas, radica en que si relacionamos la población urbana de Cuenca (333.877 habitantes), con el número de vehículos registrados en Cuenca en el año 2013, apodemos afirmar que, al momento, somos la ciudad del Ecuador con más vehículos por habitante con una relación de 1 vehículo por cada 3.21 personas, superando inclusive a Quito y Guayaquil, pero con una muy inferior oferta vial tanto en capacidad como en funcionalidad.

Si analizamos las zonas de la ciudad donde la tenencia de vehículos por habitante es la más alta, podemos identificar a las parroquias como El Batán, Cañaribamba, Totoracocha, donde la oferta vial está compuesta, básicamente, por vías de cuatro carriles, dos por sentido de circulación en las cuales en su mayoría son utilizadas por sistemas de transporte público urbano; en contraste existen parroquias como Bellavista, el Vecino y Monay donde la tenencia de vehículos por habitante

es marcadamente inferior [1], lo anteriormente expuesto se ilustra con claridad en el grafico N°2.

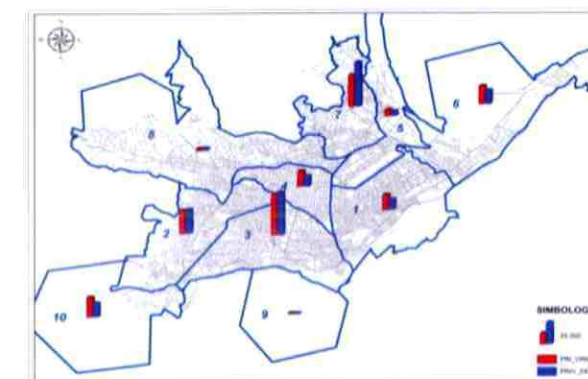
GRAFICO N°2 - DISTRIBUCIÓN DE TENENCIA DE VEHÍCULOS DE ZONA URBANA DE CUENCA



FUENTE: DIRECCIÓN MUNICIPAL DE TRANSITO DE LA CUENCA - 2014

Otra situación de suma importancia y consideración tiene relación con las zonas de la ciudad con mayor número de generación y atracción de viajes en todos los modos de transporte. Tradicionalmente, el Centro histórico de la ciudad, que albergaba un porcentaje muy significativo de servicios financieros, administrativos y educativos era la zona de mayor concentración de viajes, tanto en origen como en destino de los cuencanos. Con el cambio del uso de suelo de residencial a comercial, la construcción de nuevas soluciones habitacionales masivas, la construcción de equipamientos públicos y privados, el crecimiento del sector industrial, ha resultado que los conflictos de concentración de viajes se han ampliado a otras zonas de la ciudad, tales como: el Ejido, en el parque industrial, Narancay y el área de influencia del Arenal, tal y como lo podemos observar en el gráfico N°3.

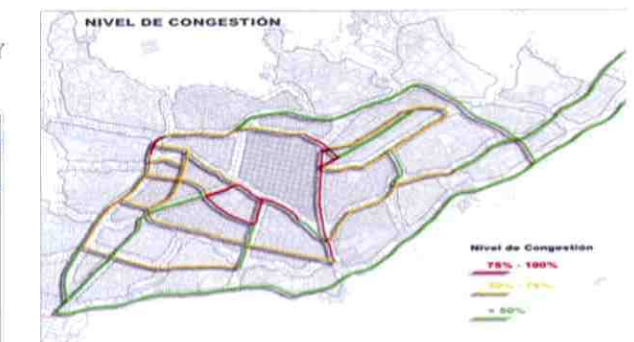
GRAFICO N°3 - PRINCIPALES ZONAS ATRACTORAS Y GENERADORAS DE VIAJES EN ZONA URBANA DE CUENCA.



FUENTE: DIRECCIÓN MUNICIPAL DE TRANSITO DE LA CUENCA - 2014

Con respecto al congestionamiento vehicular en los principales corredores de la zona urbana, podemos afirmar que la funcionalidad de las vías no se ha respetado, puesotose que no se dispone de una adecuada jerarquización del viario urbano, además que la tipología de las secciones es insuficiente para soportar los elevados volúmenes de circulación vehicular y peatonal. Por ejemplo, si analizamos los corredores que nos conectan la ciudad, en el sentido norte-sur, tenemos en primer lugar a la Avenida Huayna Cápac que en el tramo comprendido, entre el redondel de la Chola Cuencana y la Avenida 12 de Abril, presentan niveles de congestión que oscilan entre el 75 – 100% de su capacidad. Así mismo, en ciertos tramos de la Avenida 12 de Abril, entre el redondel de José Peralta y la Avenida Loja, tramos como la Avenida Fray Vicente Solano y Remigio Crespo Toral, también presentan estos indicadores; todo lo cual lleva a concluir que la zona de El Ejido presenta altos niveles de concentración de viajes motorizados [1]; afortunadamente, algunos corredores importantes para ingreso al centro histórico, vías de paso tanto en la zona norte como en la zona sur de la ciudad, todavía presentan bajos y medios niveles de congestionamiento (inferiores al 50%), como es el caso de la Avenida Loja, en el tramo desde el control sur hasta la Avenida primero de Mayo, la Vía rápida Cuenca – Azogues y la avenida de las Américas, en el tramo desde la avenida Héroes de Verdeloma, hasta el Hospital del Río, todo esto nos brinda una clara idea, sobre qué ejes podemos priorizar la movilidad con transporte público de calidad, lo anterior se detalla en el gráfico N° 4.

GRÁFICO N°4 - NIVELES DE CONGESTIONAMIENTO VEHICULAR EN PRINCIPALES VÍAS EN ZONA URBANA DE CUENCA.



FUENTE: DIRECCIÓN MUNICIPAL DE TRANSITO DE LA CUENCA - 2014



## PRIORIZAR EL TRANSPORTE PÚBLICO Y MODOS NO MOTORIZADOS

La evolución que ha experimentado la movilidad de Cuenca en los últimos 25 años ha llevado a seria reflexión a los planificadores municipales: en el año 1990, sólo, el 58% de los cuencanos y cuencanas se movilizaban en transporte público y, únicamente, el 20% lo hacían en vehículo particular, lo cual resultaba alentador, en relación a la priorización de los medios de transporte público masivo de pasajeros. Una serie de situaciones ajenas al control municipal -que va desde, un auge financiero en el país, que repercutió en el fácil acceso en la adquisición de vehículos, hasta la falta de implementación de políticas estatales claras, con respecto a la priorización del transporte público- en el año 2012 se identificó un cambio significativo en el reparto modal en la movilidad de la ciudad: el porcentaje de población que se moviliza en transporte público se redujo al 39.50% y el porcentaje de personas que, actualmente, se movilizan en vehículos privados se ha incrementado al 43,8%; es decir, se ha duplicado el uso de esta modalidad, que va en perjuicio de la calidad del aire y de la contaminación auditiva, sobre todo, en el centro histórico de la ciudad, lo anterior se detalla en la tabla N° 1.

En tal virtud, con absoluta decisión política y técnica, la actual administración municipal ha emprendido el reto de priorizar el transporte público, como el medio de movilización más importante de la ciudad, al generar las condiciones favorables para que los medios de transporte no motorizados (el uso de la bicicleta y el caminar en los espacios adecuados) se masifiquen, para ello ha iniciado una serie de acciones innovadoras, la más significativa es la generación del primer "Plan de Movilidad y Espacios Públicos del Cantón Cuenca".

TABLA N° 1 REPARTO MODAL DE LA CIUDAD DE CUENCA

1990		2012	
T. público en Bus	58%	T. Público en Bus	39,5%
Autos Particulares y taxi	20%	Autos Particulares y taxi	43,8 %
A pie	15%	A pie	13,7%
Otros	7%	Otros	3 %

FUENTE: DIRECCIÓN MUNICIPAL DE TRANSITO DE LA CUENCA - 2014.



## HACIA EL NUEVO MODELO DE CIUDAD QUE TODOS QUEREMOS

Cuenca, es una ciudad tradicional de personas y de barrios, escalas que se complementan y que permiten proyectar la esencia urbana de nuestras relaciones sociales más valiosas, ha evolucionado en la forma de entender la ciudad, desde la imagen de un territorio disperso e inconcluso, hacia un modelo donde la movilidad juega un papel fundamental. Con la realización del Plan de Movilidad y Espacios Públicos de Cuenca, se plantea una relación funcional y equilibrada: personas y entorno en el que interactúan, adecuando los proyectos de gran alcance, con el significado de Cuenca Patrimonio Histórico, Natural y Natural; de esta manera, solo mediante su interrelación, podremos esbozar con garantías y credibilidad un modelo de ciudad sostenible para nosotros y para nuestros hijos: donde la movilidad peatonal, y el uso de la bicicleta sean el principal modo de disfrutar la ciudad; y, para las distancias que impiden realizar los trayectos diarios caminando, está la nueva configuración del sistema de transporte público (autobuses, tranvía) y de automóviles, como un servicio real para todos los cuencanos y cuencanas [2].

Se ha iniciado la realización de este valioso plan, con el apoyo de instituciones de gran prestigio,

tales como: la Universidad de Cuenca, Universidad del Azuay y la Junta de Andalucía de España, que aportarán de manera significativa al proyecto -así como garantía de este proyecto- que en poco menos de un año, se tendrá listo el documento, que con responsabilidad y compromiso, se pondrá en marcha el proyecto que lo compartimos. De esta manera, transporte, movilidad y espacios públicos serán solucionados, en búsqueda de una mejor interrelación: personas y entorno natural.

## CONCLUSIONES

Es evidente que el acelerado incremento del parque automotor en Cuenca en los últimos años ha contribuido a los problemas de congestión vehicular en el área urbana de la ciudad con el consecuente aumento del riesgo de accidentes de tránsito, la falta de capacidad vial en la ciudad es notoria sobre en los corredores que soportan en ciertas intersecciones flujos superiores a los 50.000 veh/día, donde se tiene que garantizar una adecuada circulación de los más vulnerables (peatones y usuarios de modos no motorizados).

La falta de políticas claras en cuanto a temas de movilidad sostenible, ha contribuido a que el problema cada vez sea más grande; por fortuna con la implementación del Plan de Movilidad y Espacios Públicos que el GAD de Cuenca ha iniciado con colaboración de la Junta de Andalucía y las Universidades de Cuenca y Universidad del

Azuay, se establecerán las políticas a corto, mediano y largo plazo necesarias para garantizar que la interacción entre todos los modos de transporte sea la adecuada, generando un equilibrio entre el espacio destinado para cada actor.

La construcción de proyectos masivos de transporte público y la implementación de importantes infraestructuras viales ha cambiado y seguirán cambiando la manera de transporte en la ciudad, por ello la planificación territorial en cuenca debe ir de la mano con la de la movilidad y así, establecer sinergias adecuadas, por lo que una redistribución de funciones administrativas internas dentro de los entes planificadores, reguladores y de control es necesaria de manera imperiosa.

## REFERENCIAS

- [1] Dirección Municipal de Tránsito de Cuenca. (2014). Cifras de parque automotor de Cuenca. Cuenca: GAD de Cuenca.
- [2] DMT - Plan de Movilidad del GAD de Cuenca. (2014). Generalidades del Plan de Movilidad y Espacios Públicos de Cuenca. Cuenca: GAD de Cuenca.
- [3] Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo de Alemania - GTZ. (2006). Gestión de la Movilidad. Eschborn: GTZ-Alemania.
- [4] TMB - Barcelona. (2014). Definición del Sistema Integrado Tarifario de la Red de Transporte Público de Cuenca. Cuenca: TMB.





Ing. Pablo Vanegas Peralta, PhD  
DECANO (E)

Ing. Felipe Cisneros Espinoza, PhD  
SUBDECANO (E)

Ing. Mauricio Espinoza, PhD  
VOCAL DOCENTE PRINCIPAL

Ing. Juan Carrión Monsalve, PhD  
VOCAL DOCENTE PRINCIPAL

Ing. Esteban Pacheco Tobar, MSc.  
DIRECTOR CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Ing. Rodrigo Sempértegui Álvarez  
DIRECTOR CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Ing. Víctor Saquicela Galarza, PhD  
DIRECTOR CARRERA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS

Ing. Mauricio Espinoza, PhD  
Director del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y  
Telecomunicaciones

Ing. Juan Leonardo Espinoza, PhD  
DIRECTOR DE POSGRADOS

Ing. Guillermo Martínez Loiza  
PROFESOR FISCAL

Ing. Lizandro Solano Quinde, PhD  
Director del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y  
Telecomunicaciones

Ing. Esteban Pacheco MSc.  
Director del Departamento de Ingeniería Civil

Ing. Mauricio Espinoza, PhD  
Director del Departamento de Ciencias de la Computación

## *Hacia una Universidad de Docencia con Investigación*

### **Visión**

Para el año 2017, es una facultad con programas académicos reconocidos internacionalmente, que promueve y lidera actividades de investigación y que aplica un modelo educativo centrado en el estudiante y procesos de mejora continua.

### **Misión**

La Facultad de Ingeniería es una unidad académica que, a través de la investigación y la docencia, forma ingenieros preparados para desarrollar un ejercicio profesional con ética y responsabilidad social y con bases sólidas para involucrarse en actividades de investigación.

Luego de múltiples intervenciones de los miembros del H. Consejo Directivo se resuelve por unanimidad aprobar el texto presentado en el seno de este Organismo, y difundir esta información al personal docente, administrativo y estudiantes, a través de los medios que se consideren pertinentes.



**Lugar de Edición:**  
FACULTAD DE INGENIERÍA - UNIVERSIDAD DE CUENCA  
Avenida 12 de Abril s/n  
Código Postal: 01.01.168  
Cuenca- Ecuador

**Dirección de contacto y suscripción.**  
FACULTAD DE INGENIERÍA - UNIVERSIDAD DE CUENCA

**Oficina Revista GALILEO**  
Avenida 12 de Abril s/n  
Código Postal: 01.01.168  
Cuenca- Ecuador  
galileo@ucuenca.edu.ec  
Teléfono: +593-4051000 Ext. 2101

Centro de Documentación "Juan Bautista Vazquez"



SI9886

**Galileo: Órgano Informativo de la Facultad de Ingeniería,  
Editado por la Universidad de Cuenca  
Fundado en 1997**

Diseño e Impresión:  
Ing. Juan Pablo Mogrovejo P./ Gráficas Hernández Cía. Ltda.





**UNIVERSIDAD DE CUENCA**  
Facultad de Ingeniería

FACULTAD DE  
**INGENIERÍA**

**75**  
AÑOS  
UNIVERSIDAD DE CUENCA

EDICIÓN AUSPICIADA POR:



**UNIVERSIDAD DE CUENCA**  
Facultad de Ingeniería



Centro de Documentación "Juan Bautista Vazquez"



SI9886

