

Revista

## **CIENCIA**

### **Sumario**

**Volumen 12, número 1, 2009**

<b>Edificios abiertos con y sin aisladores de base</b> Roberto Aguiar Falconí, Alex Jara y Darío Páez	<b>1</b>
<b>Diseño y evaluación de un sistema de alta capacidad para aislamiento DNA para Análisis de ácidos nucleicos de Patógenos en muestras cilíndricas</b> Marcelo Grijalva, Paola Párraga y Patricia Jimenez	<b>23</b>
<b>Caracterización de fincas ganaderas y relaciones con la cobertura arbórea en Santo Domingo de los Colorados, Ecuador</b> Jaime Villacís y José Molina	<b>33</b>
<b>Sobre el equilibrio de estructuras aporricadas</b> Pablo Caiza	<b>47</b>
<b>Síntesis de un sorbente híbrido aplicado en la remoción selectiva de arsénico desde Aguas superficiales contaminadas</b> Luis Cumbal y Marcelo Zuñiga	<b>67</b>
<b>Desarrollo tecnológico para la Industria Petroquímica en el Ecuador</b> Vicente Delgado y Vladimir Aguirre	<b>81</b>
<b>Caracterización espacial de hábitats en un paisaje fragmentado de Santo Domingo de los Tsáchilas</b> Jaime Villacís, Diego Cortez, Jorge Zurita, Marco Luna y Carlos Chiriboga	<b>97</b>

Revista Semestral de la Escuela Politécnica del Ejército Quito, Ecuador.

ISSN 1390-1117

© 2009 ESPE, Quito – Ecuador

ESPE, Quito – Ecuador

## EDITOR

### 1 Roberto Aguiar Falconí

Centro de Investigaciones Científicas  
Escuela Politécnica del Ejército  
Valle de los Chillos, Ecuador  
e-mail: [raguiar@espe.edu.ec](mailto:raguiar@espe.edu.ec)

## COMITÉ EDITORIAL

### A.H. Barbat

E.T.S. Ingenieros de Caminos y Canales y Puertos  
Universidad Politécnica de Cantuña  
Campus Norte UPC, 08034.

### J. L. Almazán

Escuela de Ingeniería  
Pontificia Universidad Católica de Santiago  
Santiago de Chile

### L. Córdova

Facultad de Ciencias y Humanidades  
Universidad del Valle de Guatemala  
Guatemala.

### P. Dechent

Escuela de Ingeniería  
Universidad de Concepción  
Concepción, Chile

### S. Fernández

Academia de Estructuras  
Instituto Politécnico Nacional  
México D.F.

### P. Caiza

Centro de Investigaciones Científicas  
Escuela Politécnica del Ejército  
Valle de los Chillos, Ecuador

### C. Genatios

Instituto de Materiales y Modelos Estructurales  
Universidad Central de Venezuela  
Caracas, Venezuela.

### A. Koch

Centro de Investigaciones Científicas  
Escuela Politécnica del Ejército  
Valle de los Chillos, Ecuador.

### M.E. Medina

Centro de Investigaciones Científicas  
Escuela Politécnica del Ejército  
Valle de los Chillos, Ecuador.

### M- Lafuente

Instituto de Materiales y Modelos Estructurales  
Universidad Central de Venezuela  
Caracas, Venezuela.

### W. Pozo

Centro de Investigaciones del IASA  
Escuela Politécnica del Ejército  
Valle de los Chillos, Ecuador.

### M. Romo

Centro de Investigaciones Científicas  
Escuela Politécnica del Ejército  
Valle de los Chillos, Ecuador.

### J. M Ruiz

Facultad de Construcciones  
Departamento de Ingeniería Civil  
Universidad de Oriente  
Santiago de Cuba, Cuba.

### S. Ruiz

Instituto de Ingeniería  
Universidad Nacional Autónoma de México  
México D.F.

### F. Williams L.

Instituto de Ingeniería  
Universidad Veracruzana  
Veracruz, México.

### A. Oleas

Centro de Investigaciones del IASA  
Escuela Politécnica del Ejército  
Valle de los Chillos, Ecuador.

## FORMATO DE TEXTO

### Mónica Pullas Gallardo

Centro de Investigaciones Científicas  
Escuela Politécnica del Ejército  
Valle de los Chillos, Ecuador  
ISSN 1390-1117  
©2009 ESPE, Quito, Ecuador

## EDIFICIOS ABIERTOS CON Y SIN AISLADORES DE BASE

Roberto Aguiar Falconí<sup>(1)</sup>, Alex Jara Sánchez<sup>(1)</sup> y Darío Páez<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Centro de Investigaciones Científicas  
Escuela Politécnica del Ejército  
[raguiar@espe.edu.ec](mailto:raguiar@espe.edu.ec)

<sup>(2)</sup>Carrera de Ingeniería Civil  
Universidad Laica Eloy Alfaro de Manta

### RESUMEN

En los edificios abiertos el centro de rigidez está bastante distante del centro de masas por lo que durante un sismo tienen problemas de torsión. En efecto los pórticos débiles se desplazan mucho más que el centro de masa y en algunos casos los pórticos fuertes también se desplazan más que el centro de masa. Todo esto ocasiona que los edificios con estas características tengan un mal comportamiento sísmico, si se construyen en la forma clásica. Ahora si estos edificios se construyen sobre aisladores de base se reducen notablemente los problemas de torsión ya que los desplazamientos laterales en la superestructura son bastante bajos.

En este artículo se analizan 20 edificios de hormigón armado de 3 a 6 pisos, con diferentes dimensiones en planta. Se los analiza ante la acción de 28 sismos artificiales que son compatibles con los espectros del Código Ecuatoriano de la Construcción para los cuatro tipos de suelo estipulados en el Código. Estos edificios se analizan con y sin aisladores de base, se encuentran los factores de amplificación por torsión en los pórticos extremos y se propone una nueva forma de cuantificar estos factores en la que se refleja la bondad del uso de aisladores de base elastoméricos en las construcciones.

### ABSTRACT

In the open buildings the rigidity center is quite distant from the center of mass being the reason why during an earthquake they have torsion problems. In effect the weak porches move much more than the center of mass and in some cases the strong porches also move more than the mass center. All this causes that the buildings with these characteristics have a bad seismic behavior, if they are constructed in the classic form. Now, if these buildings are constructed upon base isolators, they reduce the torsion problems remarkably since the lateral displacements in the superstructure are quite low.

This article examines 20, 3 to 6 buildings of reinforced concrete, with different dimensions on site. They are analyzed under the action of 28 artificial earthquakes that are compatible with the spectra of the Ecuadorian Code of Construction for the four types of land stipulated in the Code. These buildings are analyzed with and without base isolators, the factors of amplification by torsion in the extreme porches are found, and a new form is proposed to quantify these factors in which the kindness of the use of elastomeric insulator is reflected in the constructions.

## 1. INTRODUCCIÓN

Un *edificio abierto*, es un edificio esquinero cuyas paredes que colindan con las estructuras adyacentes, están acopladas a la estructura. En la figura 1 se muestra un *edificio abierto* de dos pisos, los pórticos que no tienen mampostería dan a la calle y los pórticos con mampostería han sido construidos incorporándoles al edificio con chicotes o se construyó primero las paredes y luego las columnas con lo que la mampostería queda acoplada a la estructura.



**Figura 1** Descripción de un *edificio abierto*

Normalmente los edificios abiertos son utilizados para locales comerciales y la primera planta tiene una altura mayor a las otras plantas. En la figura 2 se muestra un edificio abierto ubicado en la ciudad de Armenia, que colapsó durante el sismo que afectó al eje cafetero de Colombia el 25 de enero de 1999 y que tuvo una magnitud  $M_b = 5.9$ . Aguiar (1999). En la figura 2 se aprecia que el tercer piso colapsó completamente sus columnas no resistieron las cargas debidas al sismo.



**Figura 2** Edificio abierto que colapsó durante el sismo de 1999 en Colombia.

Los pórticos que contienen a la mampostería son muy rígidos en comparación con los pórticos que no tienen mampostería. Por lo tanto en cada dirección de análisis se tienen dos zonas, una fuerte y una débil; la primera se encuentra donde están los pórticos con la mampostería acoplada y la segunda en el sentido opuesto que no tiene mampostería.

Para plantas muy alargadas, tanto los desplazamientos del pórtico fuerte como los del pórtico débil son mayores a los desplazamientos del Centro de Masas, CM. Ahora para estructuras torsionalmente rígidas, los desplazamientos laterales del pórtico débil son mayores a los desplazamientos del pórtico fuerte, en estructuras torsionalmente flexibles hay casos en que los desplazamientos del pórtico fuerte son mayores a los desplazamientos del pórtico débil. Hernández y López (2003).

Lo cierto es que en un mismo sentido, los desplazamientos de los pórticos exteriores son diferentes. Esta diferencia de desplazamientos es la que genera problemas de torsión en planta con resultados calamitosos que han llevado al colapso a las estructuras. Hernández y López (2007).

Si no se considera la mampostería de los pórticos perimetrales y si la estructura es completamente simétrica, el Centro de Rigidez CR., coincide con el CM. En este caso los desplazamientos laterales de todos los pórticos, en un sentido, son iguales. Al no coincidir el CR., con el CM., el desplazamiento lateral de los pórticos es diferente y existen problemas de torsión.

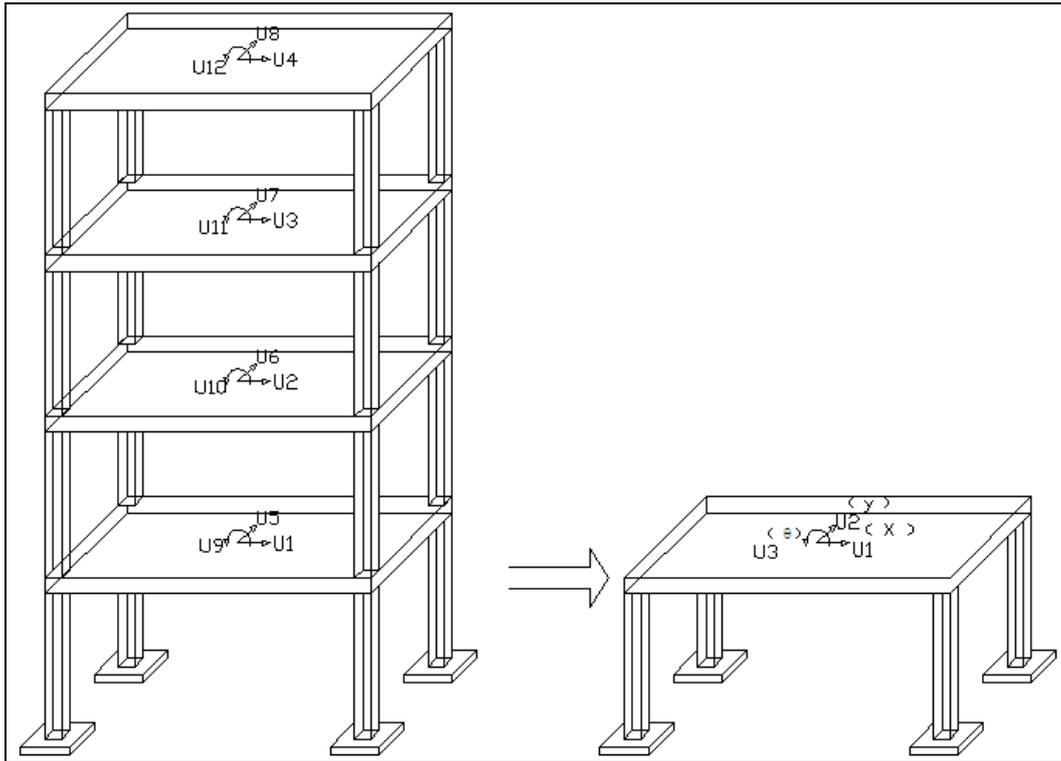
Se define el CR., como el lugar geométrico en el cual al aplicar las fuerzas sísmicas la estructura se desplaza y no rota con respecto al piso inferior. El CR., solo existe en estructuras de un piso y en estructuras de varios pisos que sean compensables. Vásquez y Ridell (1984). En otro tipo de estructuras el CR., no existe en forma exacta pero existen procedimientos aproximados para determinar el CR., en forma aproximada. Cheung y Tso (1986), Villafañe y Crisafulli (1986), Seguí (2007), entre otros.

En este artículo se utiliza el procedimiento de Seguí (2007) para hallar el CR., en estructuras de varios pisos. Seguí (2007) de una estructura de múltiples grados de libertad de varios pisos obtiene una estructura equivalente de un piso y con tres grados de libertad igualando las frecuencias y modos de vibración. Es en esta estructura equivalente donde se halla el CR., se obtiene un solo CR., para todo el edificio. En Aguiar *et al* (2009) está descrito el procedimiento de cálculo del CR.

Las estructuras construidas en la forma tradicional sin aisladores de base, en las que el CM., está distante del CR., han colapsado o han tenido gran daño en sismos pasados. Ahora bien, las estructuras construidas sobre aisladores de base con mayores problemas de torsión se han comportado satisfactoriamente durante sismos recientes, como es el caso del Sur de California (no es un edificio abierto) pero si tiene una planta muy irregular en planta y se comportó en forma satisfactoria sin ningún daño en el sismo de Northridge de 1994, gracias a los aisladores de base elastoméricos. Aguiar *et al* (2008).

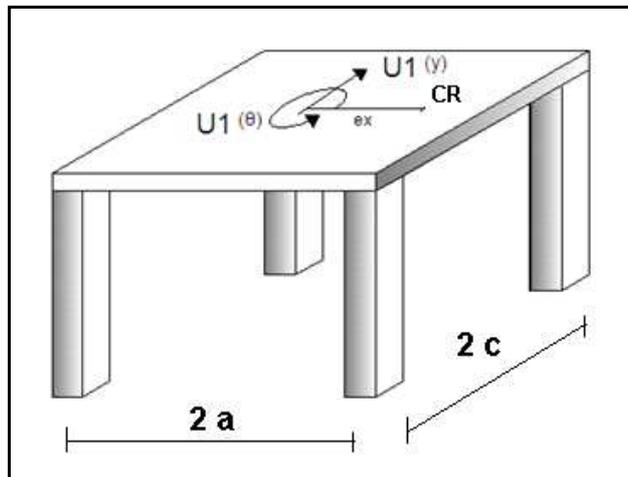
## 2. ANÁLISIS SÍSMICO EN ESTRUCTURAS SIN AISLADORES

Dada una estructura de  $n$  pisos con base empotrada, sin aisladores, se encuentra las matrices de rigidez y de masas en un modelo de tres grados de libertad por planta. Con estas matrices se hallan los valores y vectores propios y posteriormente se encuentra el sistema equivalente de 1 piso con tres grados de libertad. Esquemáticamente esto se ilustra en la figura 3, a la izquierda se muestra un edificio, que se analiza con tres grados de libertad por planta (losa rígida) y a la derecha el modelo equivalente de un piso con tres grados de libertad, es en este modelo en que se hallan las excentricidades estáticas.



**Figura 3** Modelos de n pisos y de un piso equivalente.

Ahora bien si se considera que el sismo actúa en un solo sentido es factible analizarlo con dos grados de libertad como se indica en la figura 4. Donde  $e_x$  es la excentricidad estática en sentido X;  $u_1(y)$  es la componente de desplazamiento horizontal en sentido Y;  $u_1(\theta)$  es la rotación de la planta con respecto al eje perpendicular de la losa. El sismo actúa en sentido Y.



**Figura 4** Modelo numérico de cálculo de una estructura monosimétrica.

Nótese que las dimensiones de la planta son  $2a/2c$ . Siendo  $c < a$ . El sistema de ecuaciones diferenciales para el modelo de análisis de la figura 3, es:

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_1^{(Y)} \\ \rho \ddot{u}_1^{(\theta)} \end{bmatrix} + C \begin{bmatrix} \dot{u}_1^{(Y)} \\ \rho \dot{u}_1^{(\theta)} \end{bmatrix} + K_{yy} \begin{bmatrix} 1 & \hat{e} \\ \hat{e} & \hat{e}^2 + \Omega_\theta^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1^{(Y)} \\ \rho u_1^{(\theta)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m \ddot{U}_g \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Siendo  $m$  la masa equivalente del sistema de un piso, la misma que es igual a la suma de las masas de cada uno de los pisos de la estructura de  $n$  piso;  $K_{yy}$  es la rigidez equivalente traslacional del sistema de un piso;  $\rho$  es el radio de giro del momento de inercia de la masa que se encuentra con la siguiente expresión.

$$\rho = 2 * \sqrt{\frac{a^2 + c^2}{12}} \quad (2)$$

Antes de continuar indicando el significado de las restantes variables, es importante destacar que el un grado de libertad es el desplazamiento en sentido Y que se ha denominado  $u_1(y)$  y el otro grado de libertad es  $\rho u_1(\theta)$ , de esta manera las dos coordenadas tienen las mismas unidades y son comprobables.

Las variables, no definidas todavía de ecuación ( 1 ) son:  $\hat{e}$  es la excentricidad estática normalizada;  $\Omega_\theta$  es la relación de la frecuencia torsional con respecto a la frecuencia traslacional;  $\ddot{U}_g$  es la aceleración del suelo en sentido Y.

$$\hat{e} = \frac{e_x}{\rho} \quad (3)$$

$$\Omega_\theta = \sqrt{\frac{K_{\theta\theta}^{CR}}{\rho * K_{yy}}} \quad (4)$$

Donde  $K_{\theta\theta}^{CR}$ , es la rigidez a torsión pero referida al CR. La misma que se puede hallar a partir de  $K_{\theta\theta}$  que es con respecto al CM.

$$K_{\theta\theta}^{CR} = K_{\theta\theta} - K_{yy} * e_x^2 \quad (5)$$

Siendo  $e_x$ , la excentricidad estática en sentido X.  $K_{yy}$ ,  $K_{\theta\theta}$  son elementos de la diagonal de la matriz de rigidez del modelo de un piso y de dos grados de libertad.

La matriz de amortiguamiento  $C^{(s)}$  que se indica en la ecuación ( 1 ) se halla con la siguiente ecuación.

$$C^{(s)} = M * \Phi * \hat{C} * \Phi^T * M \quad (6)$$

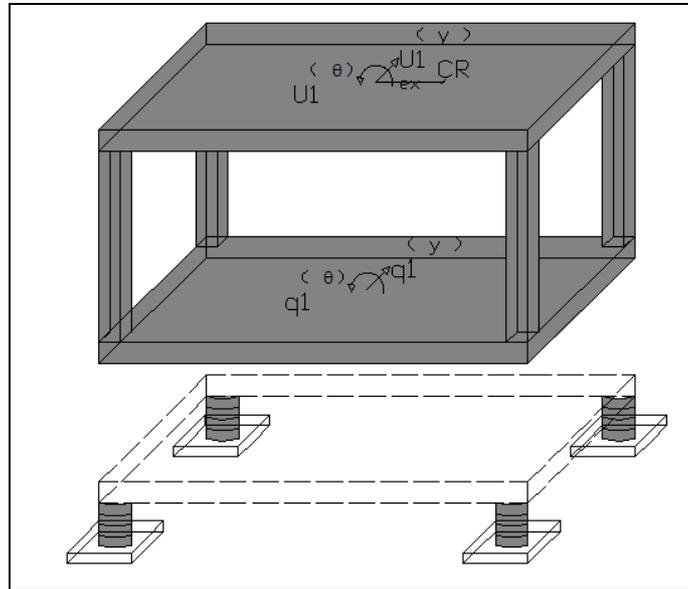
Donde  $\Phi$  es la matriz modal, conformada por los dos modos de vibración,  $M$  es la matriz de masas indicada en la ecuación ( 1 ). La matriz  $\hat{C}$  es diagonal y vale:

$$\hat{C} = \begin{bmatrix} 2\xi W_1 & \\ & 2\xi W_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Siendo  $\xi$  el factor de amortiguamiento de la estructura, normalmente se considera  $\xi = 0.05$  y es igual en todos los modos de vibración.  $W_1, W_2$  son las frecuencias de vibración del modelo de 2 gdl.

### 3. ANÁLISIS SÍSMICO EN ESTRUCTURAS CON AISLADORES

Ahora, se considera que la estructura se halla sobre aisladores de base elastoméricos, sin núcleo de plomo. Aguiar *et al* (2008). En este caso el modelo numérico de cálculo es el indicado en la figura 5. Se ha notado con la letra  $u$  las coordenadas de la superestructura y con la letra  $q$  del sistema de aislación.



**Figura 5** Modelo numérico de cuatro grados de libertad.

Para el modelo de 4 grados de libertad, el sistema de ecuaciones diferenciales está definido por:

$$\begin{bmatrix} M^{(s)} & M^{(s)} r^{(s)} \\ r^{(s)t} M^{(s)} & M^{(t)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C^{(s)} & 0 \\ 0 & C^{(b)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K^{(s)} & 0 \\ 0 & K^{(b)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} M^{(s)} r^{(s)} \\ M^{(t)} \end{bmatrix} r^{(b)} \ddot{u}_g \quad (8)$$

Donde  $M^{(s)}$  es la matriz de masas considerando la base empotrada del modelo de 2 gdl;  $M^{(t)}$  es la matriz de masa total que se halla con la siguiente expresión:

$$M^{(t)} = r^{(s)t} M^{(s)} r^{(s)} + M^{(b)} \quad (9)$$

Siendo  $M^{(b)}$  la matriz de masa del sistema de aislación;  $C^{(s)}, C^{(b)}$ , son las matrices de amortiguamiento de la superestructura y del sistema de aislación;  $K^{(s)}, K^{(b)}$  son las

matrices de rigidez de la superestructura y del sistema de aislación.  $r^{(s)}$  es una matriz que se obtiene midiendo los grados de libertad en la superestructura correspondientes a las deformadas elementales del sistema de aislación, para el presente caso  $r^{(s)} = I$ . Por otro lado  $r^{(b)}$  es el vector que se obtiene al medir los grados de libertad del sistema de aislación si el suelo se desplaza la unidad,  $r^{(b)} = [1 \quad 0]^t$ . Aguiar *et al* (2008).

#### 4. ESTRUCTURAS Y SISMOS DE ANÁLISIS

Se analizaron estructuras de tres, cuatro, cinco y seis pisos. Para cada una de ellas se consideró cinco plantas diferentes que son las indicadas en la figura 6, de tal manera que se tienen 20 edificios analizados sin aisladores de base e igual número de edificios con aisladores de base. Cada uno de estos edificios fue sometido a la acción de 28 sismos artificiales.

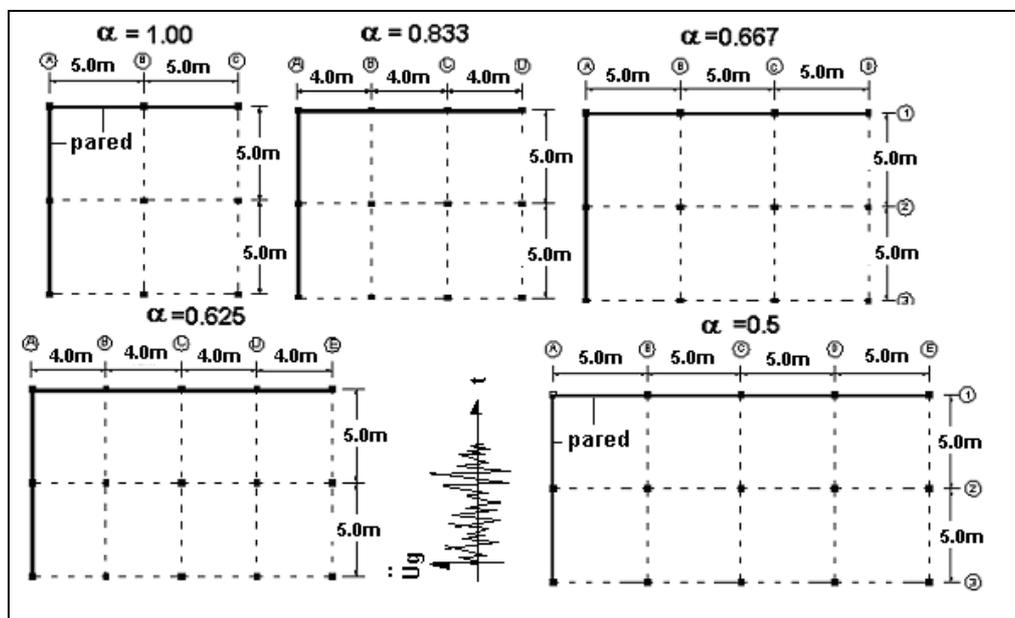


Figura 6 Geometría en planta de estructuras analizadas

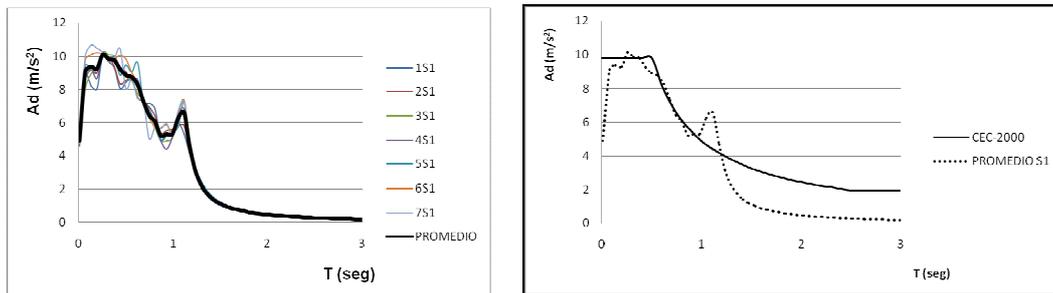
El parámetro  $\alpha$  relaciona la luz corta con respecto a la luz larga; este parámetro varía desde 1, que corresponde a una planta cuadrada hasta 0.5 que corresponde a una planta rectangular en la cual la luz corta es la mitad de la luz larga. La mampostería acoplada a los pórticos se encuentra en el pórtico izquierdo (pórtico A) y en el pórtico superior (pórtico 1). Por lo tanto, son estos los pórticos fuertes y los opuestos los pórticos débiles. En la figura 6 se indica también la dirección en que actúa el sismo. (Sentido Y).

En Aguiar *et al* (2009) se indica las secciones de las columnas y vigas, las cargas actuantes; en todos los edificios la altura del primer piso es de 4.0 m., y la altura de los pisos superiores es de 3.0 m. Se consideró que el hormigón utilizado tiene una resistencia a la compresión  $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ . La resistencia de la mampostería a la compresión  $f'_m = 35 \text{ kg/cm}^2$ . El módulo de elasticidad del hormigón se obtuvo con  $E = 12000 \sqrt{f'_c}$ ; el

módulo de elasticidad de la mampostería  $E_m = 500 f'_m$ . El espesor de las paredes  $t = 0.15 m$ .

En la figura 7 se presenta a la izquierda, los espectros de respuesta elásticos de cada uno de los siete sismos artificiales para suelo S1, se los ha identificado como 1S1, hasta 7S1. La duración del 1S1 es 20 segundos y la duración de los restantes sismos se incrementando en 5 s., en todos los sismos la fase intensa tiene una duración de 10 s. En la figura izquierda también se ha dibujado con línea más gruesa el espectro promedio.

A la derecha de la figura 7 se muestra el espectro promedio, de los siete sismos artificiales y el espectro del CEC-2000 para el perfil de suelo S1. Se observa que los dos son parecidos ya que los sismos artificiales generados son compatibles con la forma espectral del CEC.2000.



**Figura 7** Espectros de acelerogramas artificiales, espectro promedio y del CEC-2000. Suelo S1.

En el CEC-2000 se definen 4 tipos de suelo identificados por S1 (suelo de resistencia muy dura); S2 (suelo de resistencia intermedia); S3 (suelo blando) y S4 (suelo muy blando). Para cada uno de estos perfiles de suelo se generaron 7 sismos artificiales, dando un total de 28 sismos con los que se trabajó.

## 5. RESULTADOS OBTENIDOS

En esta apartado se presentan las características del modelo equivalente de un piso con tres grados de libertad de cada uno de los edificios estudiados. Posteriormente, para uno de ellos se encuentra la respuesta en el tiempo con y sin aisladores de base con el propósito de que se visualice el trabajo realizado. Finalmente, se hallan los factores de amplificación por torsión de los pórticos exteriores, los mismos que fueron evaluados con las siguientes ecuaciones para las estructuras sin aisladores de base.

$$\Gamma_{-a} = \frac{U_{-a} - U_{CM}}{U_{CM}} \quad (10)$$

$$\Gamma_a = \frac{U_a - U_{CM}}{U_{CM}}$$

Donde  $\Gamma_{-a}$ ,  $\Gamma_a$  son los factores en el pórtico fuerte (pórtico A) y en el pórtico débil (pórtico opuesto al A);  $U_{-a}$ ,  $U_a$  son los desplazamientos laterales en los pórticos extremos (fuerte y débil);  $U_{CM}$  es el desplazamiento lateral en el CM., para  $\alpha = 1$  sería en el pórtico B.

Para las estructuras con aisladores de base, los factores de amplificación de la superestructura se encuentran con las siguientes expresiones.

$$\Gamma_{-a}^{(b)} = \frac{U_{-a}^{(b)} - U_{CM}^{(b)}}{U_{CM}^{(b)}} * \frac{U_{-a}^{(b)}}{U_{-a}^{(b)}}$$

$$\Gamma_a^{(b)} = \frac{U_a^{(b)} - U_{CM}^{(b)}}{U_{CM}^{(b)}} * \frac{U_a^{(b)}}{U_a^{(b)}} \quad (11)$$

Siendo  $\Gamma_{-a}^{(b)}$ ,  $\Gamma_a^{(b)}$  los factores de amplificación por torsión en la superestructura con aisladores de base;  $U_{-a}^{(b)}$ ,  $U_a^{(b)}$ ,  $U_{CM}^{(b)}$  los desplazamientos en la superestructura con aisladores de base en el pórtico fuerte, débil y CM;  $U_{-a}$ ,  $U_a$  los desplazamientos en los pórticos fuerte y débil de la estructura con base empotrada, sin aisladores.

De esta manera se incorpora en el cálculo del factor de amplificación por torsión la reducción en desplazamientos de la estructura con aisladores de base en relación a los desplazamientos con base empotrada.

### 5.1 Rigidez y excentricidad de estructuras analizadas

En la figura 8 muestra la ubicación del CR., en las estructuras de 3 a 6 pisos para una planta rectangular con  $\alpha = 0.5$ . Como era de esperarse los CR. se halla a la izquierda ( $e_x$ ) y en la parte superior ( $e_y$ ) del CM. Esto es para el caso de la estructura con base empotrada.

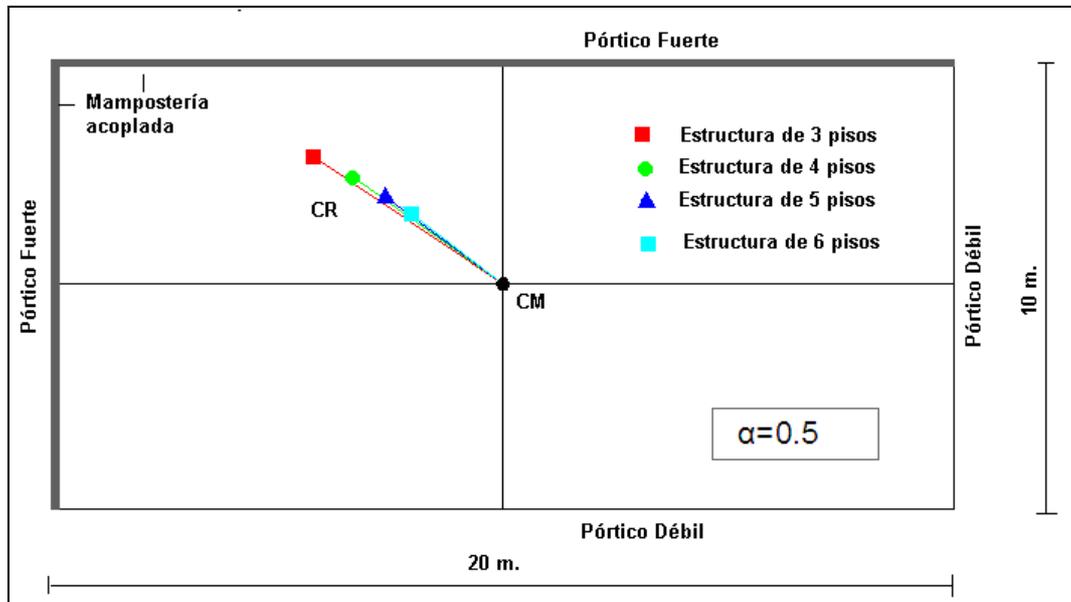


Figura 8 Ubicación del CR., en edificios abiertos con  $\alpha = 0.5$

En la tabla 1, se indican los valores de las excentricidades estáticas para cada uno de los edificios analizados, los elementos de la diagonal de la matriz de rigidez del modelo equivalente de 3 gdl., el momento de inercia de las masas y la frecuencia torsional.

**Tabla 1** Propiedades dinámicas de estructuras analizadas.

### 3 PISOS

Relación de luz de losa	ex (m.)	ey (m.)	Kxx	Kyy	K $\theta\theta$	$\rho$	$\Omega\theta_x$	$\Omega\theta_y$
$\alpha = 1$	-2.980	2.980	6150	6150	297890	4.08	2.110	1.320
$\alpha = 0.67$	-3.516	2.774	11150	8710	628330	5.2	1.730	1.250
$\alpha = 0.5$	-4.211	2.843	6710	4710	910390	6.45	1.660	1.166
$\alpha = 0.625$	-3.385	2.428	13635	9876.6	745540	5.45	1.664	1.227
$\alpha = 0.83$	-2.839	2.363	10367	8746.2	465350	4.51	1.719	1.302

### 4 PISOS

Relación de luz de losa	ex (m.)	ey (m.)	Kxx	Kyy	K $\theta\theta$	$\rho$	$\Omega\theta_x$	$\Omega\theta_y$
$\alpha = 1$	-2.598	2.598	5960	5960	270840	4.08	1.920	1.350
$\alpha = 0.67$	-2.820	2.301	10910	8770	595260	5.2	1.659	1.302
$\alpha = 0.5$	-3.329	2.367	14380	10110	989040	6.45	1.586	1.210
$\alpha = 0.625$	-2.668	1.954	13834	10132	720810	5.45	1.954	1.258
$\alpha = 0.83$	-2.275	1.893	10533	8795.3	448050	4.51	1.650	1.343

### 5 PISOS

Relación de luz de losa	ex (m.)	ey (m.)	Kxx	Kyy	K $\theta\theta$	$\rho$	$\Omega\theta_x$	$\Omega\theta_y$
$\alpha = 1$	-2.166	2.166	6020	6020	743860	4.08	1.803	1.404
$\alpha = 0.67$	-2.230	1.873	11140	9180	590580	5.2	1.596	1.331
$\alpha = 0.5$	-2.603	1.939	14670	10760	988860	6.45	1.524	1.234
$\alpha = 0.625$	-2.071	1.554	14566	10782	728440	5.45	1.540	1.268
$\alpha = 0.83$	-1.786	1.493	11116	8746.2	465350	4.51	1.595	1.361

### 6 PISOS

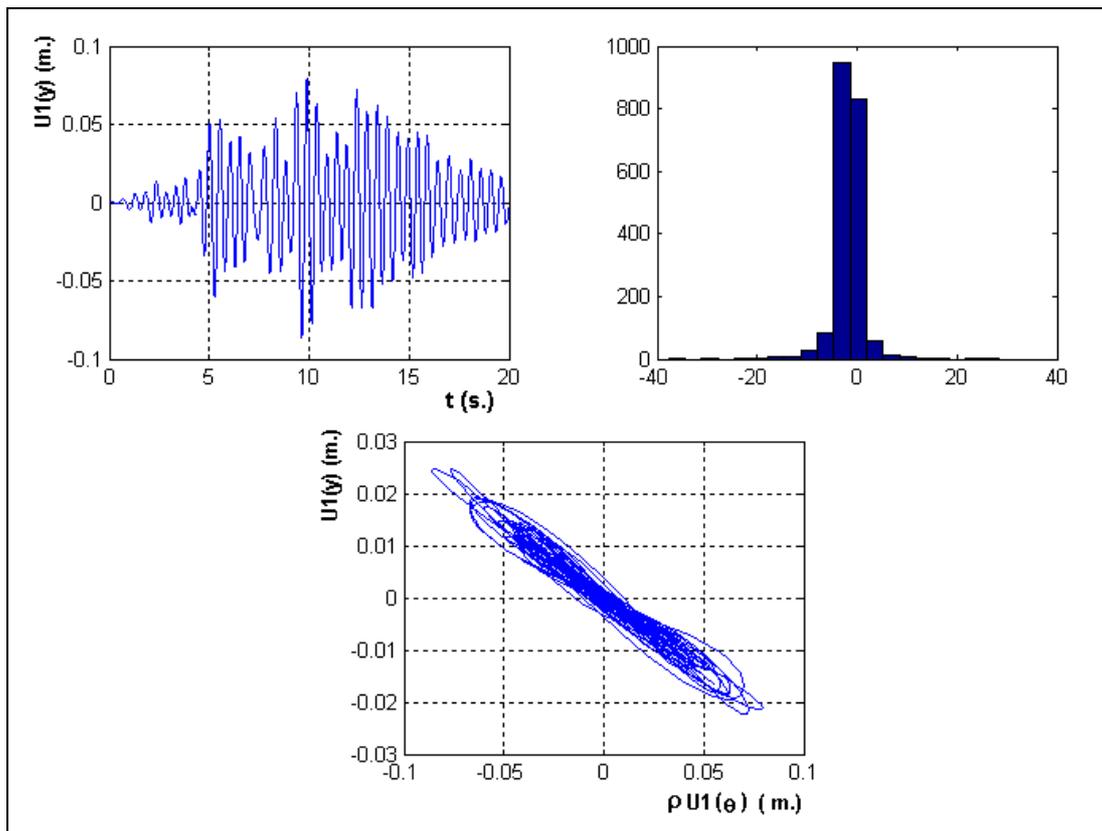
Relación de luz de losa	ex (m.)	ey (m.)	Kxx	Kyy	K $\theta\theta$	$\rho$	$\Omega\theta_x$	$\Omega\theta_y$
$\alpha = 1$	-1.679	1.679	6150	6150	259800	4.08	1.763	1.454
$\alpha = 0.67$	-1.772	1.518	11760	9900	606550	5.2	1.542	1.340
$\alpha = 0.5$	-2.040	1.578	15500	11800	1023900	6.45	1.472	1.243
$\alpha = 0.625$	-1.617	1.230	15799	12759	760580	5.45	1.497	1.263
$\alpha = 0.83$	-1.406	1.178	12054	9911.1	469430	4.51	1.552	1.360

## 5.2 Respuesta en el tiempo

Para ilustrar el trabajo realizado y para entender el problema de la torsión se presenta la respuesta en el tiempo de una estructura de 3 pisos con planta rectangular de dimensiones 10 m., por 20 m., ( $\alpha = 0.5$ ). Primero se presentan los resultados con base empotrada y luego con aisladores de base.

Para la estructura con base empotrada, los datos son los siguientes:  $e_x = 4.211 m$  excentricidad estática;  $\hat{e}_x = 0.653$  excentricidad estática normalizada (ecuación 3 );  $T_s = 0.474 s$ ., período de vibración en sentido Y.;  $m = 36.73 T s^2 / m$  la masa equivalente que es igual a la suma de las masas de cada piso;  $\Omega_\theta^{(s)} = 1.166$  que es la frecuencia torsional en sentido Y;  $\xi^{(s)} = 0.05$  factor de amortiguamiento de la estructura.

Se encuentra la respuesta en el tiempo, para el acelerograma 1S2 que tiene una duración de 20 s., y corresponde a un perfil de suelo S2. Las respuestas se presentan en las figuras 9 y 10.

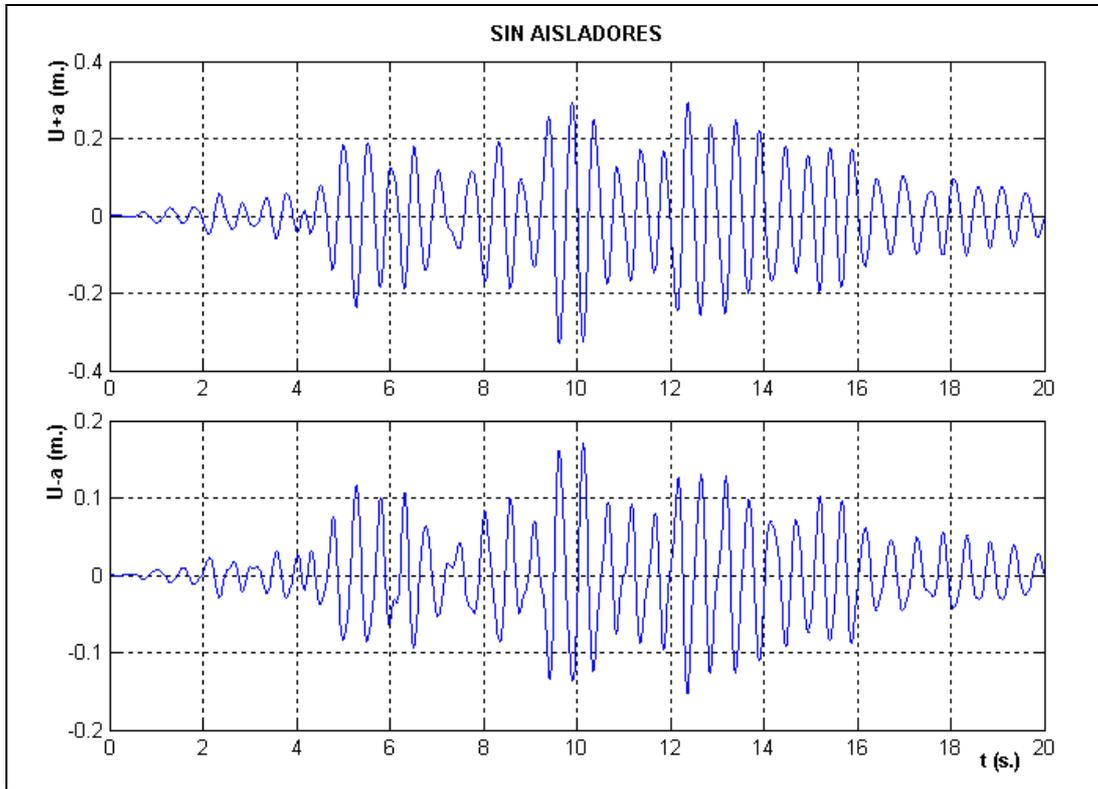


**Figura 9** Respuesta en el tiempo de estructura con base empotrada.

En la parte superior izquierda de la figura 9 se muestra la historia de desplazamientos en el CM., de la estructura. Nótese que estos desplazamientos se encuentran entre 5 y 8 cm. En la figura 10 se verá como se amplifican los desplazamientos en los pórticos exteriores por efecto de la torsión.

En la parte superior derecha de la figura 9 se muestra el histograma de la excentricidad dinámica. La excentricidad dinámica se obtiene dividiendo el momento de torsión con respecto al cortante. Se aprecia en el eje de las X los valores de esta excentricidad y se ve que no son cero por que existe torsión. Lo ideal es que en el histograma se tenga todos los valores concentrados en el punto cero pero esto se da en estructuras que no tienen problemas de torsión.

En la gráfica inferior de la figura 9, se presenta la repuesta del giro de torsión normalizado y del desplazamiento lateral, cada punto representa como se desplaza y rota la estructura.



**Figura 10** Historia de desplazamientos en pórticos exteriores sin aisladores de base.

En la figura 10 se muestra la respuesta en desplazamientos de los pórticos débil, en la parte superior y fuerte en la parte inferior. Se aprecia que estos desplazamientos son mayores a los desplazamientos en el CM., debido a la torsión. Los desplazamientos máximos del pórtico débil están alrededor de los 30 cm., cantidad muy alta comparando con los desplazamientos del CM. En el pórtico fuerte estos desplazamientos máximos están en por los 16 cm.

Por otra parte, se han colocado aisladores de base de tal manera que el período objetivo  $T^{(b)} = 2.0 s$ , que el CR coincida con el CM., luego  $e^{(b)} = 0$ . La relación de frecuencia a torsión con respecto a la frecuencia traslacional  $\Omega_{\theta}^{(b)} = 1.2649$ . El factor de amortiguamiento del sistema de aislación  $\xi^{(b)} = 0.10$ ; la masa del sistema de aislación se considera el 10% de la masa de la superestructura,  $m^{(b)} = 3.673 T s^2 / m$ . La respuesta en desplazamientos del sistema de aislación y de la superestructura se muestra en la figura 11.

Al coincidir el CM., con el CR., en el aislamiento, todos los pórticos del sistema de aislamiento que están en una misma dirección se desplazan lo mismo. En la superestructura continúa habiendo torsión ya que los pórticos extremos no son iguales como se aprecia en la parte inferior de la figura 11 sin embargo estos desplazamientos son mucho más bajos a los que se tenía en la estructura con base empotrada.

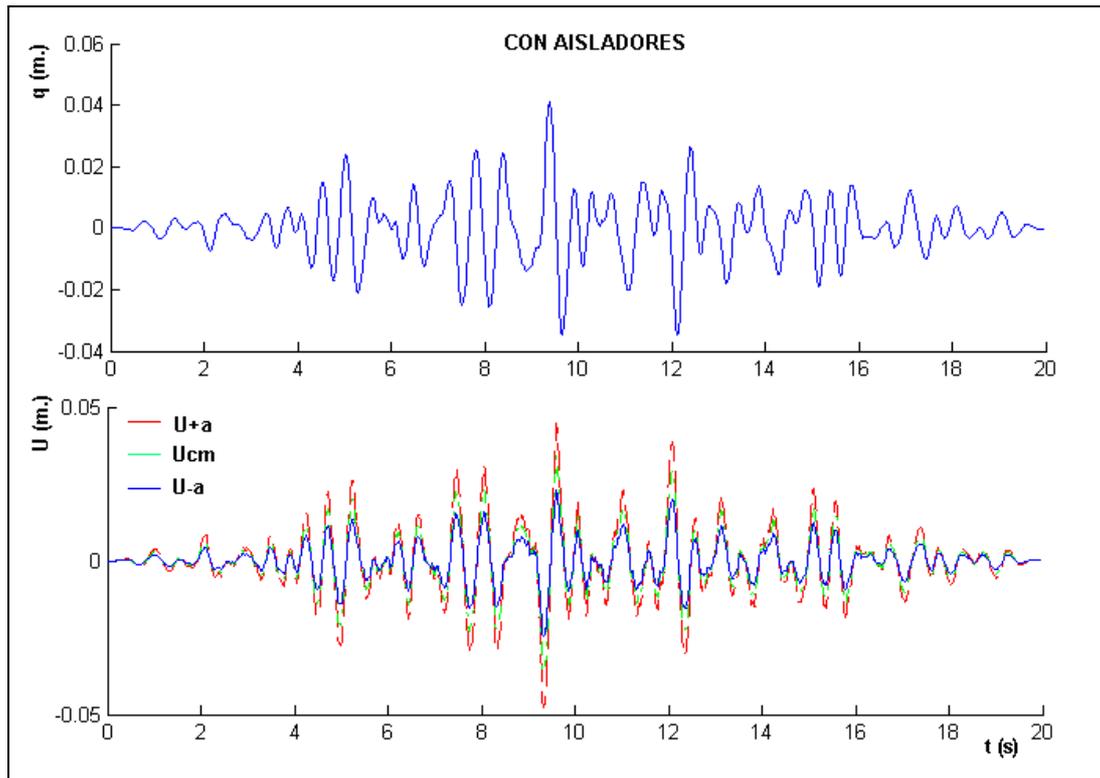


Figura 11 Desplazamientos en sistema de aislación y en superestructura.

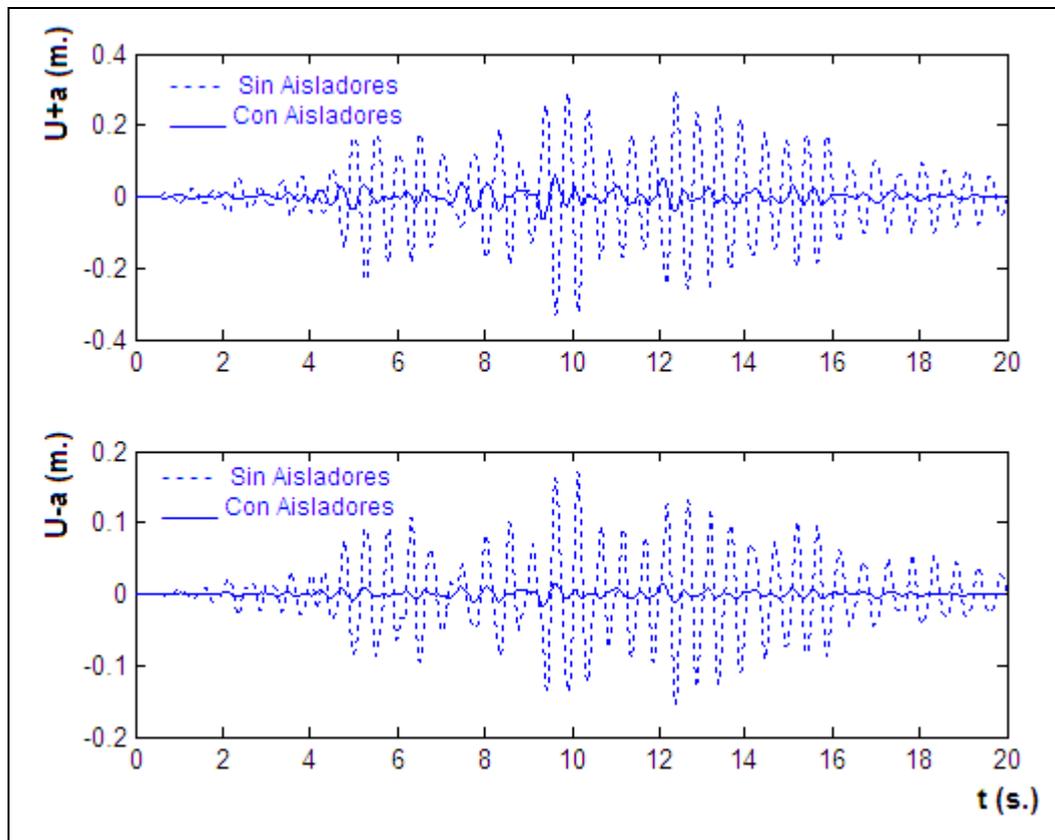
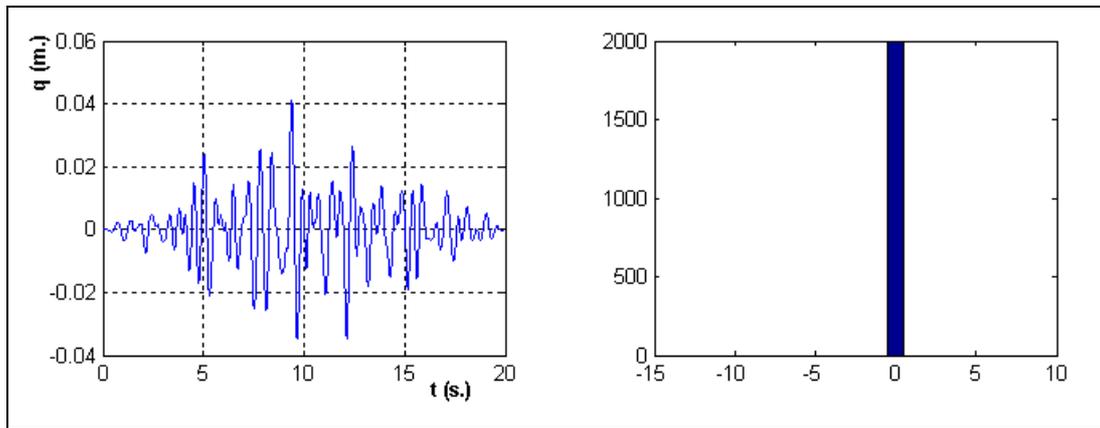


Figura 12 Desplazamientos en pórticos exteriores de superestructura con y sin aisladores.

En efecto, en la figura 12 se muestran los desplazamientos laterales de los pórticos exteriores de la superestructura sin y con sistema de aislamiento, se aprecia que los desplazamientos de la estructura sin aisladores de base son mucho más altos que los desplazamientos de la estructura con aisladores de base, con lo que se reduce notablemente el problema de torsión ya que al ser los desplazamientos bajos los momentos de torsión que se van a generar son bajos.



**Figura 13** Desplazamientos en sistema de aislamiento e histograma de excentricidad dinámica.

En la figura 13 se aprecia a la izquierda los desplazamientos del sistema de aislación y a la derecha el histograma de la excentricidad dinámica, se aprecia que todos los valores están en un solo rango que coincide el punto 0. Esto significa que no existe torsión en el sistema de aislación. Este histograma es de desear que tengan las estructuras con y sin aislamiento.

**Tabla 2** Valores medios de desplazamientos obtenidos, para  $\alpha = 0.5$  y en suelo S2.

PISOS	Desplazamientos Estructura sin sistema de aislamiento			Desplazamientos Estructura con sistema de aislamiento			
	SISMOS	Pórtico Débil	CM	Pórtico Fuerte	Pórtico Débil	CM	Pórtico Fuerte
Promedio		0.3190	0.0828	0.1641	0.0600	0.0383	0.0166

4 PISOS	Desplazamientos Estructura sin sistema de aislamiento			Desplazamientos Estructura con sistema de aislamiento			
	SISMOS	Pórtico Débil	CM	Pórtico Fuerte	Pórtico Débil	CM	Pórtico Fuerte
Promedio		0.3416	0.0871	0.1749	0.0669	0.0458	0.0246

5 PISOS	Desplazamientos Estructura sin sistema de aislamiento			Desplazamientos Estructura con sistema de aislamiento			
	SISMOS	Pórtico Débil	CM	Pórtico Fuerte	Pórtico Débil	CM	Pórtico Fuerte
Promedio		0.3305	0.0903	0.1736	0.0716	0.0523	0.0329

6 PISOS	Desplazamientos Estructura sin sistema de aislamiento			Desplazamientos Estructura con sistema de aislamiento			
	SISMOS	Pórtico Débil	CM	Pórtico Fuerte	Pórtico Débil	CM	Pórtico Fuerte
Promedio		0.3622	0.1001	0.1962	0.0757	0.0583	0.0410

### 5.3 Valores promedios de respuestas con y sin aisladores para $\alpha = 0.5$

Se procedió en forma similar a la indicada en el apartado anterior con todas las estructuras y con todos los sismos. Luego de ello se obtuvieron las respuestas máximas y de estas se obtuvo el promedio. Para ilustrar lo indicado, en la tabla 2 se muestran los desplazamientos laterales encontrados en los pórticos exteriores de las estructuras con y sin aisladores de base, para las estructuras que tiene  $\alpha = 0.5$ . Los valores indicados es el promedio de las respuestas máximas encontradas con los 7 sismos artificiales para suelo S2.

En la tabla 2 se aprecia que en la estructura sin aisladores de base, los desplazamientos laterales en los pórticos exteriores son mayores a los desplazamientos en el CM., con lo que el problema de la torsión es muy grave. Ahora, en la estructura con aisladores de base se aprecia que los desplazamientos laterales del pórtico débil son mayores a los del CM., pero los desplazamientos laterales del pórtico fuerte son menores, mejorando notablemente el comportamiento de la estructura.

**Tabla 3** Factores de amplificación por torsión en estructura sin y con aisladores.

3 PISOS	Factor de Amplificación Torsional sin Aislamiento		Factor de Amplificación Torsional con Aislamiento	
	Pórtico Débil	Pórtico Fuerte	Pórtico Débil	Pórtico Fuerte
Promedio	2.8513	0.9809	0.1065	-0.0574

4 PISOS	Factor de Amplificación Torsional sin Aislamiento		Factor de Amplificación Torsional con Aislamiento	
	Pórtico Débil	Pórtico Fuerte	Pórtico Débil	Pórtico Fuerte
Promedio	2.9202	1.0071	0.0905	-0.0651

5 PISOS	Factor de Amplificación Torsional sin Aislamiento		Factor de Amplificación Torsional con Aislamiento	
	Pórtico Débil	Pórtico Fuerte	Pórtico Débil	Pórtico Fuerte
Promedio	2.6578	0.9220	0.0797	-0.0703

6 PISOS	Factor de Amplificación Torsional sin Aislamiento		Factor de Amplificación Torsional con Aislamiento	
	Pórtico Débil	Pórtico Fuerte	Pórtico Débil	Pórtico Fuerte
Promedio	2.6194	0.9605	0.0622	-0.0621

En la tabla 3 se presentan los factores de amplificación por torsión, en los pórticos exteriores para la estructura calculada sin aisladores de base, a la izquierda y con aisladores de base a la derecha. Cuando la estructura no tiene aisladores de base los factores de amplificación son altos, en el pórtico débil varían entre 2.6 y 2.9. Esto significa que las fuerzas laterales en los pórticos débiles serán aproximadamente 3 veces mayores a las fuerzas laterales con las cuales fueron diseñadas si no se consideró la mampostería.

En cambio cuando se tiene aisladores de base estos factores de amplificación por torsión, son bastante bajos con lo que prácticamente se ha eliminado el problema de la torsión en edificios abiertos.

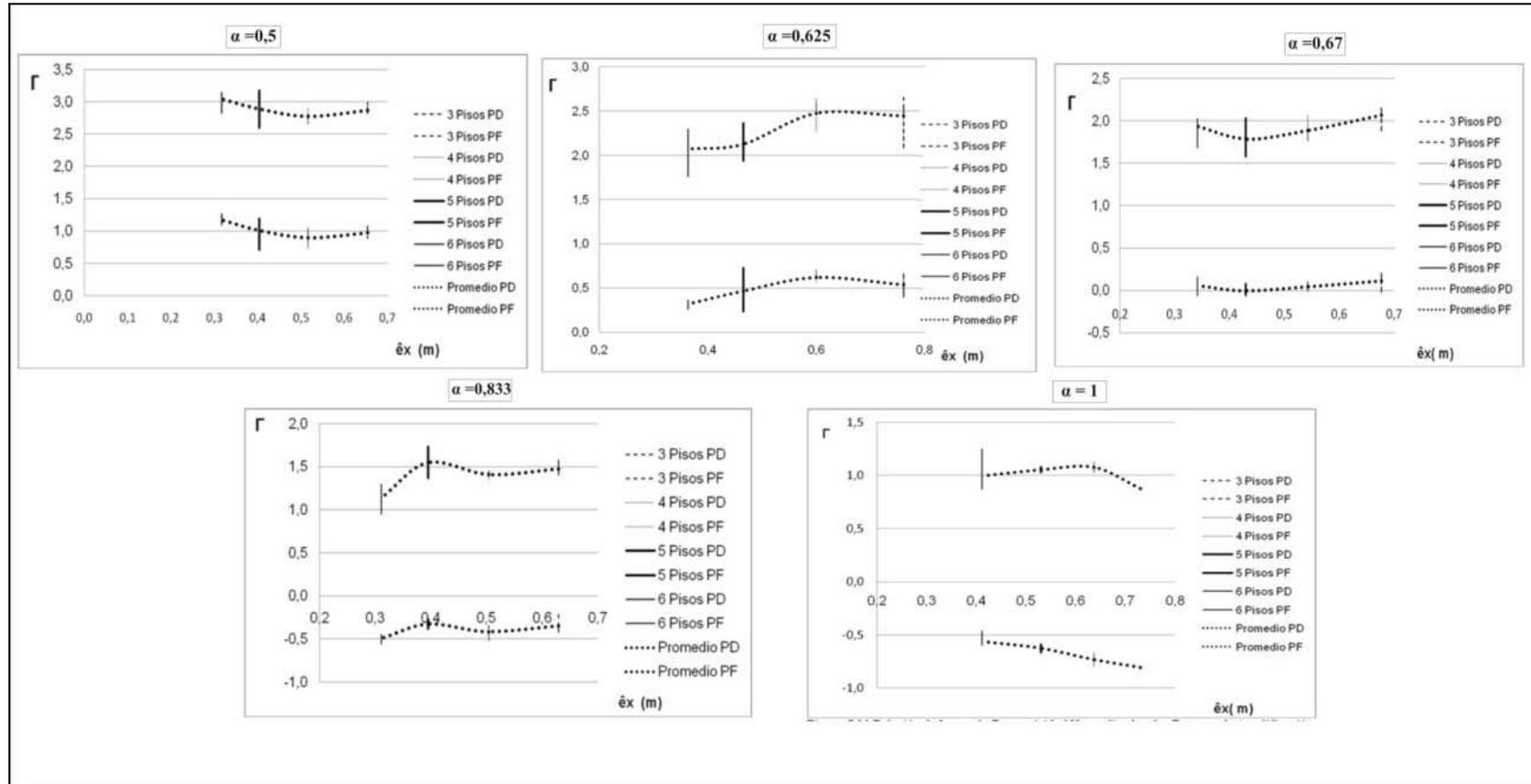


Figura 14 Factores de amplificación en cada uno de los edificios analizados.

### 5.4 Factores de amplificación en estructuras sin aisladores de base

En la figura 14 se muestran los factores de amplificación por torsión en las estructuras con base empotrada, para todos los casos analizados, para un perfil de suelo S1. La primera gráfica corresponde a plantas rectangulares con  $\alpha = 0.5$  y la última que aparece en la parte inferior derecha para  $\alpha = 1.0$ . En cada una de ellas se tienen los factores de amplificación de desplazamientos para los edificios de 3 a 6 pisos.

Mientras más alargada es la planta, mayores son los factores de amplificación, para el pórtico débil.

## 6. FACTORES DE AMPLIFICACIÓN

En la figura 15 se muestran los factores de amplificación encontrados en las estructuras con plantas cuadradas, de 3 a 6 pisos; en los diferentes tipos de suelo, con y sin aisladores de base. Se aprecia que el tipo de suelo no influye en el valor de  $\Gamma$ . Es verdad que se tienen diferentes desplazamientos por el tipo de suelo pero al calcular  $\Gamma$  se tienen valores similares en los cuatro tipos de suelo.

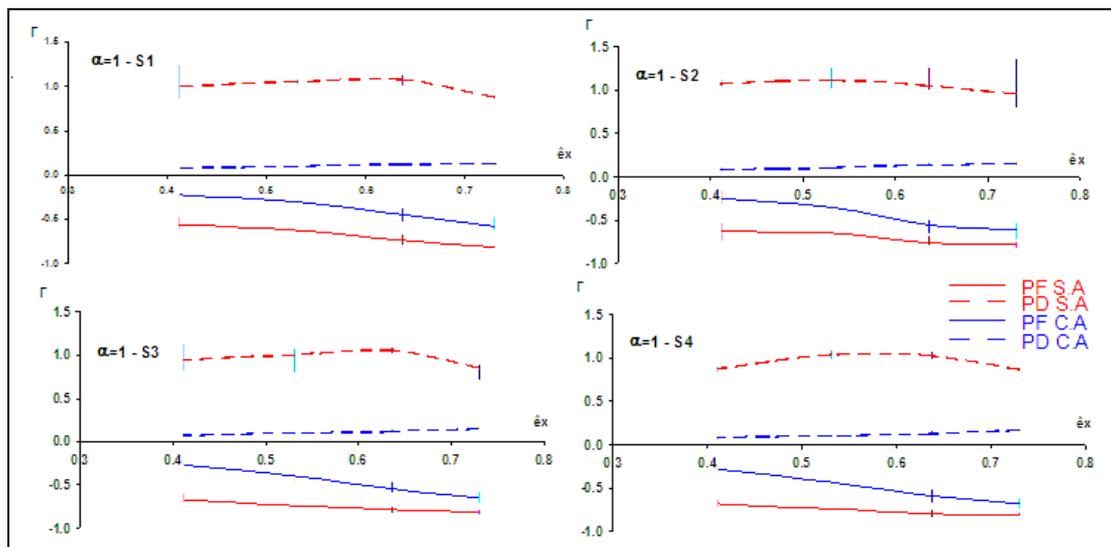
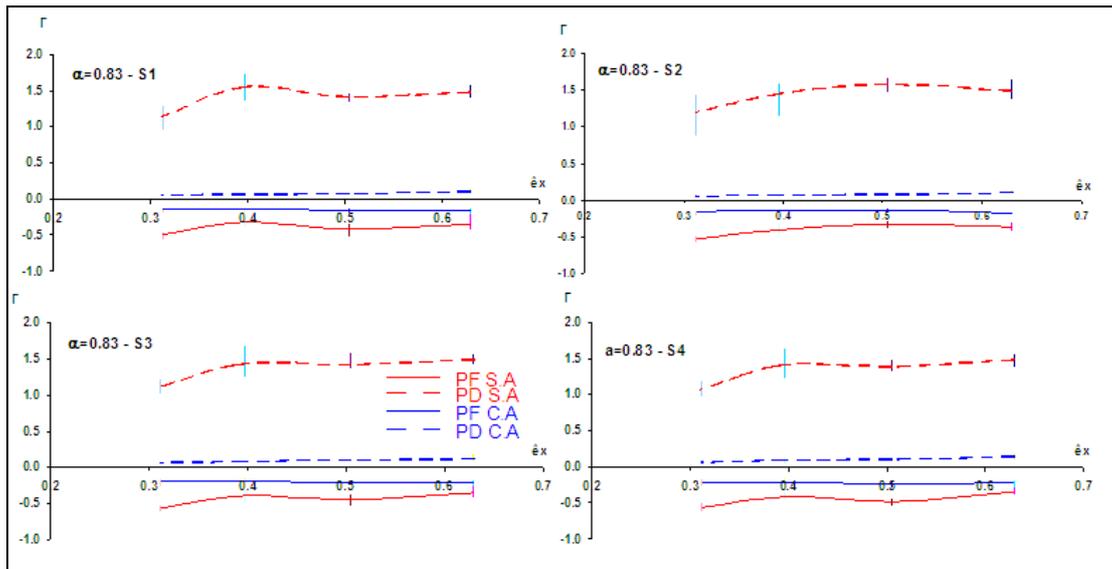


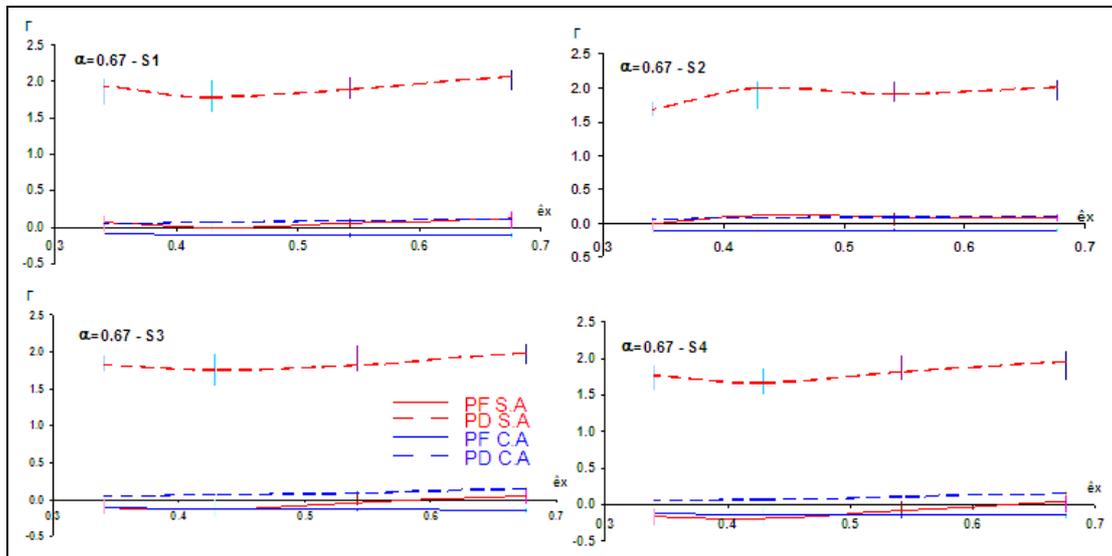
Figura 15 Factores de amplificación con y sin aisladores. Para  $\alpha = 1$

En la figura 16 se presentan los resultados para  $\alpha = 0.83$ ; en la figura 17 para  $\alpha = 0.67$ ; en la figura 18 para  $\alpha = 0.625$  y en la figura 19 para  $\alpha = 0.5$ .

En todos los casos analizados se observó que el suelo no influye mayormente en el cálculo del factor de amplificación. A excepción de la planta rectangular con  $\alpha = 0.5$  en que si se notan diferencias en el factor de amplificación, especialmente para el pórtico débil.



**Figura 16** Factores de amplificación con y sin aisladores. Para  $\alpha = 0.83$



**Figura 17** Factores de amplificación con y sin aisladores. Para  $\alpha = 0.67$

Lo que si se nota en las figuras 15 a 19 es que se reduce notablemente el factor de amplificación por torsión en las estructuras con aisladores de base. En la mayor parte de los casos se aprecia que este factor está alrededor de cero, lo que significa que no existen problemas de torsión en las estructuras con aisladores de base.

La reducción de la torsión en estructuras con aisladores de base en gran parte se debe a que los desplazamientos laterales en la superestructura son muy bajos en comparación con los que se producen en el sistema de aislamiento. Esto influye en que los valores de  $\Gamma$  sean bajos al utilizar la ecuación ( 11 ).

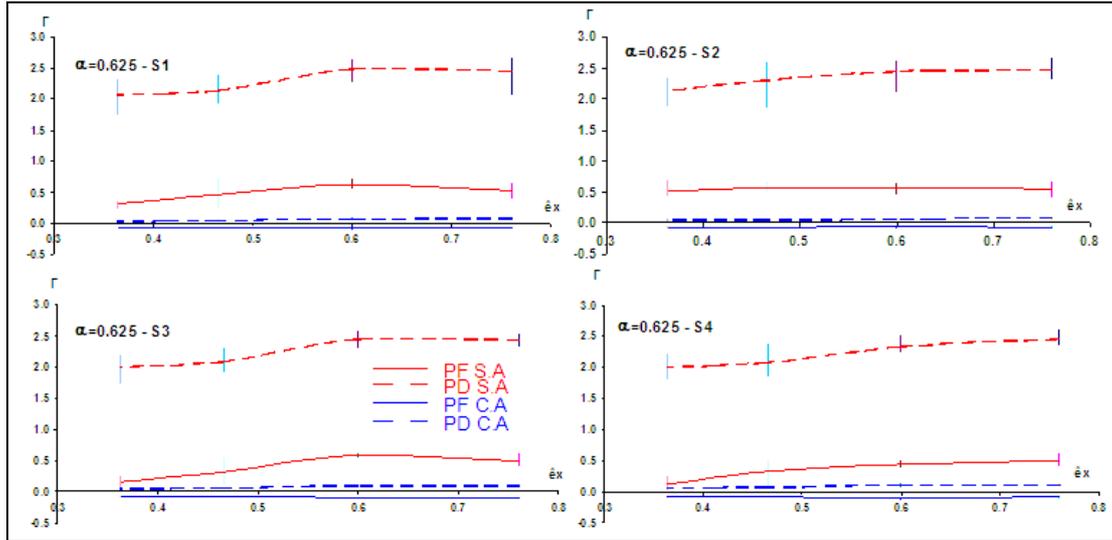


Figura 18 Factores de amplificación con y sin aisladores. Para  $\alpha = 0.625$

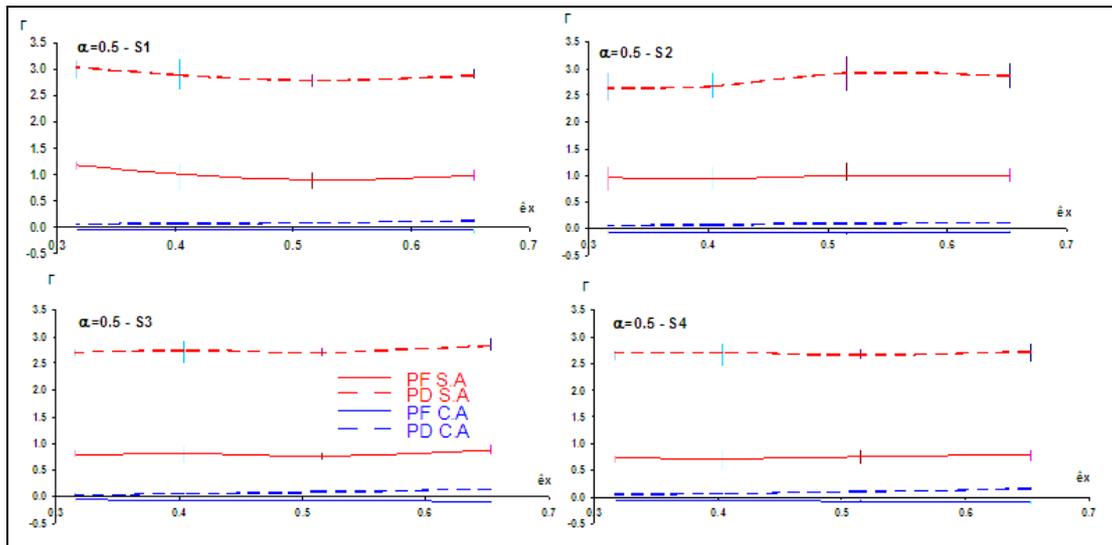


Figura 19 Factores de amplificación con y sin aisladores. Para  $\alpha = 0.50$

## 7. CONCLUSIONES

Se ha encontrado el factor de amplificación por torsión en 20 edificios abiertos de hormigón armado de 3 a 6 pisos, con diferentes dimensiones en planta, ante la acción de 28 sismos sintéticos compatibles con los espectros del Código Ecuatoriano de la Construcción, para la zona de mayor peligrosidad sísmica del Ecuador y en los cuatro perfiles del suelo que contempla el código. Se han analizado los edificios con y sin aisladores de base. Del estudio realizado se desprenden las siguientes conclusiones:

- En los edificios abiertos con base empotrada, la excentricidad estática está alrededor del 20 al 30% de la longitud de la planta, lo que implica que tienen importantes problemas de torsión.

- El problema de torsión es más grave en edificios con planta rectangular en que la una dimensión es el doble de la otra,  $\alpha = 0.5$ . En estos edificios el factor de amplificación por torsión está alrededor de 3 para el pórtico débil y en el pórtico fuerte los desplazamientos laterales son mayores a los desplazamientos del CM. De tal manera que es muy crítico el problema en este tipo de estructuras con  $\alpha = 0.5$ . En edificios abiertos con planta cuadrada también existen problemas de torsión pero el problema es menos crítico.
- Los aisladores de base minimizan los problemas de torsión en edificios abiertos, en parte debido a que los desplazamientos laterales en la superestructura son bastante bajos en comparación con los desplazamientos que se producen en el sistema de aislamiento. Esto se da cuando en el sistema de aislación se tiene que el centro de masas coincide con el centro de rigidez es decir no hay excentricidad estática en el sistema de aislamiento. Por lo tanto, si se desea construir un edificio abierto en el cual la mampostería se acopla a la estructura lo ideal es que este se construya sobre aisladores de base.

## AGRADECIMIENTO

A los directivos de la Escuela Politécnica del Ejército, por haber financiado el proyecto de investigación: "Reducción de los problemas de torsión en edificios con aisladores de base" desarrollado entre el 2006 y 2008.

## REFERENCIAS

1. Aguiar R., (1999), *Sismo de Colombia. Eje Cafetero 1999*, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 164 p., Quito.
2. Aguiar R., Almazán J.L., Dechent D., Suárez V., (2008), *Aisladores de base elastoméricos y FPS*, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 292 p., Quito.
3. Aguiar R., Jara A., Páez D., (2009), "Factores de amplificación por torsión en edificios abiertos", *IV Congreso de Ciencia y Tecnología. Escuela Politécnica del Ejército*, 18 p., Quito.
4. Cheung W., and Tso W., (1986), "Eccentricity in irregular multistory buildings", *Canadian Journal of Civil Engineering*, **13**, 46-52.
5. Hernández J., López O., (2007), "Investigación de respuestas sísmicas críticas incorporando la torsión accidental", *Boletín Técnico. Instituto de Materiales y Modelos Estructurales*. **45 (3)**, 22-51, Caracas.
6. Hernández J., López O., (2003), "Confiabilidad del método de la torsión estática de la norma sismo resistente Venezolana", *Boletín Técnico del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales, IMME. Universidad Central de Venezuela*, **41 (2-3)**, 1-27, Caracas.
7. Jara A., (2009), *Análisis sísmico de edificios abiertos con y sin aisladores de base Elastoméricos*. Tesis de Grado en Ingeniería Civil. Escuela Politécnica del Ejército. En ejecución.

8. Páez D., (2009), *Torsión estática de edificios abiertos con y sin aisladores de base Elastoméricos*. Tesis de Grado en Ingeniería Civil. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manta. En ejecución.
9. Seguíñ (2007), *Torsión en sistemas aislados sísmicamente con dispositivos elastoméricos*, Tesis Doctoral (Ph.D.) Escuela de Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile, 229 p., Santiago.
10. Vásquez J., and Riddell R., (1984), "Existence of centers of resistance and torsional uncoupling of earthquake response of buildings", *Proc., of the 8<sup>th</sup> World. Conf. in Earthquake Engrg., Prentice Hall, Inc, IV*, 187-194, Englewood Cliffs.
11. Villafañe E., y Crisafulli F., (1986), "Sobre la introducción de las normas antisísmicas para el análisis de la torsión en modelos tridimensionales de edificios", *VI Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural*, 14 p., Buenos Aires.

# DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE ALTA CAPACIDAD PARA AISLAMIENTO DE DNA PARA ANÁLISIS DE ÁCIDOS NUCLEICOS DE PATÓGENOS EN MUESTRAS CLÍNICAS

Marcelo Grijalva<sup>1</sup>, Paola Párraga<sup>1</sup> y Patricia Jiménez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Biotecnología Humana  
Carrera de Ingeniería en Biotecnología  
Escuela Superior Politécnica del Ejército

<sup>2</sup>Laboratorio de Biotecnología Animal  
Carrera de Ingeniería en Biotecnología  
Escuela Superior Politécnica del Ejército

## RESUMEN

La amplificación directa de DNA bacteriano a partir de muestras clínicas con cebadores de PCR de amplio espectro es una importante alternativa para el reconocimiento de patógenos en sangre. Sin embargo, la principal desventaja de esta técnica es la dificultad para preparar la muestra clínica para el ensayo.

El propósito de este estudio fue diseñar un método de alta capacidad de procesamiento de muestras con eliminación del background genómico humano. Con este objetivo, se modificó un sistema de extracción de DNA basado en el uso de columnas con membranas de sílica gel, usando un paso previo de centrifugación diferencial. La sensibilidad analítica de este método de purificación de DNA fue evaluada con un ensayo 16S rDNA PCR mediante el uso de diluciones seriadas de cultivos bacterianos de especies modelo.

El background genómico humano fue eliminado por remoción del plasma y capa leucoplaquetaria. Se comprobó que este paso no reduce la cantidad de CFU presentes en la muestra. El método diseñado demostró ser eficiente y reproducible. La sensibilidad del método fue 1 CFU/mL. Además, probó ser aplicable para el uso con muestras clínicas. Este estudio será complementado con una investigación donde se validará clínicamente el ensayo descontaminado con muestras clínicas reales de pacientes con bacteriemia/sepsis.

## ABSTRACT

Direct amplification of bacterial DNA from clinical specimens with broad-range primers through PCR provides an important alternative to the detection and identification of pathogens causing bacteremia/sepsis. Nevertheless, the main drawback of this method is the difficulties in sample processing to comply with the requirements of DNA extraction systems in terms of sample volume and DNA extraction capacity.

The purpose of this study was to design a high capacity sample processing method with elimination of background human DNA while conserving pathogen-related DNA. For this goal, a DNA extraction procedure based in a silica gel membrane column was carried out including a previous differential centrifugation step. The analytical sensitivity of this DNA purification method was evaluated by a 16S rDNA PCR on dilution series of model bacteria spiked into blood samples.

The background human DNA was eliminated by removal of plasma and buffy coat. It was demonstrated that this step does not decrease the amount (CFU) of bacteria present in the sample. The method optimized here showed to be efficient and reproducible. With the previous removal of human DNA from the sample, the sensitivity of the PCR assay reached 1 CFU/mL. We applied the assay for the detection of pathogenic DNA in 2 samples of a hemoculture-

positive bacteremic patient with excellent results. The present study will be complemented by a clinical validation step by applying our decontaminated PCR assay on clinical samples from patients with clinically suspected bacteremia/sepsis.

## 1 INTRODUCCIÓN

La infección y sepsis son problemas clínicos especialmente importantes, en donde la aplicación de nuevas técnicas diagnósticas podría contribuir en términos de disminución de tasas de morbi-mortalidad, reducción de estancia hospitalaria, decremento de incidencia de infección nosocomial y disminución global de los costos clínicos.

La mayor parte de las bacterias de interés clínico pueden identificarse mediante técnicas microbiológicas convencionales, las cuales precisan del aislamiento previo del patógeno y se fundamentan en sus propiedades fenotípicas (Rocidio y Mendoza, 2004).

El hemocultivo se ha convertido en el estándar de oro para el diagnóstico de sepsis. Sin embargo, esta técnica puede no ser lo suficientemente rápida debido a que usualmente toma entre 2 - 8 días para proporcionar resultados definitivos (Crowley, 2002).

En los últimos años se ha promovido el uso de técnicas moleculares como PCR (Polymerase Chain Reaction) y secuenciación para el diagnóstico de enfermedades causadas por bacterias. La amplificación directa del DNA bacteriano a partir de muestras clínicas mediante el uso de PCR de amplio espectro presenta ventajas para la determinación de patógenos infecciosos en tejidos comúnmente estériles (Rantakokko-Jalava & Jalava, 2002).

El aislamiento de DNA es una técnica básica en biología molecular. La calidad, cantidad e integridad del DNA afectan directamente a los resultados de las pruebas efectuadas a partir de éste. Según Surzycki (2000), un procedimiento de extracción a gran escala puede proporcionar de 200 - 300 µg de DNA cromosomal a partir de 2 - 4 x 10<sup>10</sup> bacterias frescas o de 20 - 30 mg de biomasa congelada. No obstante, cuando el DNA bacteriano proviene de muestras clínicas, su probabilidad de recuperación se reduce conforme disminuye el volumen de muestra. Al mismo tiempo, el background genómico humano se convierte en una barrera física para la adhesión del DNA patógeno a diversas membranas o partículas empleadas para la purificación, haciendo el ensayo poco reproducible (Jordan & Durso, 2000).

La variabilidad de tipos de muestras clínicas incrementa la complejidad del diagnóstico bacteriano por PCR. Esto se ve reflejado en la dificultad de extrapolar los límites de detección determinados experimentalmente a la verdadera sensibilidad en muestras clínicas (Rantakokko-Jalava & Jalava, 2002).

Muchos investigadores han planteado la posibilidad de que el background genómico humano sea un factor inhibitorio durante reacciones PCR (Rantakokko-Jalava *et al*, 2002). Un método óptimo de procesamiento de muestras, por lo tanto, deberá concentrar el DNA, fundamentalmente el perteneciente al organismo blanco y eliminar los agentes inhibitorios usualmente presentes en los fluidos biológicos.

A pesar de la amplia utilización de ensayos moleculares para estudios clínicos, no existen investigaciones a gran escala de validación de sistemas moleculares en este escenario específico. Un taxativo importante ha sido la falta de estandarización y reproducibilidad en el uso de la técnica de extracción de DNA de patógenos en muestras clínicas, así como la carencia de sistemas de extracción de alta capacidad que soporten grandes volúmenes de muestra.

Este trabajo propone la modificación de un sistema de extracción y purificación de DNA de patógenos presentes en muestras clínicas mediante la eliminación de DNA genómico humano de leucocito. Mediante esta modificación se espera obtener un sistema capaz de tolerar altos volúmenes de muestra sin que la capacidad de extracción se vea alterada.

## **2 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1 Cultivos puros bacterianos**

Se realizaron siembras microbiológicas en agar a partir de cultivos bacterianos puros de *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* y *Enterococcus faecalis*, (provistos por I. Narváez, Hospital Carlos Andrade Marín), con el fin de obtener el volumen de bacterias necesario para la transferencia a medio de cultivo líquido. Los medios de cultivo empleados fueron escogidos en base a los requerimientos de crecimiento de cada bacteria. Se utilizaron los medios LEVINE EMB Agar (*Escherichia coli*) (ACUMEDIA, U.S.A.), Manitol Salt Phenol-Red Agar (ACUMEDIA, U.S.A.) (*Staphylococcus aureus*) y Agar Sangre (BECTON DICKINSON, Francia) (*Enterococcus faecalis*).

Posteriormente se inocularon tubos con LB Broth (BECTON DICKINSON, Francia) para conseguir el crecimiento exponencial de cada tipo de bacteria.

En cada siembra se colocaron tres asas colmadas de bacterias (aproximadamente 150 µL), tomadas de los cultivos bacterianos en agar. El experimento se hizo por duplicado. Los tubos inoculados fueron llevados a incubación con agitación a 37°C durante 18h.

### **2.2 Preparación de Diluciones Seriadas**

Se realizaron diluciones seriadas en suero fisiológico a partir de los cultivos puros obtenidos en el paso descrito previamente. Las diluciones obtenidas fueron valoradas mediante un ensayo de conteo de unidades formadoras de colonias (CFU). Los medios de cultivo utilizados para cada cepa bacteriana fueron los detallados anteriormente.

### **2.3 Preparación de Muestras Artificiales**

Para desarrollar un sistema de extracción de DNA de patógenos a partir de sangre periférica fue necesario construir muestras infectadas con una cantidad de bacterias conocida para el posterior análisis de la técnica. Para ello se añadió un volumen determinado de dilución seriada de cultivo bacteriano en un volumen establecido de sangre completa (1:10). Las muestras artificiales fueron evaluadas mediante un ensayo de conteo de CFU.

### **2.4 Eliminación de DNA Genómico Humano**

Se probó la técnica de centrifugación diferencial (CD) con el objetivo de eliminar el DNA humano presente en leucocitos mediante la remoción del plasma y la capa leuco-plaquetaria. Las muestras fue sometida a este procedimiento antes de la extracción de DNA y los resultados fueron evaluados en relación a muestras no tratadas.

Las muestras escogidas para CD fueron sometidas a centrifugación por 10 minutos a 3000 rpm, seguidas por eliminación del plasma y la capa leuco-plaquetaria. Las muestras así tratadas fueron posteriormente evaluadas mediante conteo de CFU.

### **2.5 Extracción de DNA a partir de Muestras de Sangre**

Se probaron dos métodos de extracción de DNA que probaron ser eficientes para el aislamiento de ácidos nucleicos de bacterias Gram-positivas y Gram-negativas. El primer protocolo fue una modificación del kit QIAGEN DNA Blood Mini Kit (QIAGEN, Alemania) para adaptarlo para extracción de DNA genómico bacteriano. El segundo procedimiento se basó en extracción orgánica mediante cloroformo-isoamil alcohol. La elección del mejor sistema de purificación de DNA dependió de su eficiencia para la extracción simultánea de ácido nucleico bacteriano y humano.

Los sistemas empleados se basan en el uso de un cóctel lítico conformado por lisozima, lisostafina y liticasa, a concentraciones de 15mg/ml, 1.8mg/ml y 5U/μl respectivamente, para la destrucción de la pared celular bacteriana. La verificación de la existencia de DNA en las muestras se realizó mediante electroforesis en gel de agarosa al 0.8%.

## 2.6 Identificación de DNA Genómico Bacteriano mediante 16S rDNA PCR

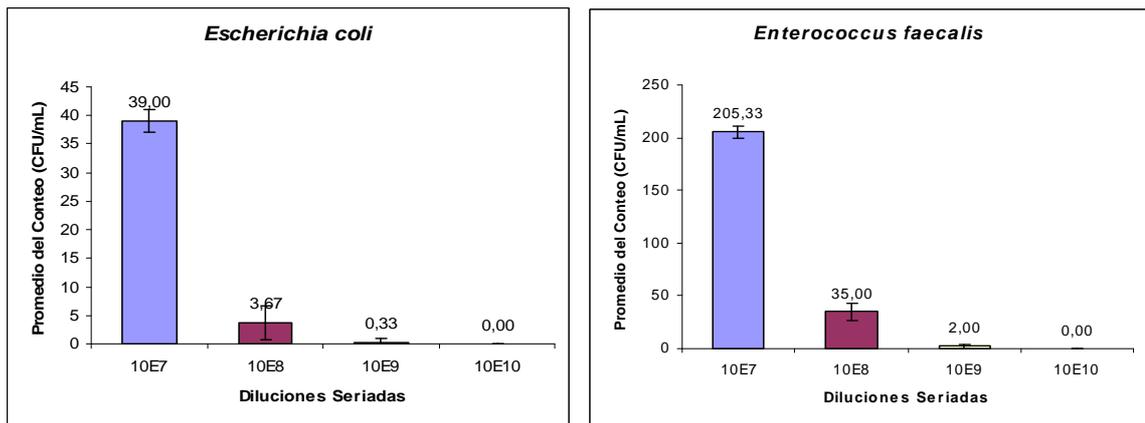
Para la identificación de la presencia de DNA genómico bacteriano se decidió emplear un ensayo de PCR de amplio espectro que amplifica un fragmento del gen *rrs* (16S rDNA). Las secuencias de los cebadores empleadas fueron tomadas de Warwick, *et al* (2003) y el protocolo de PCR de Izquierdo (2007). Los cebadores Nf (5' TCC TAG GGG AGG CAG CAG T 3') y Nr (5' GGA CTA CCA GGG TAT CTA ATC CTG TT 3') poseen una longitud de 19 y 26 bp, respectivamente, y amplifican un fragmento de 476 bp.

La visualización del resultado de la amplificación por PCR se realizó mediante electroforesis en gel de agarosa al 2.0%. Con esta técnica se verificó la existencia del amplicón deseado.

## 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Debido a que los agentes etiológicos más comunes de bacteriemias en neonatos son *Escherichia coli* (Gram-negativa) y *Staphylococcus aureus* (Gram-positiva), se decidió emplearlos como microorganismos modelo de este estudio (Reimer *et al*, 1997). Sin embargo, *S. aureus* no se comportó adecuadamente. Se presume que este hecho se debe a que, las cepas empleadas para los ensayos fueron sometidas a un estrés excesivo y por lo tanto perdieron su viabilidad. Para superar este inconveniente, se decidió emplear otra cepa bacteriana Gram-positiva, *Enterococcus faecalis*, con la que se obtuvieron los resultados deseados que se muestran en la figura 1.

Conociendo de antemano que las bacterias pueden adherirse a las células sanguíneas, en especial leucocitos, mediante fuerzas físico-químicas o por especificidad del microorganismo a determinada superficie (Henderson *et al*, 2000), fue necesario el análisis de muestras contaminadas a través de recuento de CFU, para de esta manera conocer si la pérdida de bacterias en el proceso de eliminación de componentes de la sangre afectaba de manera significativa los resultados del ensayo.



**Figura 1** Resultados del recuento de CFU de *E. coli* y *E. faecalis* de los ensayos de siembra de diluciones seriadas.

Para conseguir la eliminación del DNA genómico humano, se decidió emplear la técnica de centrifugación diferencial, ya que con ésta se consigue separar muestras sanguíneas en sus componentes principales: plasma, leucocitos y eritrocitos (Anaya *et al*,

2005). La fase de interés para el estudio fue la capa eritrocitaria, por lo que al descartar el plasma y la capa leuco-plaquetaria se cumplió con el fin de anular el background genómico humano presente en linfocitos y mantener a las bacterias en la fracción restante de la muestra. La evaluación de este proceso demostró que no existe una pérdida representativa de microorganismos, es decir que la eliminación del DNA humano no afecta a los resultados que se puedan obtener a partir de la muestra. Además, se consigue la concentración de las bacterias en una pequeña fracción de la sangre, hecho que aporta al sistema de aislamiento de DNA como se observa en la figura 2.

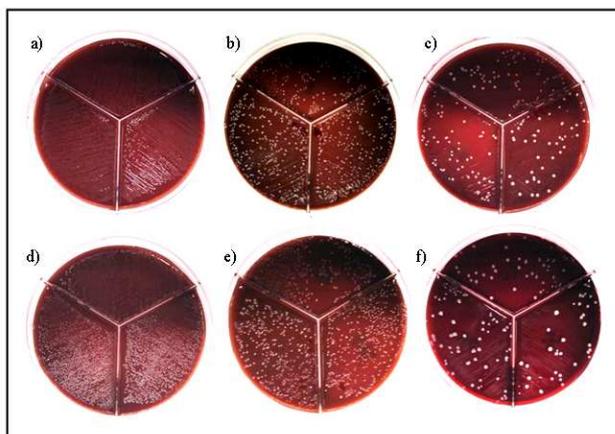


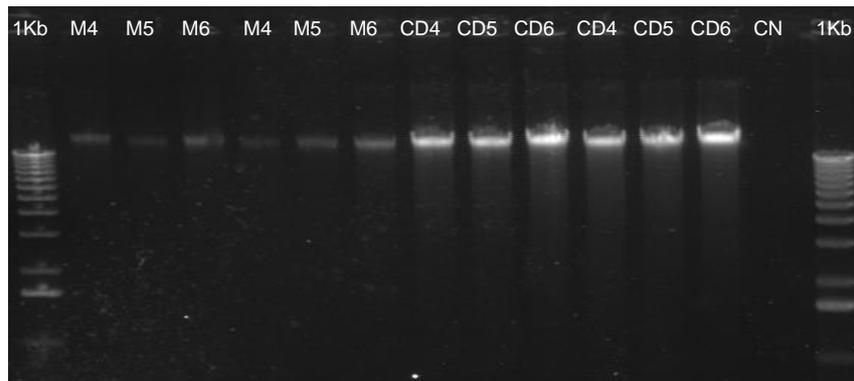
Figura.2 Fotografía del recuento de CFU de las muestras contaminadas con *E. faecalis* tratadas con centrifugación diferencial (CD): a) MEF8, b) MEF7 y c) MEF6 y sus controles: d) MEF8, e) MEF7 y f) MEF6

Una vez cumplido el análisis de muestras artificiales, se procedió a probar métodos de aislamiento de DNA que provean el material genético necesario para la evaluación del sistema, que en este caso se refiere a la totalidad del DNA presente en la muestra artificialmente contaminada, ya sea humano o bacteriano.

El posible organismo blanco de una prueba de PCR de amplio espectro puede ser altamente inestable en su capacidad de soportar procedimientos físicos y químicos (Rantakokko-Jalava & Jalava, 2002). Por lo tanto, se requiere que el método de aislamiento de DNA genómico bacteriano empleado pueda lisar las paredes más resistentes (bacterias Gram positivas) sin dañar indirectamente el DNA blanco purificado de especies más frágiles (bacterias Gram negativas) (Coyne *et al*, 2004). Los dos sistemas examinados cumplieron con estas características y están basados en un cóctel enzimático con el fin de obtener DNA de ambos tipos de bacterias con igual eficiencia y sin comprometer a los ácidos nucleicos de las especies más sensibles a ruptura de la pared celular.

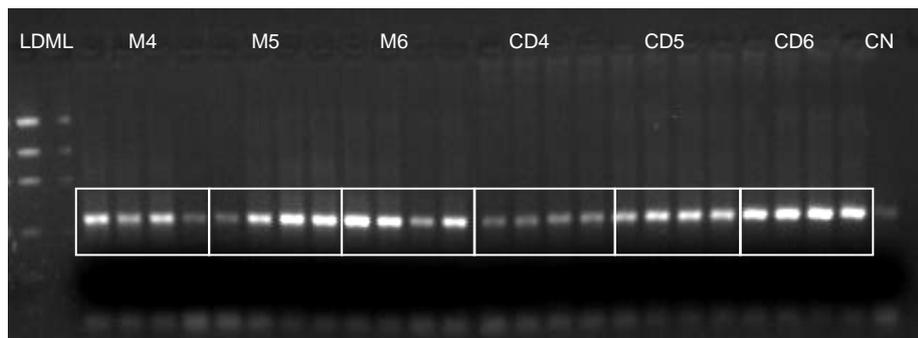
El sistema de extracción manual modificado no se acopló a los requerimientos necesarios para la evaluación del sistema debido a que se comportó selectivamente, es decir, no todas las especies de DNA en la muestra fueron aisladas con la misma eficiencia. Se presume que este hecho se debió a que la muestra no estuvo incubada por suficiente tiempo con proteinasa K, limitando la liberación del DNA genómico humano. Sin embargo se comprobó con este método que la eliminación del plasma y el buffy coat mejora la extracción de DNA de patógenos en muestras clínicas.

El método modificado para aislamiento de ácidos nucleicos por kit de adsorción a columnas de silica fue altamente eficiente para la extracción del DNA presente en la muestra (Figura 3). Por lo tanto, este sistema fue elegido para realizar la eliminación de DNA genómico humano y posteriormente demostrar que la exclusión de éste disminuye la interferencia que el DNA genómico produce en la reacción de PCR y hace al ensayo más reproducible. Además, este método fue usado para el procesamiento de altos volúmenes de muestra sin perder su eficiencia.



**Figura 3** Electroforesis en gel de agarosa al 0.8% teñido con bromuro de etidio donde se observan los resultados del aislamiento de DNA con kit del ensayo preliminar del sistema diseñado con empleo de un alto volumen de muestra. M4, M5 y M6 corresponden a las muestras artificiales de 1 mL sin tratar; CD4, CD5 y CD6 a las muestras de 5 mL tratadas por separación de componentes de sangre y CN es un control negativo.

El sistema de aislamiento diseñado fue validado mediante el uso de 16S rDNA PCR (Figura 4). La amplificación directa del DNA bacteriano a partir de muestras artificialmente contaminadas mediante el uso de PCR de amplio espectro es una ventaja para la determinación de patógenos infecciosos en tejidos comúnmente estériles (Rantakokko-Jalava & Jalava, 2002).

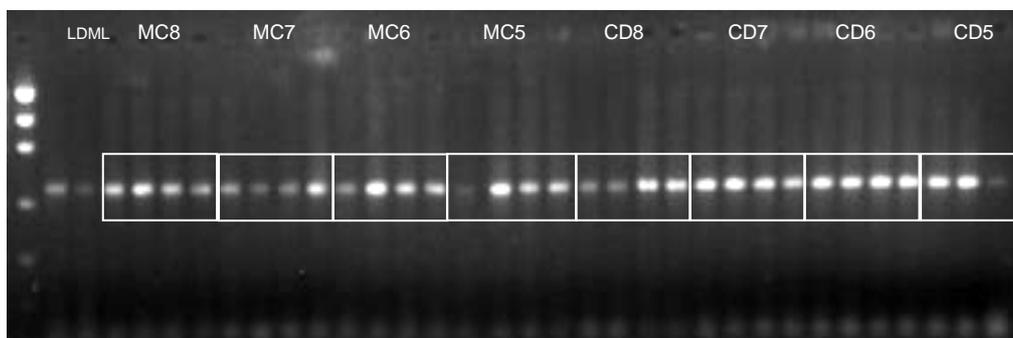


**Figura 4** Electroforesis en gel de agarosa al 2% teñido con bromuro de etidio donde se observan los productos de PCR del ensayo preliminar del sistema diseñado con empleo de un alto volumen de muestra. Los primeros dos carriles corresponden al marcador de peso molecular Low DNA Mass Ladder (INVITROGEN, U.S.A.), M4, M5 y M6 corresponden al DNA de las muestras artificiales de 1 mL sin tratar; CD4, CD5 y CD6 al DNA de las muestras de 5 mL tratadas por separación de componentes de sangre y CN al control negativo.

La presencia de un amplicón de 476 bp en el control negativo, en todos los ensayos de 16S rDNA PCR, se generó por contaminación de reactivos que provienen de una fuente bacteriana, como la Taq polimerasa. Este como otros reactivos puede contener DNA contaminante como resultado de su manufactura e incompleta purificación (Corless *et al* 2000).

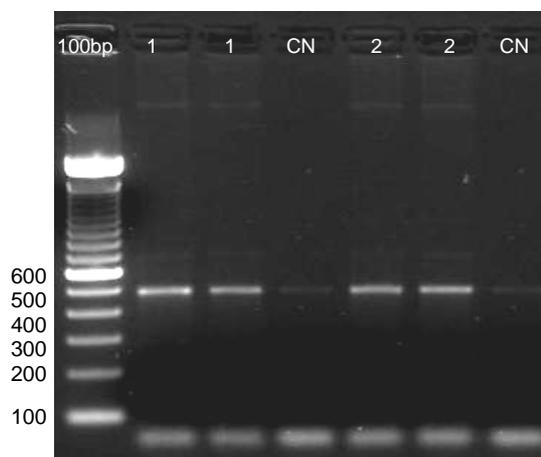
El efecto de la eliminación del background genómico humano en el momento del aislamiento se ve evidenciado en la Figuras 4. Se puede observar que los productos de PCR pertenecientes a las muestras procesadas sin ningún tratamiento adicional no presentan uniformidad alguna en la amplificación. Mientras tanto, en las muestras tratadas por eliminación del plasma y leucocitos se visualiza homogeneidad en los duplicados y entre muestras del mismo tipo. Estos resultados reflejan que el sistema diseñado es reproducible y puede ser usado con grandes volúmenes de muestra.

Con este sistema se puede detectar 1 CFU/mL de sangre (Figura 5). Por lo tanto, la implementación de este método de aislamiento puede ayudar al diagnóstico de bacteriemias de bajo nivel.



**Figura 5** Electroforesis en gel de agarosa al 2% teñido con bromuro de etidio donde se observan los productos de PCR del ensayo de determinación del límite de detección del sistema de alta capacidad diseñado para aislamiento de DNA de patógenos en muestras de sangre. El primer carril corresponde al marcador de peso molecular Low DNA Mass Ladder (INVITROGEN, U.S.A, MC5, MC6, MC7 y MC8 corresponden al DNA de las muestras artificiales de 1 mL sin tratar; CD5, CD6, CD7 y CD8 al DNA de las muestras de 5 mL tratadas por separación de componentes de sangre y CN al control negativo.

La evaluación del sistema con muestras clínicas, lo cual constituyó la última fase del presente estudio, fue exitosa. Se ratificó el diagnóstico por hemocultivo de sepsis y bacteriemia a partir de muestras de sangre periférica de una paciente del Hospital de Niños Baca Ortiz de la ciudad de Quito mediante el uso de esta técnica (Figura 6).



**Figura 6** Electroforesis en gel de agarosa al 2% teñido con bromuro de etidio donde se observan los productos de PCR del ensayo de evaluación del sistema de alta capacidad de aislamiento de DNA patógeno en sangre con muestras clínicas. 1 y 2 corresponden a muestras clínicas y CN a los controles negativos.

Este estudio aportó a la superación de los limitantes de las técnicas de aislamiento de ácidos nucleicos tradicionales mediante el diseño de una técnica de extracción de DNA que elimina el background genómico humano, incrementando la eficiencia de detección de patógenos en muestras clínicas. Además, este método permite el procesamiento de altos volúmenes de muestra, hecho que incrementa la sensibilidad del sistema lo cual podría facilitar el estudio de bacteriemias de bajo nivel.

## REFERENCIAS

1. Anaya, J., Shoenfeld, Y., Correa, P., García, M. & Cervera, M. 2005. *Autoinmunidad y Enfermedad Autoimmune*. Corporación para Investigaciones Biológicas.
2. Corless, C., Guiver, M., Borrow, R., Edwards-Jones, V., Kaczmarski, E. & Fox, A. 2000. *Contamination and sensitivity issues with a real-time universal 16S rDNA PCR*. Journal of Clinical Microbiology, 38(5), 1747-1752.
3. Coyne, S., Craw, P., Norwood, D. & Ulrich, M. 2004. *Comparative analysis of the Schleicher and Schuell isocode stix DNA isolation device and the Qiagen QIAamp DNA mini kit*. Journal of Clinical Microbiology, 42(10), 4859-4862.
4. Crowley, P. 2002. *Prophylactic corticosteroids from preterm birth*. Cochrane Database Systems Reviews, 4, 2002.
5. Henderson, B., Wilson, M. & McNab, R. 2000. *Cellular Microbiology: Bacteria-Host Interactions in health and Disease*. Great Britain: Wiley.
6. Izquierdo, A. 2007. *Diseño y Optimización de un Sistema de Diagnóstico Molecular de sepsis Neonatal mediante la Técnica de PCR-RFLP a partir de Cultivos Bacterianos*. Sangolquí.
7. Jordan, J. & Durso, M. 2000. *Comparison of 16S rRNA gene PCR and Bactec 9240 for detection of neonatal bacteremia*. Journal of Clinical microbiology, 38(7), 2574-2578.
8. Rantakokko-Jalava, K. & Jalava, J. 2002. *Optimal DNA isolation method for detection of bacteria in clinical specimens by broad-range PCR*. Journal of Clinical Microbiology, 40(11), 4211-4217.
9. Rantakokko-Jalava, K., Nikkari, S., Jalava, J., Eerola, E., Skurnik, M., Meurman, O., Ruuskanen, O., Alanen, A., Kotilainen, E., Toivanen, P. & Kotilainen, P. 2002. *Direct amplification of rRNA genes in diagnosis of bacterial infections*. Journal of Clinical Microbiology, 38(1), 32-39.
10. Reimer, L., Wilson, M. & Weinstein, M. 1997. *Update on detection of bacteremia and fungemia*. Clinical Microbiology Reviews, 10(3), 444-465.
11. Rocio, M. y Mendoza, M. 2004. *Identificación bacteriana mediante secuenciación del ARNr 16S: fundamento, metodología y aplicaciones en microbiología clínica*. Enfermedades Infecciosas en Microbiología Clínica, 22(4), 238-245.
12. Surzycki, S. 2000. *Basic Techniques in Molecular Biology*. Heidenberg: Springer-Verlag Berlin.
13. Warwick, S., Wilks, M., Hennesy, E., Powell-Tuck, J., Small, M., Sharp, J. & Millar, M. 2003. *Use of quantitative 16S ribosomal DNA detection for diagnosis of central vascular catheter-associated bacterial infection*. Journal of Clinical Microbiology, 42, 1042-1408.

# CARACTERIZACIÓN DE FINCAS GANADERAS Y RELACIONES CON LA COBERTURA ARBÓREA EN SANTO DOMINGO DE LOS COLORADOS, ECUADOR

Jaime Villacís y José Molina

Departamento de Ciencias de la Vida  
Escuela Superior Politécnica del Ejército

## RESUMEN

El objetivo principal de este estudio fue caracterizar las fincas ganaderas en la zona de Santo Domingo de los Colorados y relacionar las variables socioeconómicas con su cobertura arbórea. Para esto se realizaron encuestas al azar a 24 productores ganaderos de la zona, en donde se recopiló información acerca de las características de la finca, sistema de producción ganadera, del componente arbóreo y del componente herbáceo. El área total de las fincas encuestadas fue 2183 ha, de las cuales la mayor parte del área correspondió a potreros. Del total de fincas, el 29.17 % de las fincas fueron doble propósito, el 25 % mixtas (agricultura – ganadería), el 20 % de leche, el 16.67% de carne y el 8.33 agrícolas. El 91.67 % de las fincas presentó árboles en potreros, la mayor cantidad de árboles en potreros reportados en la zona fueron usados como frutales y sombra para el ganado; las especies arbóreas más comunes en potreros mencionadas por los finqueros fueron *Psidium guajaba*, *Citrus reticulata* y *Citrus sinensis*. El 100 % de las fincas tuvieron cercas vivas, compuestas principalmente de Caraca (*Erythrina poeppigiana*); las especies presentes en cercas vivas fueron utilizadas como sombra y forraje para el ganado y como material vegetativo para propagación. La cobertura arbórea total (bosque primario + bosque secundario + área de plantaciones forestales + área de bosques riparios) de las fincas ganaderas estuvo influenciada en forma positiva por el porcentaje de área de cultivos y en forma negativa por el área de potreros, la producción de leche, la edad del destete, el tiempo de pastoreo y los años que los productores se han dedicados a la ganadería.

**Palabras claves:** Fincas ganaderas; Santo Domingo de los Colorados; cobertura arbórea; cercas vivas; árboles en potreros.

## 1 INTRODUCCIÓN

En el Ecuador desde los años cincuenta se viene observando una marcada disminución de la cobertura forestal. Entre la década de los setenta y hacia finales de los ochenta se notó un incremento en la deforestación, llegándose a estimar tasas anuales de superiores a las 50,000 ha, debido al aumento de la frontera agrícola, políticas gubernamentales de titulación de tierra, explotación ilegal, incendios forestales, actividad ganadera extensiva, políticas crediticias y desarrollo urbanístico (Carrera, 1999; Encarta, 2000).

Muchas áreas boscosas y las destinadas a la agricultura han sido modificadas a áreas de pasturas debido a la expansión de la ganadería (Howard-Borjas 1995). Esta expansión ha estado asociada con la pérdida de la sostenibilidad de los ecosistemas, la cual ha conllevado a la pérdida y fragmentación de bosques y la creación de paisajes que son mosaicos de potreros, bosques y cultivos. Actualmente, en la Provincia de Pichincha existe una superficie de 421454 hectáreas destinadas a la actividad ganadera que corresponde al 45.5 % de la superficie total (MAG 2004).

Ante esta situación, el sector ganadero deberá buscar alternativas de producción que permitan producir competitiva y sosteniblemente, identificando en las fincas ganaderas las áreas con mayor potencial productivo para cada alternativa (Ibrahim y Schlonvoigt 1999). Por

ello es importante conocer el estado actual del uso del suelo de las fincas ganaderas (bosques, cercas vivas, árboles en potreros, cultivos, plantaciones forestales), que puede ayudar al planeamiento y desarrollo de las estrategias a seguir para mejorar los estados de suelo existentes en beneficio de los sistemas productivos y de la conservación del ecosistema; así como también, es importante conocer los tipos de coberturas arbóreas que se encuentran formando parte de los sistemas productivos y como estos varían entre las diferentes fincas en estructura, superficie que ocupan y composición de especies; además de su utilidad, manejo e importancia como herramienta para la conservación y la producción (Harvey y Haber 1999). En este estudio se caracterizó la cobertura arbórea en los diferentes tipos de sistemas productivos y se evaluó la relación de la cobertura arbórea con las variables socioeconómicas de los sistemas productivos.

## **2 MÉTODOS**

### **2.1 Localización y descripción del área de estudio**

El presente trabajo se realizó en fincas ganaderas de Santo Domingo de los Colorados, Ecuador, área de influencia del proyecto CONTRIBUCIÓN DEL COMPONENTE ARBÓREO A LA PRODUCTIVIDAD Y CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD EN FINCAS GANADERAS DE SANTO DOMINGO DE LOS COLORADOS. El área de estudio se encuentra en la provincia de Pichincha, Cantón Santo Domingo de los Colorados, Región Litoral. La zona se ubica a una altura de 300 msnm, con una precipitación media anual de 3.045.1 mm. La humedad relativa promedio es del 85.8 % y la temperatura promedio es de 24.2 °C con poca variación durante el día (INIAP 2004).

### **2.2 Selección de las fincas**

Se realizó una consulta con productores de la zona, con la finalidad de identificar los diferentes estilos de vida de los productores y conocer las características intrínsecas del área de estudio. Posteriormente se seleccionaron 24 fincas al azar de una lista de productores, proporcionada por la ASOGAN. Las fincas seleccionadas debían cumplir con el requisito de estar activas.

La recolección de datos se llevo a cabo por medio de encuestas estructuradas, con las cuales se recopiló información sobre las características de cada finca: uso del suelo (tamaño y distribución de las áreas de la finca); características de los productores (edad, nivel de educación; composición y distribución de la mano de obra); características de los sistemas ganaderos (número de cabezas, razas, suplementación y tipos de pastos; características, tamaño y utilización de las áreas agrícolas y descripción y composición del componente arbóreo (usos y especies de árboles en potreros y cercas vivas).

### **2.3 Análisis de la información**

La información proveniente de encuestas de las 24 fincas fue analizada por medio de estadística descriptiva (media, desviación estándar, error estándar y coeficiente de variación), y diferentes técnicas de gráficos. Para analizar las relaciones entre la cobertura arbórea y las características de las fincas se realizaron regresiones lineales y múltiples entre las variables (INFOSTAT, 2002), de tal forma de identificar las variables socioeconómicas que tengan más relación con la cobertura arbórea presente en las fincas.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Caracterización general de las fincas en Santo Domingo de los Colorados, Pichincha en base a 24 encuestas

##### 3.1.1 Uso del suelo

El área total de las 24 fincas encuestadas es 2183 ha, de las cuales la mayor parte del área correspondió a potreros. En efecto, el 76 % de la zona fueron potreros, 15.4 % bosques primarios, 11.7 % a cultivos, 6.99 % bosques secundarios, 1.0 % pastos de corte, 0.5 % plantaciones forestales, el resto correspondió a áreas de construcción.

##### 3.1.2 Sistemas de producción

Los sistemas de producción ganaderos en la zona de Santo Domingo de los Colorados son de diferentes tipos. El 29.17 % de las fincas son doble propósito, el 25 % se dedican a la combinación agricultura – ganadería, el 20 % son de leche, el 16.67% son de carne y el 8.33 son agrícolas. El tamaño promedio de las fincas encuestadas fue de  $90.96 \pm 17.29$  ha, con variaciones entre 5 y 300 ha, lo que indica que hay mucha variabilidad entre el tamaño de las fincas.

La producción bovina en el área de estudio varió notablemente entre las fincas. La carga animal fue de 10.63 UA/ha, con variaciones entre 0 a 180 UA/ha. El 87.5 % de las fincas ganaderas utiliza sistema de pastoreo rotacional con un período de ocupación entre 1 a 15 días y un periodo de descanso entre 28 y 90 días. El resto de las fincas utilizan sistemas de pastoreo continuo. El tamaño promedio de los potreros fue de  $68.93 \pm 12.94$  ha, con un rango de 0.1 a 200 ha. Otros parámetros productivos de las fincas ganaderas de las zonas se muestran en el Cuadro 1.

**Cuadro 1** Parámetros productivos en fincas ganaderas (n=24) de Santo Domingo, Ecuador. 2006.

Parámetro	Promedio ( $\pm$ Se)
Carga Animal (UA/ha)	$10.63 \pm 8.69$
Producción de leche (l/día)	$146.28 \pm 29.14$
Desparasitación interna (veces al año)	$2.91 \pm 0.26$
Desparasitación externa (veces al año)	$17.79 \pm 1.98$
Concentrado (kg/animal/día)	$1.6 \pm 0.1$
Banano (kg/animal/día)	$2.6 \pm 0.5$
Melaza (l/animal/día)	$0.2 \pm 0.07$
Sal mineral (kg/animal/día)	$0.09 \pm 0.9$
Sal común (kg/animal/día)	$0.04 \pm 0.01$

El número de animales y la composición del hato fue muy variable en las fincas ganaderas de la zona, con fluctuaciones entre 15 y 540 cabezas de ganado por finca (Cuadro 2).

**Cuadro 2** Número y tipo de animales presentes en fincas ganaderas (n=24) de Santo Domingo, Ecuador. 2006.

Tipo de ganado	Promedio (+Se)/finca	Rango
Vacas en producción	24.9 ± 1.7	0 – 90
Vacas secas	23.9 ± 0.6	0 – 55
Ternereras amamantando	22.8 ± 0.9	0 – 90
Reemplazos 1 (destete-1era monta)	7.4 ± 1.1	0 – 15
Reemplazos 2 (1era monta- 1er parto)	14.5 ± 0.6	0 – 45
Animales de engorde (menores de 1 año)	71.88 ± 0.8	0 – 207
Toros	33.6 ± 1.1	0 – 540

En las fincas ganaderas de Santo Domingo, apenas el 16.7 % de los productores han realizado cruces entre animales, con la finalidad de encontrar una craza que se adapte mejor a las condiciones climatológicas de la zona y que mantenga su potencial productivo. Es así que se puede encontrar tipos de cruzas como por ejemplo Brahman + Criollo, Brown swiss + Criollo, Brown swiss + Mestizo, Brown swiss + Holstein (Cuadro 3).

**Cuadro 3** Frecuencia de razas y cruzas de ganado presentes en fincas ganaderas de Santo Domingo, Ecuador. 2006.

Razas y cruces	No. Fincas con la raza
Brahman	6
Brahman + Criollo	1
Brown swiss	4
Brown swiss + Criollo	1
Brown swiss + Mestizo	1
Brown swiss + Holstein	1
Cebú	1
Criollo	5
Gir lechero	1
Girolando	2
Holstein	3
Jersey	1
Mestizo	3

En la zona de estudio el 94.4 % de las fincas ganaderas poseen pasto Brachiaria. El alto porcentaje de productores que prefieren pasto Brachiaria debe posiblemente a que representa un cultivo económico ya que no requiere de labores agrícolas como fertilización y control de plagas. La única labor que se realiza en este pasto es el control de malezas que puede ser manual (practicada por el 29.16 % de los productores a una frecuencia que varía entre 1 y 12 veces por año) o químico (realizada por el 8.33% de los finqueros, bajo una dosis promedio de 0.5± 0.9 l/ha).

Además, los productores también tienen pastos mejorados en sus potreros como saboya, (presente en el 58.33 % de las fincas encuestadas), gramalote y pasto elefante (en el 12.50 %), pasto miel (en el 8.33 %) y pasto estrella, king grass y mala alfalfa, presentes en el 4.17 % de las fincas. El 8.33% de los productores aplican fertilizante químico en los pastos mejorados a una dosis promedio de 45 (kg/ha).

### 3.1.3 Componente arbóreo

Las fincas ganaderas de Santo Domingo de los Colorados tienen arreglos forestales de diferente índole. El arreglo más abundante constituyen los hueros frutales que se encuentran presentes en el 70.83 % de las fincas, seguido de los bosques secundarios presentes en el 41.47 % de las fincas, los bosques primarios y riparios en el 45.1 % de las fincas y las

plantaciones forestales en el 33.33 % de las fincas El tamaño promedio de los arreglos presentes en las fincas ganaderas se puede observar en el Cuadro 4.

**Cuadro 4** Área, error estándar y rango de los arreglos presentes en fincas ganaderas de Santo Domingo, Ecuador. 2006 (De acuerdo a los productores).

Arreglo	Área promedio por finca (ha)	Rango (ha)
Potrero	76 ± 5.26	2.5 – 109
Pasto mejorado	30.52 ± 7.20	0.3 – 5
Pasto natural	42.99 ± 7.77	1 – 109
Pasto corte	0.96 ± 0.47	0.35 – 0.5
Cultivo	11.71 ± 4.29	1 – 50
Bosque primario	15.44 ± 6.40	0.01 – 49
Bosque secundario	6.99 ± 3.32	0.5 – 5
Plantaciones forestales	2.11 ± 1.01	0.2 – 75

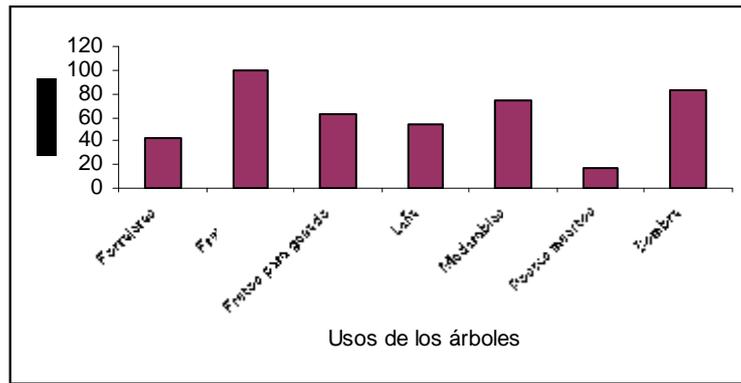
Las especies más comunes que se encontraron en los bosques primarios, secundarios y riparios fueron el pachaco (*Schizolubium parahybum*), el laurel (*Cordia alliodora*) y la teca (*Tectona grandis*). En menor proporción se encontraron especies como el Tangaré (*Carapa guianensis*), Copal (*Bursera cuneata*), y Moral (*Chlorophora tinctoria*).

### 3.1.3.1 Árboles en potreros

En la zona de estudio se encontró que en la mayoría de fincas dejan árboles en potreros (91.67 %). El 40.9 % de los productores señalaron que los árboles presentes en potreros fueron de regeneración natural y el 59.1 % de los productores mencionaron que han sembrado árboles en potreros. La principal especie presente en los potreros fue la guayaba, utilizada principalmente como fruto para consumo y también para el ganado. Además existe un alto porcentaje de limón y naranja que son utilizados como frutales para consumo y sombra para el ganado.

Los productores ganaderos de la zona reconocieron el valor de los árboles en sus fincas y los beneficios de mantener árboles en potreros ya que constituyen fuente de postes, madera y leña para la finca y brindan servicios como sombra y proveer frutos a los animales. La mayor cantidad de árboles en potreros reportados en la zona fueron usados como frutales (por el 100 % de los productores), los cuales fueron generalmente utilizados para autoconsumo. Dentro de estas especies representativas de este grupo se encontraron: Limón (*Citrus reticulata*), presente en el 62.5 % de las fincas, Naranja (*Citrus sinensis*, en el 58.3 %), Guayaba (*Psidium guajaba*, en el 54.2 %), y Guanábana (*Annona muricata*, en el 37.5 %).

En segundo orden se encontraron los árboles que se emplean como sombra para el ganado (por el 83.33 % de los productores). Luego se encontraron los árboles que fueron utilizados como madera, por el 75 % de los finqueros. En menor escala se ubicaron los árboles usados como postes muertos (Figura 1).



**Figura 1** Frecuencia del uso de los árboles en potreros, Santo Domingo, Ecuador. 2006.

Las especies de árboles maderables más comunes en potreros fueron el Mamey y Laurel presentes en el 62.5 % y 54.17 % de las fincas encuestadas, respectivamente. Otra especie maderable frecuente en la zona fue el Guayacán (presente en el 41.67 % de las fincas).

Otro uso importante de los árboles en las fincas fue como sombra para el ganado; los árboles comúnmente utilizados para este propósito fueron los frutales, como el limón (presente en el 41.7 % de las fincas), la naranja y la guayaba (presentes en el 25 % de las fincas).

### 3.1.3.2 Cercas vivas

Se encontró que en el 100 % de las fincas tuvieron cercas vivas. El 50 % tuvo cercas vivas compuestas por una sola especie y el 50 % de las fincas tuvo cercas vivas compuestas por más de una especie. Según estimaciones de los productores, la longitud total promedio de las cercas vivas por finca fue de  $11.44 \pm 15.84$  km con variaciones entre 0 y 70 km.

Las principales especies arbóreas registradas en cercas vivas fueron Caraca (*Erythrina poeppigiana*) presente en el 62.5 % de las fincas y Nacedero (*Trichanthera gigantea*) en el 16.67 %. Otras especies que se encontraron en menor frecuencia fueron el Laurel y Yuca de ratón presente en el 2.8 % de las fincas.

Los árboles presentes en las cercas vivas generalmente fueron podados con una frecuencia de una y 12 veces por año. El 44.67% de los productores podaron los árboles de las cercas una vez al año, el 25 % lo hicieron dos veces, el 4.17 % tres y el 4.17 % doce veces. Los residuos de la poda de caraca fueron generalmente utilizados como alimento para el ganado y como material vegetativo para propagación.

### 3.1.4 Componente herbáceo

En la zona el principal pasto encontrado en los sistemas ganaderos fue la brachiaria presente en el 91.67 % de las fincas y cubriendo el 45.72 % del área total de potreros. También se encontró saboya (*P. maximun*), presente en el 62,5% de las fincas. Cabe anotar que saboya es el pasto más difundido en el litoral, sin embargo en las 24 fincas registradas el pasto predominante fue Brachiaria (Cuadro 5).

**Cuadro 5** Especies de pastos dentro de las fincas, Santo Domingo, Ecuador, 2006.

Espece	Nombre científico	No.de Fincas
Brachiaria	<i>Brachiaria sp.</i>	22
Elefante	<i>Pennisetum purpureum</i>	2
Estrella	<i>Cynodon nlemfluensis</i>	2
Gramma	<i>Paspalum macrophyllum</i>	1
Gramalote	<i>Paspalum fasciculatum</i>	2
King grass	<i>Saccharum sinense</i>	1
Maralfalfa	<i>Pennisetum violaceum</i>	2
Maní forrajero	<i>Arachis pintoii</i>	2
Micay	<i>Axonopus micay</i>	1
Miel	<i>Paspalum dilatatum</i>	4
Saboya	<i>Panicum maximun</i>	15

### 3.2 Características de los productores

Los productores ganaderos de la zona mencionaron haber tenido experiencia en actividades ganaderas entre 1 y 50 años, lo cual muestra la heterogeneidad de los finqueros en esta actividad. El tiempo promedio de los productores en la zona de Santo Domingo fue de 16.4 años con variaciones entre 1 y 50 años. En promedio los productores ganaderos utilizaron como mano de obra familiar 1.15 personas/finca y 4.48 personas/ finca como mano de obra contratada (Cuadro 6).

**Cuadro 6** Utilización de mano de obra en las fincas, expresado como número de personas/año que trabajan en la finca. Santo Domingo de los Colorados, Ecuador, 2006.

Variable	Promedio
MO familiar (personas/año)	1.15 ± 0.41
MO contratada (personas/año)	4.48 ± 1.24
% familias en las que algún miembro trabaja fuera de la finca	50

### 3.3 Relaciones de las características de las fincas con la cobertura arbórea

La cobertura arbórea total (CA) (área de bosque primario + área de bosque secundario + área de plantaciones forestales + área de bosque ripario) de las fincas ganaderas en la zona de Santo Domingo de los Colorados estuvo explicada por 6 modelos de regresión lineal simple; en forma directamente proporcional por el % de área de cultivos ( $P=0.0380$ ), e inversamente proporcional por el área de potreros ( $P=0.0738$ ), la producción de leche ( $P=0.0326$ ), la edad del destete ( $P=0.0189$ ), el tiempo de pastoreo ( $P= 0.0288$ ) y los años que los productores se han dedicado a la ganadería ( $P= 0.0003$ ; Figura 2).

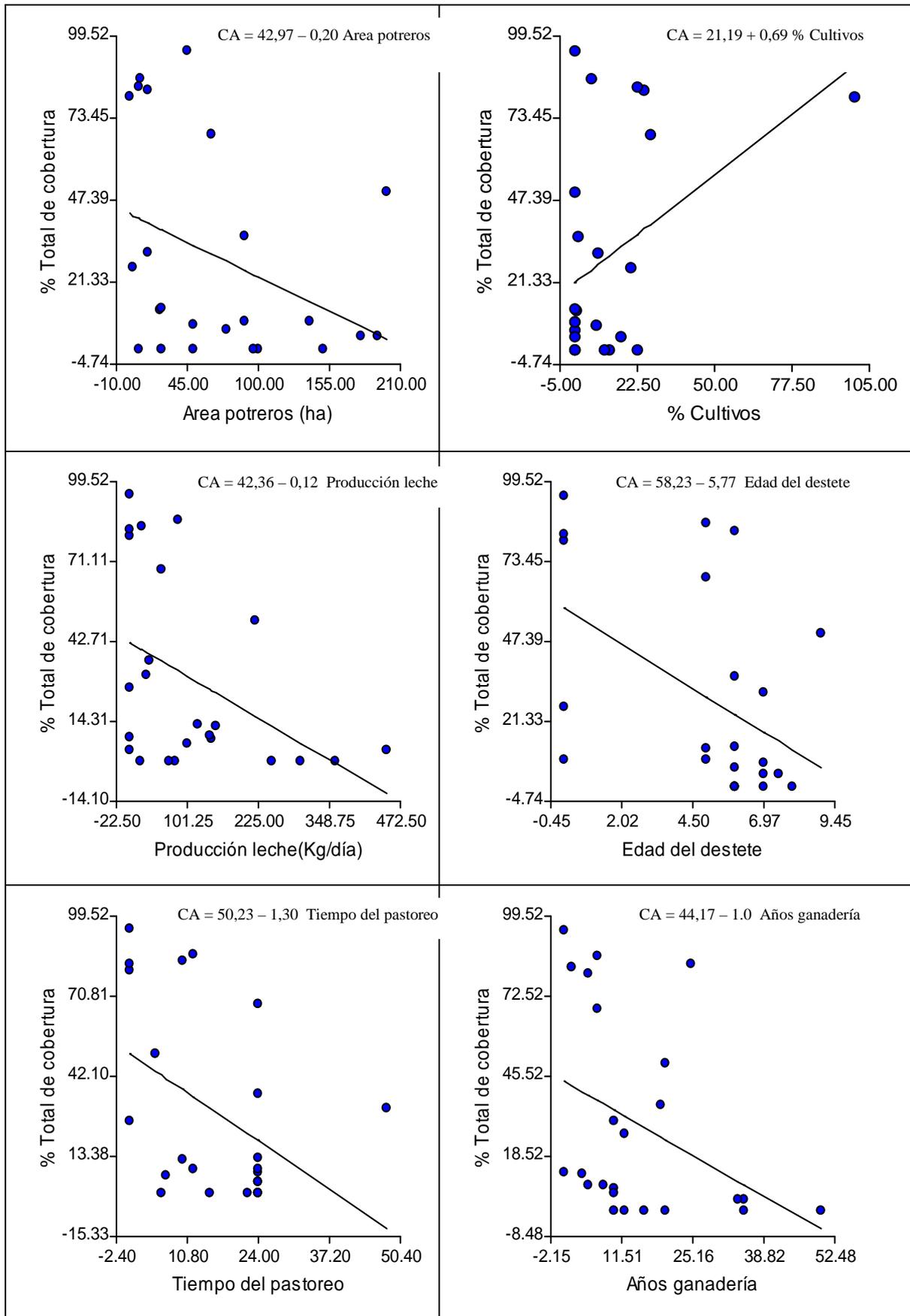


Figura 2 Relación entre el porcentaje de cobertura arbórea total y las variables socioeconómicas.

## 4 DISCUSIÓN

### 4.1 Uso del suelo

En la zona de Santo Domingo de los Colorados predominan las fincas doble propósito con una superficie promedio de 93,7 ha. Sin embargo, existen fincas de Carne, leche y fincas dedicadas a la agricultura. Las fincas de la zona de Santo Domingo de los Colorados tienen un área promedio de 90,96 ha, con variaciones entre 5 y 300 ha. Estas variaciones se pueden deber a que los propietarios de fincas ganaderas con grandes extensiones de terreno, adquieren propiedades de menor tamaño para incrementar sus predios, provocando que los productores con predios de menor tamaño se encuentren en menor cantidad dentro de la zona.

### 4.2 Características de los productores

El 54.2 % de los productores de la zona de Santo Domingo viven en la finca y son los encargados de tomar las decisiones en el predio. Solamente el 25 % de los productores tienen a la finca como fuente principal de ingresos y el 75 % se dedican a otra actividad simultánea a la producción agropecuaria, tales como: empleos privados, militares, transportistas, comerciantes, entre otros. La mano de obra familiar promedio en las fincas de la zona es de 1.15 jornales/año y el 54,2 % de las fincas utiliza algún miembro de la familia en las actividades del predio. El 70,8 % de las fincas de la zona utiliza mano de obra contratada, en promedio de 4.48 jornales/año.

### 4.3 Árboles en potreros

La presencia de árboles en potreros en Santo Domingo de los Colorados, fue encontrado en el 91.67% de las fincas encuestadas. Similares resultados se reportaron en otros estudios llevados a cabo en Río Frío, Costa Rica, en donde el 97.5 % de las fincas presentaron árboles en potreros; de igual manera en otro estudio realizado en La Fortuna, Costa Rica se encontró que más del 90% de las fincas ganaderas presentaron árboles dispersos en los potreros (Souza de Abreu *et al*, 2000). En otro estudio llevado a cabo en la región Caribe de Colombia se encontró que entre el 26 y 69% de las pasturas de las fincas tienen árboles (Cajas-Girón y Sinclair, 2001).

La mayor cantidad de árboles en potreros reportados en la zona de Santo Domingo de los Colorados son frutales. Estos resultados son diferentes a los encontrados en otro estudio desarrollado en fincas ganaderas de Costa Rica en donde se encontró que la mayor cantidad de árboles presentes en potreros son maderables (Villafuerte, 1998; Morales y Klienn, 2000). En cuanto a la presencia de árboles maderables en potreros se encontró que las especies más abundantes fueron el Mamey y el Laurel.

La cantidad de especies de árboles en potreros es muy variable entre fincas. En la zona de Santo Domingo de los Colorados los productores reportaron 41 especies diferentes de árboles diferentes dentro de los potreros. Estos resultados son diferentes a los encontrados en otros estudios llevados en otras zonas como Cañas, donde se reportaron que 60 especies diferentes de árboles están presentes en potreros (Morales y Kleinn, 2001). En la misma zona, en otra investigación realizada, se reportaron que 64 especies forman parte del componente arbóreo presente en potreros (Restrepo 2002).

Los principales usos de los árboles presentes en potreros por los finqueros fueron como frutos (95.8 % de los finqueros), como forraje para el ganado (41.7 %), sombra (29.2 %) y en menor escala como leña, madera, postes y forraje para el ganado; estos usos fueron anteriormente reportados en fincas ganaderas de otra zona, sin embargo el uso más frecuente reportado fue como madera (Villafuerte, 1998).

#### 4.4 Cercas vivas

En la zona de Santo Domingo de los Colorados, el 100 % de los productores reportaron que tienen cercas vivas en sus fincas, con predominancia de la especie Caraca. Similares resultados se encontraron en las zonas de Río Frío y La Fortuna, Costa Rica en donde el 87.3% y el 85 % de las fincas ganaderas, respectivamente, tuvieron cercas vivas compuestas principalmente por la misma especie (Villacís, 2003; Souza de Abreu *et al.*, 2000).

El 44.67% de los productores podan los árboles de las cercas una vez al año, principalmente los árboles de Caraca y Nacedero. La poda se realiza en cualquier época del año independientemente de la presencia de lluvias. Los residuos de la poda son utilizados para brindar alimento al ganado y para cortar nuevas estacas usadas como material vegetativo para propagación. Ningún productor de la zona reportó que usa las especies arbóreas de las cercas vivas como fuente de madera o leña, contrario a la zona de Cañas donde los productores utilizan los árboles de las cercas vivas con fines maderables (Harvey *et al.*, 2003; Restrepo 2002).

Otras especies que reportaron los finqueros que forman parte de las cercas vivas presentes en sus fincas fueron: Laurel, Yuca de ratón. Sin embargo estas especies no son manejadas o su manejo es mínimo en comparación a la caraca y nacedero.

#### 4.5 Relaciones de las características de las fincas con la cobertura arbórea

Al analizar detalladamente cada una de las ecuaciones, el área de potreros es inversamente proporcional e influye negativamente en sobre la cobertura arbórea, debido a que al incrementar las áreas de pastoreo en las fincas ganaderas se eliminan los remanentes de bosque presentes. El área de cultivos presentó una relación directamente proporcional e influye positivamente en la cobertura arbórea, esto se podría explicar ya que algunos cultivos como el cacao y el café requieren de la provisión de sombra de los árboles para poder cumplir su ciclo productivo. La producción de leche influyó negativamente en la cobertura arbórea, esta relación se podría deber a que al incrementar las áreas de pasto mejorado que tienen altos niveles de nutrientes se debe eliminar los árboles de los potreros, ya que la sombra ejercen un efecto negativo sobre los pastos (Villacís 2003). La edad del destete indicó una relación inversamente proporcional e influye negativamente en la cobertura arbórea, debido a que conforme se van destetando animales, el ganadero puede verse en la necesidad de aumentar el área dedicada a la ganadería, consecuentemente disminuyen las áreas boscosas. El tiempo del pastoreo sugirió una relación negativa en la cobertura arbórea, ya que el ganado podría estar pisoteando los árboles de la regeneración natural de los potreros. Finalmente, los años que los propietarios se han dedicado a la ganadería también presentaron una relación negativa con la cobertura arbórea, esto se puede explicar ya que los sistemas productivos tradicionales han sugerido la eliminación del componente arbóreo para la implementación de potreros. Estos resultados son diferentes a los reportados en otra investigación desarrollada en la zona de Río Frío, Costa Rica en donde la cobertura arbórea total de las fincas estuvo explicada por un modelo de regresión múltiple en función del área total de la finca, la mano de obra contratada, el área de potreros, la frecuencia de desparasitación al ganado, el tiempo de ocupación de los potreros y el suministro de concentrado al ganado (Villacís, 2003; Villacís *et al.*, 2003); y a los encontrados en otro estudio llevado a cabo en la zona de Cañas, donde la cobertura arbórea en potreros estuvo explicada por el control de malezas, la mano de obra familiar, y el periodo de descanso en los potreros (Restrepo, 2002).

## 5 CONCLUSIONES

Los tipos de cobertura arbórea predominantes en fincas ganaderas de Santo Domingo de los Colorados constituyen los árboles dispersos en potreros presentes en el 95.7 % de las fincas y las cercas vivas presentes en el 100 % de las fincas ganaderas de la zona.

Los productores ganaderos reconocen el valor de los árboles en sus fincas y las ventajas de mantener árboles en potreros. Entre las principales ventajas son los productos (que proveen como postes, madera, leña, forraje, frutos) y servicios como brindar sombra y proveer frutos a los animales.

Las especies arbóreas más representativas que se encuentran presentes en potreros, mencionadas por los productores fueron el limón (*Citrus reticulata*, presente en el 62.5 % de las fincas), la naranja (*Citrus sinensis*, en el 58.3 %), la guayaba (*Psidium guajaba*, en el 54.2 %), y la guanábana (*Annona muricata*, en el 37.5 %).

Bajo las condiciones de estudio el porcentaje de área de cultivos influyó positivamente sobre la cobertura arbórea, el área de potreros, la producción de leche, la edad del destete, el tiempo de pastoreo y los años de los productores dedicados a la ganadería influyeron en negativamente la cobertura arbórea total presente en las fincas.

La zona de Santo Domingo de los Colorados se dedica a la actividad ganadera y representa un potencial en la producción ganadera del Ecuador. Por tradición los productores han utilizado diferentes especies de árboles de sus fincas en las actividades productivas, generalmente para la provisión de sombra y frutos al ganado y en algunas ocasiones para postes. Sin embargo, los árboles no reciben ningún tipo de manejo, con excepción del componente arbóreo presente en cercas vivas el cual es manejado por los productores para disminuir la sombra en los pastos y para obtener forraje para el ganado.

En la mayoría de las fincas los trabajos que se puedan proponer en cuanto a manejo e implementación de sistemas silvopastoriles podrían ser satisfactorios siempre y cuando exista el apoyo de instituciones financieras que faciliten la provisión de árboles y el personal técnico necesario para llevar a cabo estas actividades. Por estas razones, el conocimiento previo de una zona es de suma importancia para el desarrollo de proyectos de investigación que estén enfocados a las condiciones y características de los productores. La información recopilada en este trabajo muestra las principales características sobre las fincas ganaderas de la zona en cuanto a uso del suelo, características de los productores, niveles de intensificación, tipologías de los sistemas productivos, presencia y utilización del componente arbóreo en las fincas. La información generada en este estudio se debería utilizar como base para la implementación de sistemas silvopastoriles de tal forma de rescatar y aumentar el componente arbóreo y de esta forma evitar que se pierdan los pocos árboles que se encuentran presentes en las fincas ganaderas de la zona.

## AGRADECIMIENTO

Se agradece a la Escuela Politécnica del Ejercito ESPE por el financiamiento del proyecto y a los productores ganaderos de la zona de Santo Domingo de los Colorados que colaboraron con el desarrollo de la investigación.

## REFERENCIAS

1. Cajas-Girón, YS; Sinclair, F. (2001) Characterization of multistrata silvopastoral system on seasonally dry pastures in the Caribe Region of Colombia. Agroforestry system (in press).

2. Carrera, R. (1999) Movimiento Mundial por los Bosques Tropicales (en línea), consultado el 7 de octubre del 2004, disponible en: <http://www.wrm.org.uy/paises/Ecuador/venas.html>
3. Encarta, (2000) Ecuador Territorio y Recursos (en línea), consultado el 7 de octubre del 2004, [http://es.encarta.msn.com/encyclopedia\\_761565312/Ecuador\\_\(rep%C3%BAblica\).html](http://es.encarta.msn.com/encyclopedia_761565312/Ecuador_(rep%C3%BAblica).html)
4. Harvey, C.; Villanueva, C.; Villacís, J.; Chacón, M.; Muñoz, D. López, M.; Ibrahim, M.; Gomes, R.; Taylor, R.; Martínez, J.; Navas, A.; Sáenz, J.; Sánchez, D.; Medina, A.; Vilchez, S.; Hernández, B.; Pérez, A.; Ruiz, F.; López, F.; Lang, I.; Kunth, S.; Sinclair, F. (2003) "Contribución de las cercas vivas a la productividad e integridad ecológica de los paisajes agrícolas en América Central", *Agroforestería en las Américas* **10 (39-40)**, 30-39.
5. Howard-Borjas, P. (1995) "Cattle and crisis: the genesis of unsustainable development in Central America. Land Reform", *Land settlement and cooperatives. Dirección de Desarrollo Rural. FAO 89-116*, Roma, Italia.
6. Ibrahim, M.; Schlonvoigt, A. (1999) "Silvopastoral systems for degraded lands in the humid tropics. Environmental friendly silvopastoral alternatives for optimising productivity of livestock farms: CATIE's experience", *Actas de la IV Semana Científica, CATIE*. 6 al 9 abril 1999. 277-282.
7. InfoStat (2002). *InfoStat, versión 1.1. Manual del Usuario*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. Primera Edición, Editorial Brujas Argentina.
8. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP). (2004) Datos meteorológicos de Santo domingo de los Colorados. (en línea). Consultado el 15 de noviembre del 2004. Disponible en <http://www.iniap-ecuador.gov.ec/estaciones/eesantodomingo.html>
9. Ministerio de Agricultura y ganadería (MAG). (2004) III Censo Nacional Agropecuario (en línea). Consultado el 10 de noviembre del 2004. Disponible en: <http://www.sica.gov.ec/censo/docs/nacionales/tabla2.htm>
10. Morales, D; Kleinn, C. (2000) *Árboles en potreros en Costa Rica*. CATIE, Costa Rica.
11. Morales, D; Kleinn, C. (2001) "Tree resources on pasture land in Costa Rica. En: M. Ibrahim (ed.). Silvopastoral systems for restoration of degraded tropical pasture ecosystems", *International Symposium on Silvopastoral System*. 117-121, San José, Costa Rica.
12. Restrepo, C. (2002) *Relaciones entre la cobertura arbórea en potreros y la producción bobina en fincas ganaderas en el trópico seco*, Cañas, Costa Rica.. MSc Tesis. CATIE, Turrialba, Costa Rica.
13. Souza de Abreu, M.; Ibrahim, M.; Sales, S. (1998) *Árboles en pastizales y su influencia en la producción de leche. In 1 Congreso latinoamericano sobre agroforestería para la producción Sostenible*. 68 p., Cali, Colombia.
14. Villafuerte, L. (1998) *Sistemas expertos como herramienta para toma de decisiones en manejo en sistemas silvopastoriles del trópico húmedo bajo de Costa Rica*. MSc Tesis. CATIE, 98 p., Turrialba, Costa Rica.
15. Villacís, J. (2003) *Relaciones entre la cobertura arbórea y el nivel de intensificación de fincas ganaderas en Río Frio, Costa Rica*. MSc Tesis. CATIE, Turrialba, Costa Rica.

- 16 Villacís, J; Harvey, C; Ibrahim, M; Villanueva, C. (2003) "Relaciones entre la cobertura arbórea y el nivel de intensificación de fincas ganaderas en Río Frío, Costa Rica". *Agroforestería en las Américas* **10 (39-40)**,17-23.

# SOBRE EL EQUILIBRIO DE ESTRUCTURAS APORTICADAS

Pablo Caiza Sánchez

Centro de Investigaciones Científicas  
Escuela Superior Politécnica del Ejército

## RESUMEN

Se usa la teoría completa no lineal de vigas planas para analizar un pórtico plano de un piso y un vano, con conexiones rígidas y fijo en su base. Las ecuaciones de equilibrio no lineales se plantean mediante principios variacionales usando el método de elementos finitos con polinomios lagrangianos de diferente orden como aproximación de los campos cinemáticos. El método de interpolación de Newton con control de longitud de arco fue usado para la solución de estas ecuaciones no lineales. Diferentes tipos de cargas así como dimensiones geométricas fueron implementados con el fin de evaluar los resultados de desplazamientos y fuerzas internas. El efecto de cambiar el módulo elástico del material también fue considerado. Finalmente se tomaron en cuenta los efectos de imperfecciones geométricas.

## ABSTRACT

A plane one-bay-one-story frame with rigid connections and fixed at its base is analyzed using the fully nonlinear planar beam theory. The nonlinear equilibrium equations were written using variational principles and the finite element method. The kinematic fields were approximated by Lagrangian polynomials. The Newton method with arc-length control was used for the solution of the nonlinear equilibrium equations. Different loading scenarios as well as geometric dimensions were implemented in order to evaluate displacement and internal force results. The effect of changing the material moduli was also considered. Finally geometric imperfections were also taken into account.

## 1 INTRODUCCIÓN

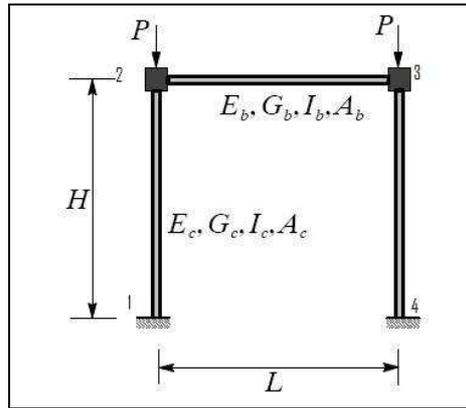
Este artículo trata de la metodología para resolver estructuras aporticadas usando la teoría no lineal completa de vigas planas. **Es importante recalcar que la no linealidad se refiere a la ecuaciones de equilibrio y deformación-desplazamiento y no a las ecuaciones constitutivas.** Cinco pasos básicos son necesarios:

- Descripción de la geometría del sistema estructural.
- Descripción de las cargas externas aplicadas.
- Establecimiento de las ecuaciones de equilibrio en la configuración deformada.
- Aplicación del método de elementos finitos.
- Uso del método de interpolación de Newton con control de longitud de arco.

Esta metodología se aplicó a la solución de un pórtico plano de un piso y un vano con diferentes características geométricas así como de carga. Para probar la validez de los resultados algunas ecuaciones de equilibrio son descritas con más detalle. Adicionalmente los resultados son comparados con aquellos obtenidos con el programa comercial SAP2000.

## 2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ESTRUCTURAL

La estructura básica a ser analizada es descrita en la Figura 1 que se indica a continuación.



**Figura 1** Estructura básica a ser analizada. Fuente: Handout CEE471 Term Project 2 [2]

Dos casos son implementados, el primero llamado “Columnas Esbeltas” y el otro “Viga de Gran Longitud”. Las dimensiones y propiedades geométricas más importantes, así como el valor de los módulos de elasticidad y de corte usados, se encuentran en la Tabla 1.

**Tabla 1** Características de los dos casos implementados.

E=2 10 000 T/m <sup>2</sup>		
G=1 50 000 T/m <sup>2</sup>		
	“Columnas Esbeltas”	“Viga de Gran Longitud”
<b>H (m)</b>	7.0	3.5
<b>L (m)</b>	4.5	9.0
<b>I<sub>c</sub> (m<sup>4</sup>)</b>	0.000675	
<b>A<sub>c</sub> (m<sup>2</sup>)</b>	0.09	
<b>I<sub>b</sub> (m<sup>4</sup>)</b>	0.000893	
<b>A<sub>b</sub> (m<sup>2</sup>)</b>	0.0875	

Se observa que los valores de E y G son una décima parte de los valores para hormigón armado. Lo anterior se usa para producir mayores deformaciones y hacer más evidente el comportamiento no lineal de la estructura. Nótese además que H es la altura de las columnas y L la longitud de la viga. Las cargas aplicadas son de dos tipos: vertical y lateral. Cada uno de estos tipos corresponde a un caso de carga, siendo un tercer caso, la combinación de ambos tipos. Los tipos de carga, en el paso inicial (cero) de análisis, son descritos en la Tabla 2.

**Tabla 2** Casos de carga

<b>Caso Vertical</b>	
<b>qb1</b>	9 T/m (constante)
<b>qb2</b>	0 T/m (variable)
<b>Pv col</b>	2 T (variable)
<b>Caso Horizontal</b>	
<b>Ph col</b>	1 T (variable)

Se observa que hay cargas constantes qb1 y otras variables qb2 (carga distribuida sobre la viga), Pv col (carga vertical puntual sobre las columnas), Ph col (carga horizontal puntual sobre las columnas). Las cargas variables se emplean para determinar nuevas configuraciones de equilibrio bajo cargas diferentes.

### 3 PROCEDIMIENTO ANALÍTICO

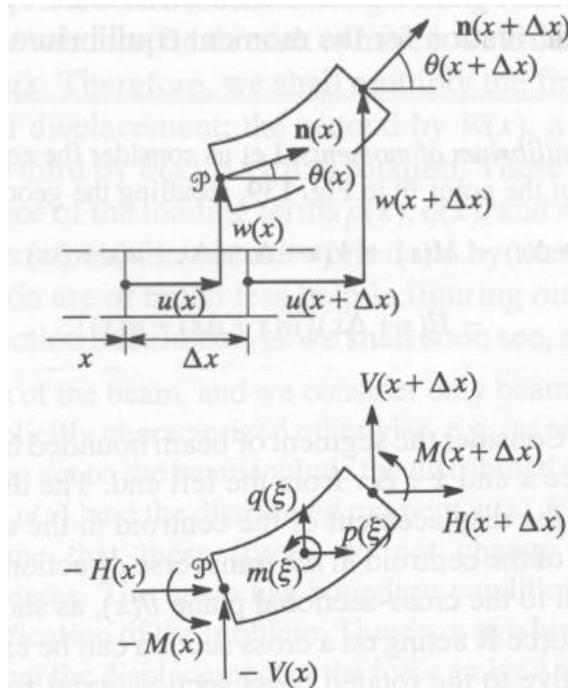
#### 3.1 La teoría no lineal completa para vigas planas

Las ecuaciones diferenciales que gobiernan el equilibrio en la estructura deformada son [1]:

$$\begin{aligned} H' + p &= 0 & V' + q &= 0 \\ M' + V(1 + u') - Hw' + m &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Donde  $H, V$  son las fuerzas resultantes axial y transversal al eje de cada elemento estructural no deformado,  $M$  es el momento resultante;  $p, q$ , fuerzas distribuidas transversal y axial y  $m$  momento distribuido;  $u$  es el desplazamiento del centroide en la dirección axial y  $w$  el desplazamiento del centroide en la dirección transversal.

Estas ecuaciones son de equilibrio en la estructura deformada. La deformada geométrica y el equilibrio de un segmento de viga se muestran en la Figura 2.



**Figura 2** Deformada y equilibrio de un segmento de viga deformada (1)

Usando esta nomenclatura la derivación de la ecuación de equilibrio de momentos, por ejemplo, es la siguiente:

$$\begin{aligned} &M(x + \Delta x) - M(x) + V(x + \Delta x)(\Delta x + u(x + \Delta x) - u(x)) + \\ &- H(x + \Delta x)(w(x + \Delta x) - w(x)) + \\ &+ \int_0^{\Delta x} [(w(\xi) - w(x))p(\xi) - (\xi + u(\xi))q(\xi) + m(\xi)] d\xi = 0 \end{aligned}$$

Donde  $\xi$  mide distancia (en la configuración no deformada) desde el extremo izquierdo del segmento. Dividiendo la ecuación para  $\Delta x$  da:

$$\begin{aligned} & \frac{M(x+\Delta x)-M(x)}{\Delta x} + \frac{V(x+\Delta x)(\Delta x+u(x+\Delta x)-u(x))}{\Delta x} + \\ & - \frac{H(x+\Delta x)(w(x+\Delta x)-w(x))}{\Delta x} + \\ & + \frac{1}{\Delta x} \int_0^{\Delta x} [(w(\xi)-w(x))p(\xi) - (\xi+u(\xi))q(\xi) + m(\xi)] d\xi = 0 \end{aligned}$$

Tomando el límite  $\Delta x \rightarrow 0$ , y reconociendo la definición de derivada se tiene nuevamente la ecuación de equilibrio de momentos que es la tercera de las ecuaciones (1). Las fuerzas en una sección transversal pueden también ser expresadas como componentes relativas a la sección transversal rotada: fuerza axial  $N(x)$  y fuerza cortante  $Q(x)$  [1].

$$\begin{aligned} H &= N \cos \theta - Q \sin \theta \\ V &= N \sin \theta + Q \cos \theta \end{aligned} \quad (2)$$

Siendo  $\theta$  es la rotación de la normal al plano de la sección transversal.

Estas ecuaciones diferenciales de equilibrio se resolverán mediante principios variacionales y el método de elementos finitos. Nótese por tanto que para cada elemento estructural la ecuación que se desea solucionar es la ecuación variacional.

$$G(\lambda, u, \bar{u}) = 0, \quad \forall \bar{u} \in \Gamma_e(0, l) \quad (3)$$

Donde  $\lambda$  es un parámetro de carga y permite usar cargas tales como  $q(\lambda, x) = q_1(x) + \lambda q_2(x)$ ;  $u = \{u(x), w(x), \theta(x)\}$ ;  $\Gamma_e(0, l)$  es un conjunto de funciones  $\bar{u} = \{\bar{u}, \bar{w}, \bar{\theta}\}$  que satisfacen condiciones de borde esenciales y cuyas primeras derivadas son integrables de segundo grado.

De acuerdo a lo anterior se tiene:

$$G(\lambda, u, \bar{u}) = \int_0^l (EI \chi_0 \bar{\chi}_0 + GA \beta_0 \bar{\beta}_0 + EA \epsilon_0 \bar{\epsilon}_0) dx - \bar{W}_E(\lambda) \quad (4)$$

Donde  $\bar{W}_E(\lambda)$  es el funcional por trabajo externo de las cargas aplicadas. Las deformaciones unitarias reales  $\chi_0, \beta_0, \epsilon_0$  son funciones de los desplazamientos reales, los cuales, a su vez, son funciones de la variable independiente  $x$ . Similarmente las deformaciones unitarias virtuales  $\bar{\chi}_0, \bar{\beta}_0, \bar{\epsilon}_0$  son funciones de los desplazamientos reales y virtuales, los cuales, a su vez, son funciones de la variable  $x$ .

Las deformaciones unitarias son:

$$\begin{aligned} \chi_0 &= \theta' \\ \beta_0 &= w' \cos \theta - (1 + u') \sin \theta \\ \epsilon_0 &= w' \sin \theta + (1 + u') \cos \theta - 1 \end{aligned} \quad (5)$$

Donde  $\chi_0$  (la curvatura),  $\beta_0$  y  $\epsilon_0$  son las deformaciones unitarias asociadas con  $M$ ,  $Q$  y  $N$ , respectivamente.

Se considera que la viga es elástica y que las relaciones constitutivas son lineales por lo tanto:

$$M = EI\chi_0 \quad Q = GA\beta_0 \quad N = EA\epsilon_0 \quad (6)$$

Siendo EI, GA y EA son las constantes de proporcionalidad tradicionales.

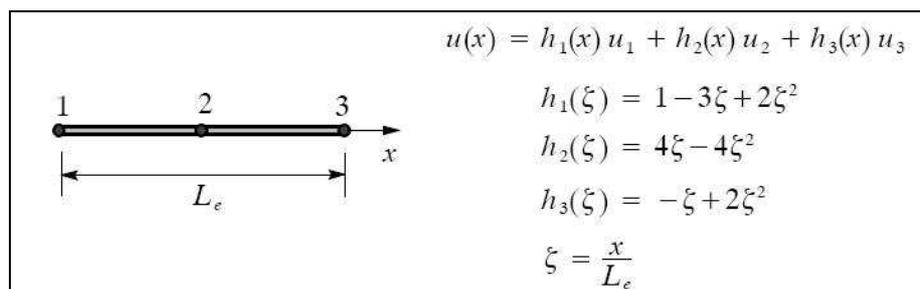
### 3.2 Representación de los campos de desplazamiento

Los campos de desplazamiento  $u$ ,  $w$  y  $\theta$  son representados por medio de funciones de forma lagrangianas.

Una función lagrangiana general de orden  $n$  que pasa a través de cero en  $n-1$  puntos especificados  $x_i$  y tiene un valor unitario en un punto especificado  $x_k$  tiene la siguiente ecuación [1]:

$$L_n(x) = \prod_{i=1, i \neq k}^n \frac{x - x_i}{x_k - x_i} \quad (7)$$

Como un ejemplo las funciones de forma cuadráticas (correspondientes a polinomios lagrangianos de segundo grado) son descritas en la Figura 3 a continuación:



**Figura 3** Funciones lagrangianas de interpolación de segundo grado.

Fuente: Handout CEE471 Term Project 2 [2]

Obsérvese que aquí  $u(x)$  es una función general que puede representar desplazamientos axiales, transversales e inclusive giros. Además nótese que el elemento estructural (viga o columna) necesita en este caso tres nudos para acomodar estas funciones cuadráticas.

### 3.3 El método de interpolación de Newton con control de longitud de arco

Cada configuración de equilibrio se determinó usando el método de interpolación de Newton con control de longitud de arco. Éste se empleó repetidamente cuando las condiciones de carga se hicieron variar.

Algunas de la más importantes características del método de interpolación de Newton aplicado a este problema son descritas en los siguientes párrafos:

Defínense las matrices  $\mathbf{A}(\lambda, \mathbf{a})$  y  $\mathbf{b}(\lambda, \mathbf{a})$  de la siguiente manera [1]:

$$\mathbf{A}(\lambda, \mathbf{a}) \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{K}(\mathbf{a}) & \mathbf{k}(\lambda) \\ 2(\mathbf{a} - \mathbf{a}_n) & 2(\lambda - \lambda_n) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b}(\lambda, \mathbf{a}) \equiv \begin{bmatrix} -\mathbf{g}(\lambda, \mathbf{a}) \\ -c(\lambda, \mathbf{a}) \end{bmatrix}$$

Donde  $\mathbf{a}$  es el vector que contiene los coeficientes de las funciones de interpolación que se calculan en la iteración  $v$  del caso de carga  $n+1$  del proceso de Newton,  $\mathbf{a}_n$  es el vector que contiene los coeficientes de las funciones de interpolación calculados en el caso de carga previo,  $\lambda_n$  el factor de carga del paso previo,  $\lambda$  el factor de carga empleado en el paso en consideración,  $\mathbf{K}(\mathbf{a})$  es la matriz de rigidez tangente,  $\mathbf{k}(\lambda)$  es el vector conteniendo las cargas distribuidas y puntuales. Nótese que  $\mathbf{b}(\lambda, \mathbf{a})$  es el vector que contiene la cantidad por la cual el equilibrio y la restricción de la longitud de arco fallan en satisfacer al estado  $(\lambda, \mathbf{a})$ . “De allí que, cualquier configuración que no está a una distancia fija del punto previo y no está en equilibrio puede ser mejorada resolviendo ...”[1]

$$A(\lambda, \mathbf{a}^v) \Delta \mathbf{x}^v = \mathbf{b}(\lambda, \mathbf{a}^v)$$

Siendo  $\Delta \mathbf{x} = (\mathbf{a}, \lambda)$  es una matriz que guarda la variación de los coeficientes del estado de desplazamiento y el factor de carga empleado.

La configuración mejorada puede ser obtenida como [1]:

$$\mathbf{x}^{v+1} = \mathbf{x}^v + \Delta \mathbf{x}^v$$

“El número de iteraciones es el necesario para que la solución esté dentro de una tolerancia especificada”[1].

#### 4 VERIFICACIÓN Y PRECISIÓN COMPUTACIONAL

La teoría expuesta previamente fue implementada en un programa en MATLAB. Como paso inicial y dado que el método de elementos finitos provee una aproximación de la solución exacta dada por las ecuaciones diferenciales de equilibrio es esencial una investigación de la precisión de los algoritmos usados. Para el efecto se emplearon diferentes grados para las aproximaciones polinomiales lagrangianas. Nótese sin embargo que, puesto que la solución exacta para las funciones de desplazamiento son polinomios de cuarto grado, funciones de forma de cuarto orden son suficientes para capturar una solución precisa.

Adicionalmente los resultados obtenidos se compararon con los correspondientes a los calculados con SAP2000. En la comparación que se presenta se usaron ecuaciones lagrangianas de quinto orden.

Los resultados mostrados corresponden a la estructura denominada “Columnas Esbeltas” únicamente con una carga lateral de 5 T. La Figura 4 muestra la configuración deformada.

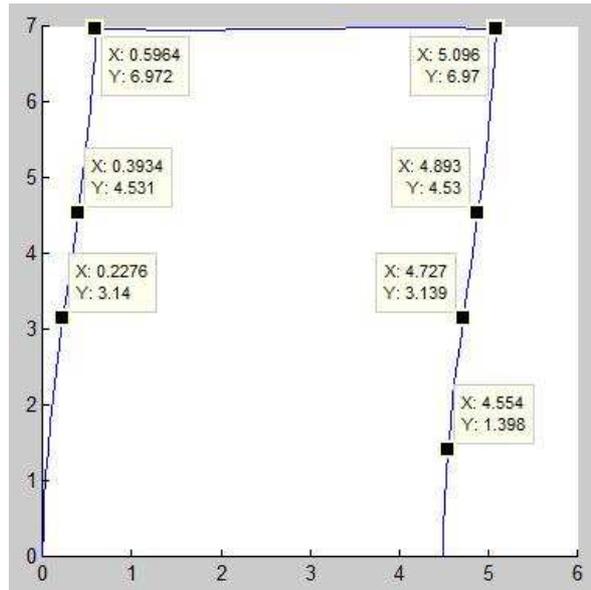


Figura 4 Configuración deformada usada para validación.

Los desplazamientos globales en los nudos superiores del pórtico fueron chequeados contra los resultados obtenidos con el programa comercial SAP2000 (opción: "large displacements") y se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3 Desplazamientos globales en los nudos en la parte superior del pórtico analizado

	Nodo 2		Nodo 3	
	Viga no lineal	SAP2000	Viga no lineal	SAP2000
$\Delta x$ [m]	0.596	0.621	0.596	0.621
$\Delta y$ [m]	-0.028	-0.026	-0.030	-0.029
$\Theta$ [rad]	0.00335	0.00332	0.00323	0.00332

Los resultados son similares dando confianza para estimar otros modelos estructurales.

Es importante indicar adicionalmente que funciones de forma de mayor grado dieron resultados igualmente similares pero que, en el caso de funciones de forma menores al cuarto grado, la estructura se "rigidizó". Este es un fenómeno numérico conocido como "shear locking" debido a que las funciones de forma no son capaces de representar las deformaciones exigidas por las cargas sobre la geometría estructural.

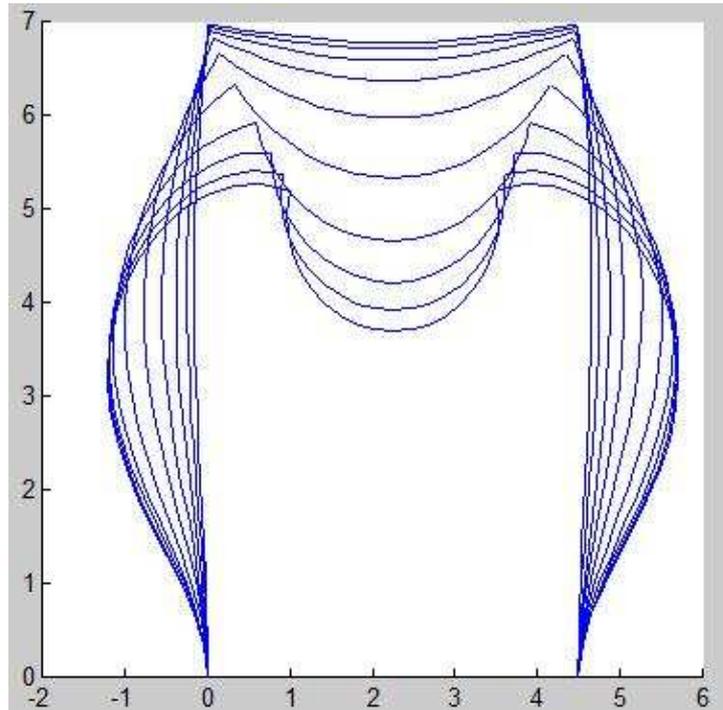
Finalmente otro efecto no lineal importante es el pandeo. De manera similar a los resultados de desplazamientos, las cargas de pandeo fueron más parecidas a la teóricas mientras mayor era el grado de las funciones de forma empleadas, siendo sin embargo las funciones de cuarto orden suficientemente precisas. La carga de pandeo se determina cuando uno de los valores propios de la matriz de rigidez tangente alcanza el valor de cero. Nótese que este último hecho es posible debido a la teoría no lineal usada: básicamente las ecuaciones de equilibrio se plantean sobre la estructura deformada.

## 5 GEOMETRÍA Y CARGAS

### 5.1 Caso No1: Columnas esbeltas únicamente con carga vertical

Este ejemplo corresponde a la geometría denominada "Columnas Esbeltas" y al caso de carga "Vertical". Diez pasos de carga son usados con un factor de magnificación de 10, lo

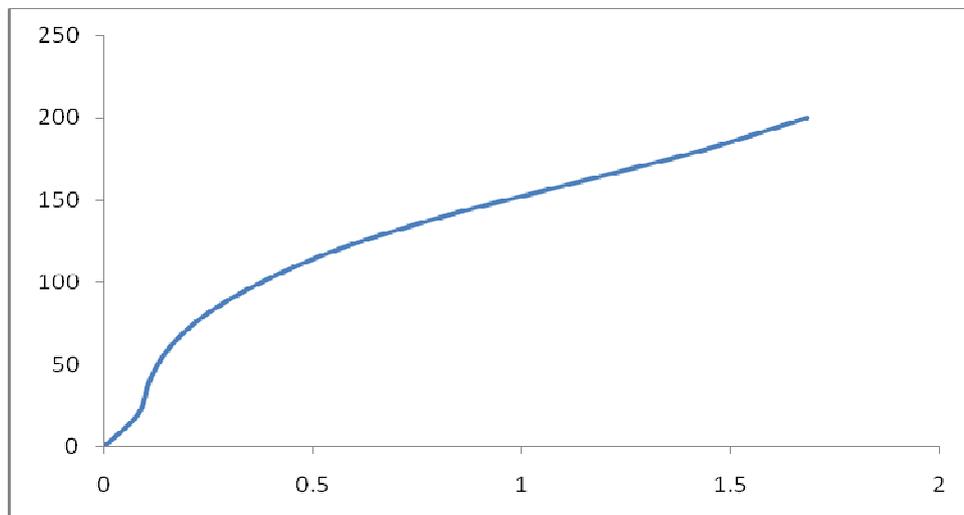
que significa una carga final distribuida sobre la viga  $q_b=9T/m$  y una carga puntual sobre cada columna  $P_{vcol}=200 T$  (ver Figura 5).



**Figura 5** Estructura deformada en el Caso No1

Además y como un ejemplo de las curvas desplazamiento transversal-cargas, la Figura 6 muestra la que se obtuvo para el nudo en el centro de la altura de la columna a la izquierda de la estructura.

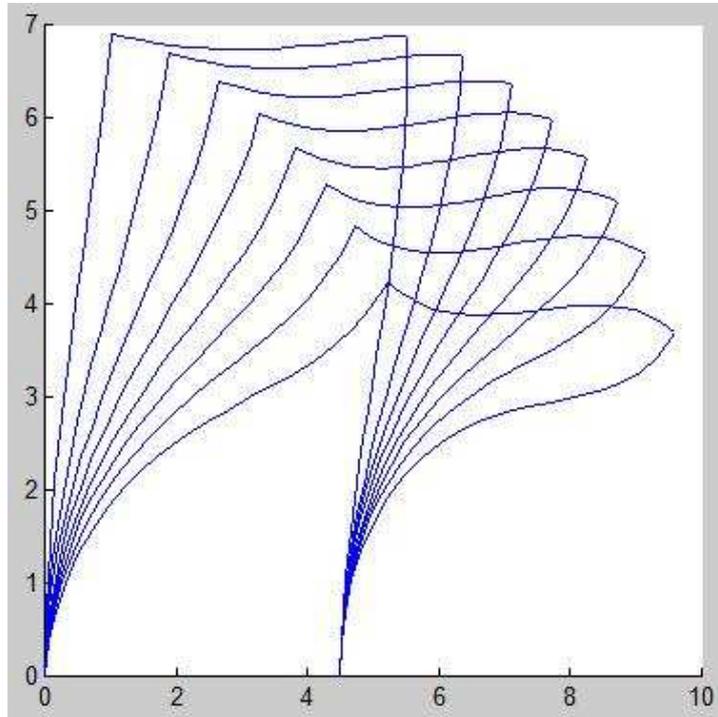
Se observa un comportamiento inicial lineal en un rango de desplazamientos pequeño y luego, un brusco aumento para de nuevo estabilizarse con un comportamiento aproximadamente lineal. Este comportamiento se puede explicar matemáticamente observando una continua reducción de los valores de los vectores propios de la matriz de rigidez tangente a medida que la carga aumenta hasta llegar a cero, es decir pandeo, y un brusco aumento de la carga en este momento. Signo de una estabilización debida a que los otros elementos de la estructura vienen en la ayuda de la columna. Es un comportamiento característico de estructuras hiperestáticas.



**Figura 6** Curva desplazamiento transversal-carga puntual vertical (nudo en  $H/2$ , columna a la izquierda)

## 5.2 Caso 2: Columnas Esbeltas con cargas verticales y laterales

Este ejemplo corresponde a la geometría denominada “Columnas Esbeltas” y al caso de carga “Vertical” añadido al “Horizontal”. Ocho pasos de carga fueron usados con un factor de incremento de 2, lo que significa una carga final  $q_b=9T/m$ ,  $P_{vcol}=32 T$  y  $Phcol=16 T$  (ver Figura 7).

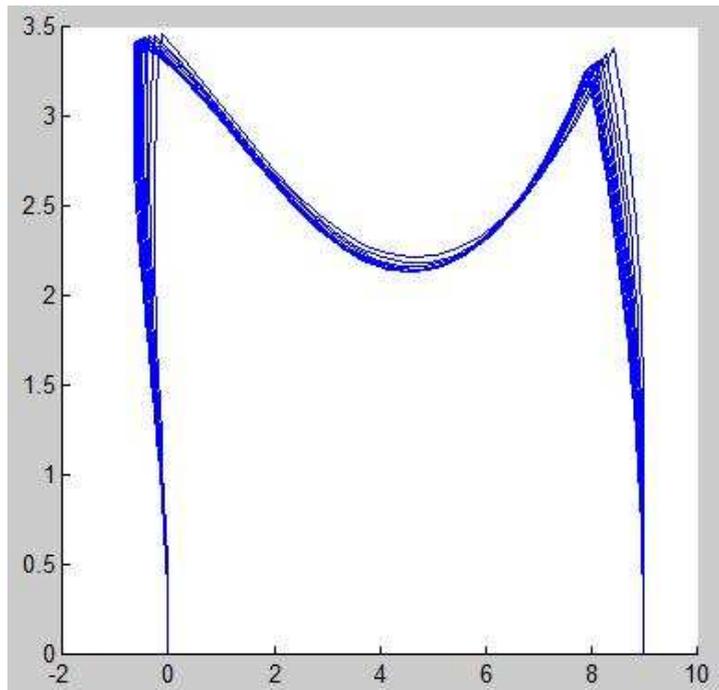


**Figura 7** Configuración deformada para el Caso No 2

El algoritmo implementado se vuelve inestable más allá de esta máxima carga.

## 5.3 Caso 3: Viga de gran longitud con cargas verticales y horizontales

Este ejemplo corresponde a la geometría denominada “Viga de Gran Longitud” y al caso de carga “Vertical” añadido al “Horizontal”. Diez pasos de carga son usados con un factor de magnificación de 2, que significa una carga final  $q_b=9T/m$ ,  $P_{vcol}=40 T$  y  $Phcol=20 T$  (ver Figura 8).



**Figura 8** Configuración deformada para el Caso No3

#### 5.4 Caso 4: Cambio del módulo de elasticidad

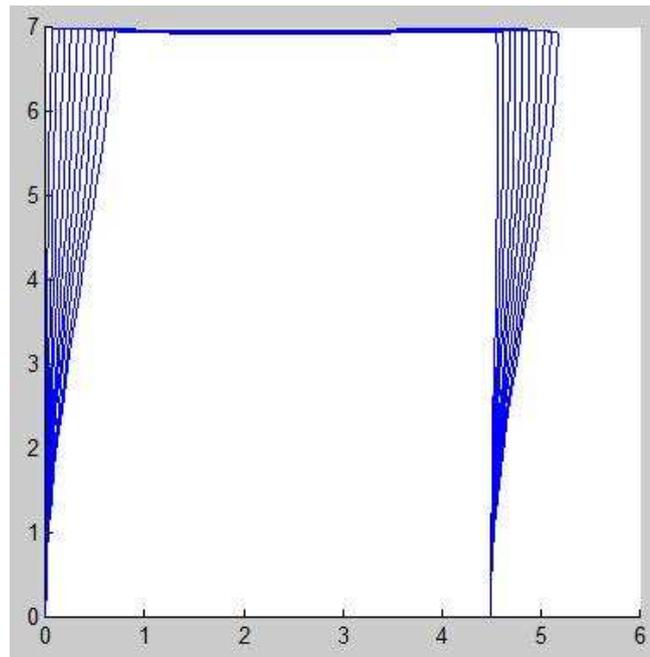
Los Casos 2 y 3 fueron nuevamente solucionados pero en este caso con la mitad del valor de su módulo de elasticidad (ver Figura 9).

En ambos casos el algoritmo implementado con los mismos parámetros se volvió inestable. Por lo tanto por ejemplo en el Caso 2 únicamente diez pasos de carga fueron usados con un factor de magnificación de 1, conduciendo a una carga final de  $q_b = 0.1 \text{ T/m}$ ,  $P_{vcol} = 2 \text{ T}$  y  $P_{hcol} = 1 \text{ T}$ . Similarmente se debieron reducir las cargas del Caso 3.

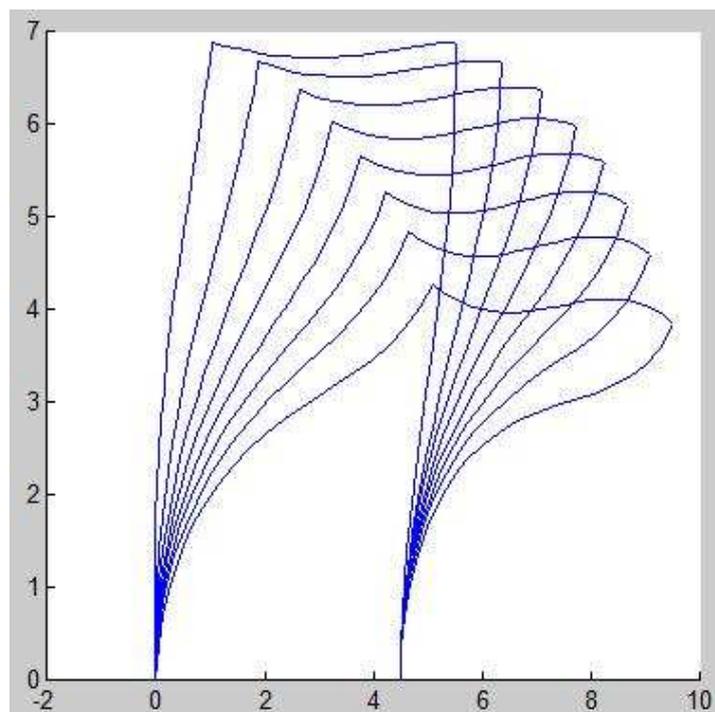
## 6 IMPERFECCIONES GEOMÉTRICAS

La viga y la columna a la derecha fueron calculados como elementos geoméricamente perfectos, pero la columna a la izquierda tiene desplazamiento laterales lineales con un máximo de 0.15 m a  $H/2$  y 0 en sus extremos (ver Figura 10).

A pesar de que la deformada general es similar a anteriores, hay una gran reducción de las cargas para un determinado desplazamiento o un gran aumento de los desplazamientos para una carga determinada.



**Figura 9** Configuración deformada para el Caso2 con la mitad de su módulo elástico inicial



**Figura 10** Imperfecciones geométricas: la columna a la izquierda esta desplazada

## 7 DISCUSIÓN

Las columnas en el Caso 1 (columnas esbeltas bajo carga vertical) presentaron deformaciones extraordinarias las cuales denotan pandeo local seguido por la estabilización de la estructura. La viga, en este caso, fue mucho menos importante y se puede considerar que simplemente “acompañó” los desplazamientos de las columnas.

Las cargas laterales añadieron nuevas características al comportamiento estructural del Caso 2 comparado con el caso previo. Los desplazamientos laterales fueron mucho mayores y, lo más importante, las cargas verticales pudieron alcanzar únicamente una fracción del Caso 1. La diferencia se produce por el efecto P-delta en las columnas.

Las columnas en el Caso 3 fueron más cortas que en el Caso 1 o 2. Por otro lado la longitud de la viga es mucho mayor. El comportamiento estructural en este caso es más estable, mostrando la importancia de tener columnas menos esbeltas. Sin embargo las deflexiones de las vigas fueron 3 veces mayores que las de las columnas.

Los Casos discutidos anteriormente fueron caracterizados por cargas cerca de la razón de convergencia del algoritmo de Newton implementado sobre todo con los parámetros que definen el control por longitud de arco. De aquí que debilitar al material produjo inestabilidad computacional. Sin embargo queda claro que las cargas que soportaría la estructura son mucho más pequeñas y que los problemas de pandeo son más severos.

Finalmente, debe notarse que los campos de desplazamiento en el pórtico con irregularidades geométricas fueron mucho mayores que sin imperfecciones geométricas.

## 8 CONCLUSIONES

Cinco pasos básicos fueron necesarios para implementar la teoría no lineal para vigas planas: descripción de la geometría del sistema estructural, descripción de las cargas externas aplicadas, las ecuaciones de equilibrio en la configuración deformada, aplicación del método de los elementos finites y el uso del método de Newton con control de longitud de arco.

Estos pasos fueron aplicados para solucionar una estructura aporcionada de un piso y un vano con diferentes condiciones geométricas y de carga.

Las características consideradas mostraron la estabilidad de las columnas en un pórtico y su comportamiento de pandeo bajo cargas verticales y horizontales. Este comportamiento fue caracterizado por desplazamientos perpendiculares a las cargas axiales aplicadas. En el caso en que algunas de las cargas produjeron desplazamientos laterales adicionales (cargas horizontales a nivel de la viga), las cargas externas resistidas fueron mucho menores que de otra manera porque las fuerzas verticales multiplicadas por los desplazamientos laterales produjeron nuevos momentos de segundo orden. El comportamiento de la viga fue también importante porque, si no por su resistencia, sus deflexiones modificaron la respuesta del pórtico.

Es importante resaltar que estos resultados son validados por el conocimiento de que el software usado fue adecuado. Un buen programa computacional debe tener necesariamente alguna alternativa de cálculo para comparar la precisión de los resultados y su uso debe basarse en una buena comprensión teórica.

La aplicación del conocimiento de la teoría no lineal debe llevar a conclusiones básicas tales como que una fabricación y construcción precisas deben ser enfatizadas para evitar las imperfecciones geométricas en las estructuras, pues estas afectan de manera sustancial el comportamiento estructural; pero aún más importante, permitirá el desarrollo de soluciones novedosas, que pueden darse con el cada vez mayor uso de nuevos materiales de construcción, así como comprender el comportamiento estructural ante situaciones extremas tales como sismos, incendios o ataques terroristas.

```
%.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....
% *-----*
% |           Program NonlinearBeam           |
% | Fundamentals of Structural Mechanics, 2nd Edition |
% | K. D. Hjelmstad, July 1, 2004           |
% | Modified by P. Caiza, Dec 7, 2007       |
% *-----*
```

```

%.. Set problem parameters,
clear; tol = 1.e-8; alpha = 10; maxsteps = 10; maxit = 100;
nstep = 10; npts = 21;

fname=input('Please type the name of input file [input.dat]: ','s');
%... Default filename will be input.dat'
if isempty(fname)
    fname='input.dat';
end

%... fid will have the file id. 'r'for read-only
fid=fopen(fname,'r');
nelem=str2num(fgetl(fid));
nnodes=str2num(fgetl(fid));
nbasis=str2num(fgetl(fid));
ndof=str2num(fgetl(fid));

ndm = ndof + 1; XX=zeros(nelem,1); YY=zeros(nelem,1);T=zeros(3*nbasis,3*nbasis);
indice=zeros(nelem,3*nbasis); loadsT=zeros(3*nelem,3);DT=zeros(nelem,3);
A=zeros(ndm,ndm); b=zeros(ndm,1);

for nn=1:nelem                %i-node of each element
    temp=str2num(fgetl(fid));
    XX(nn)=temp(1);
    YY(nn)=temp(2);
end

for nel=1:nelem
    indice(nel,:)=str2num(fgetl(fid));    % numeration for unknowns
    loadsT(3*nel-2,:)=str2num(fgetl(fid));    % p1, p2, H(L)
    loadsT(3*nel-1,:)=str2num(fgetl(fid));    % q1, q2, V(L)
    loadsT(3*nel,:)=str2num(fgetl(fid));    % m1, m2, M(L)
    phiT(nel)=str2num(fgetl(fid));    % Transformation angle phi
    DT(nel,:)=str2num(fgetl(fid));    % Element moduli D = [EI, GA, EA]
    xlengthT(nel)=str2num(fgetl(fid));    % Element length is xlength
end

%.. Initialize values for load step zero, set next trial state
x = zeros(ndm,1); xo = zeros(ndm,1); x(ndm) = alpha;
xp=zeros(3*nbasis+1,1); xop=zeros(3*nbasis+1,1);

%.. Compute MAXSTEPS points along the Equilibrium Path
for n = 1:maxsteps

%.... Perform Newton iteration at each load step
nu = 0; test = 1.0;
while (test > tol) & (nu < maxit)
    nu = nu + 1;

%..... Compute Hessian and residual
for nel=1:nelem
    D=DT(nel,:);
    loads=loadsT(3*nel-2:3*nel,:);
    xlength=xlengthT(nel);
    phi=phiT(nel);
    %.. Transformation Matrix
    To=[cos(phi) sin(phi) 0;
        -sin(phi) cos(phi) 0;

```

```

    0 0 1];
for i=1:nbasis
    T(3*i-2:3*i,3*i-2:3*i)=To;    %complete T
end
for i=1:3*nbasis
    if indice(nel,i) ~= 0
        xp(i)=x(indice(nel,i));
        xop(i)=xo(indice(nel,i));
    else
        xp(i)=0;
        xop(i)=0;
    end
end
xp(3*nbasis+1)=x(ndm);
xop(3*nbasis+1)=xop(ndm);
[Ap,bp] = fcn(D,xp,xop,loads,xlength,nbasis,alpha,T);
for i=1:nbasis*3
    for j=1:nbasis*3
        if (indice(nel,i)~= 0) & (indice(nel,j)~=0)
            A(indice(nel,i),indice(nel,j))=A(indice(nel,i),indice(nel,j))+Ap(i,j);
        end
    end
    if indice(nel,i)~= 0
        b(indice(nel,i))=b(indice(nel,i))+bp(i);
        A(indice(nel,i),ndm)=A(indice(nel,i),ndm)+Ap(i,3*nbasis+1);
        A(ndm,indice(nel,i))=A(ndm,indice(nel,i))+Ap(3*nbasis+1,i);
    end
end
A(ndm,ndm)=A(ndm,ndm)+Ap(3*nbasis+1,3*nbasis+1);
b(ndm)=b(ndm)+bp(3*nbasis+1);
end
%..... Compute residual norm, min eigenvalue of tangent stiffness
test = norm(b);

%..... Compute increment and update state vector
dx = -A\b; x = x + dx;

end % while for Newton loop

%.... Output results, set converged state, guess at next state
results(x,indice,nelem,XX,YY,xlengthT,n,nu,test,ndm,nbasis,nnstep,npts,phiT)
temp = xo; xo = x; x = 2*x - temp;

end % loop on n Load Steps

%.. End of program NonlinearBeam

%.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....
%----- Compute A and b for NonlinearBeam element -----FCN
function [A,b] = fcn(D,x,xo,loads,xlength,nbasis,alpha,T)
ndm=3*nbasis+1;
%.. Intialize A and b to zero
b = zeros(ndm,1); A = zeros(ndm,ndm); z = 0;

```

```

%.. Set weights for Simpson integration
wt = [1,4,2,4,2,4,2,4,2,4,2,4,2,4,2,4,1];
intpts = length(wt); dz = 1/(intpts-1);

%.. Transform x to local system
x(1:ndm-1)=T*x(1:ndm-1);
xo(1:ndm-1)=T*xo(1:ndm-1);

%.. Loop on integration points
for n = 1:intpts
    factor = wt(n)*dz*xlength/3;

%.... Compute displacements and derivatives
du = 0; dw = 0; dtheta = 0; theta = 0;
for i = 1:nbasis
    [h,dh] = basis(i,z,xlength,nbasis);
    du = du + x(3*i-2)*dh;
    dw = dw + x(3*i-1)*dh;
    dtheta = dtheta + x(3*i)*dh;
    theta = theta + x(3*i)*h;
end
ct = cos(theta); st = sin(theta);

%.... Compute axial strain, shear strain, and curvature
epsi = dw*st + (1+du)*ct - 1;
beta = dw*ct - (1+du)*st;
curv = dtheta;

%.... Compute axial force, shear force, bending moment, and other forces
bend = D(1)*curv; shear = D(2)*beta; axial = D(3)*epsi;
Hor = axial*ct - shear*st; Ver = axial*st + shear*ct;
Xi = (1+du)*Hor + dw*Ver; Yi = dw*Hor - (1+du)*Ver;
force = [Hor; Ver; bend]; fyi = [0; 0; Yi];
c1 = loads(:,1) + loads(:,2)*x(ndm);
c2 = fyi - c1;
c3 = loads(:,2);
c4 = loads(:,3);

%.... Compute components of [E(T)DE+G] store in matrix G
G(1,1) = D(2)*st*st + D(3)*ct*ct;
G(1,2) = ct*st*(D(3)-D(2));
G(1,3) = D(2)*st*(1+epsi) + D(3)*ct*beta - Ver;
G(1,4) = 0;
G(2,1) = G(1,2);
G(2,2) = D(2)*ct*ct + D(3)*st*st;
G(2,3) = D(3)*st*beta - D(2)*ct*(1+epsi) + Hor;
G(2,4) = 0;
G(3,1) = G(1,3);
G(3,2) = G(2,3);
G(3,3) = D(2)*(1+epsi)^2 + D(3)*beta^2 - Xi;
G(3,4) = 0;
G(4,1) = G(1,4);
G(4,2) = G(2,4);
G(4,3) = G(3,4);
G(4,4) = D(1);

%.... Form stiffness matrix and residual
for i=1:nbasis
    [hi,dhi] = basis(i,z,xlength,nbasis); mm = 3*(i-1);

```

```

for j=1:nbasis
    [h,j,dh] = basis(j,z,xlength,nbasis); nn = 3*(j-1);

%..... Compute noting the sparse structure of
    GB(1:4,1:2) = dh*j*G(1:4,1:2);
    GB(1:4,3) = h*j*G(1:4,3) + dh*j*G(1:4,4);
    BGB(1:2,1:3) = dhi*GB(1:2,1:3);
    BGB(3,1:3) = hi*GB(3,1:3) + dhi*GB(4,1:3);

%..... Assemble the result into the A matrix
    A(mm+1:mm+3,nn+1:nn+3) = A(mm+1:mm+3,nn+1:nn+3) + BGB*factor;
end % loop on j

%..... Form integral part of residual force and assemble into matrix
    b(mm+1:mm+3) = b(mm+1:mm+3) + (dhi*force + hi*c2)*factor;
    A(mm+1:mm+3,ndm) = A(mm+1:mm+3,ndm) - hi*c3*factor;

end % loop on i
z = z + dz;
end % Loop on n

%.. Add end load terms to the residual and coefficient matrix
for i = 1:nbasis
    [hi,dhi] = basis(i,1,xlength,nbasis); mm = 3*(i-1);
    b(mm+1:mm+3) = b(mm+1:mm+3) - hi*c4*x(ndm);
    A(mm+1:mm+3,ndm) = A(mm+1:mm+3,ndm) - hi*c4;
end

%.. Add arc-length constraint terms to Hessian and residual
b(ndm) = b(ndm) + dot(x-xo,x-xo) - alpha^2;
A(ndm,1:ndm) = 2*(x-xo)';

%.. Transform Stiffness Matrix and Load vector terms to Global System
A(1:ndm-1,1:ndm-1)=T'*A(1:ndm-1,1:ndm-1)*T;
A(1:ndm-1,ndm)=T'*A(1:ndm-1,ndm);
b(1:ndm-1)=T'*b(1:ndm-1);

return

%.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....
%----- Evaluate ith basis function h and derivative dh -----BASIS
function [h,dh] = basis(i,z,xlength,nbasis)
L=1/xlength;

%.. Quadratic Lagrangian finite element interpolation functions
if nbasis==3
    if i==1
        h=1-3*z+2*z^2;
        dh=(-3+4*z)*L;
    end
    if i==2

```

```

    h=4*z-4*z^2;
    dh=(4-8*z)*L;
end
if i==3
    h=-z+2*z^2;
    dh=(-1+4*z)*L;
end
end

%.. nbasis=5
if nbasis==5
    if i==1
        h=1-25/3*z+70/3*z^2-80/3*z^3+32/3*z^4;
        dh=(-25/3+140/3*z-80*z^2+128/3*z^3)*L;
    end
    if i==2
        h=16*z-208/3*z^2+96*z^3-128/3*z^4;
        dh=(16-416/3*z+288*z^2-512/3*z^3)*L;
    end
    if i==3
        h=-12*z+76*z^2-128*z^3+64*z^4;
        dh=(-12+152*z-384*z^2+256*z^3)*L;
    end
    if i==4
        h=16/3*z-112/3*z^2-224/3*z^3-128/3*z^4;
        dh=(16/3-224/3*z+224*z^2-512/3*z^3)*L;
    end
    if i==5
        h=-z+22/3*z^2-16*z^3+32/3*z^4;
        dh=(-1+44/3*z-48*z^2+128/3*z^3)*L;
    end
end

%.. nbasis=7
if nbasis==7
    if i==1
        h=1-147/10*z+406/5*z^2-441/2*z^3+315*z^4-1134/5*z^5+324/5*z^6;
        dh=(-147/10+812/5*z-1323/2*z^2+1260*z^3-1134*z^4+1944/5*z^5)*L;
    end
    if i==2
        h=36*z-1566/5*z^2+1044*z^3-1674*z^4+1296*z^5-1944/5*z^6;
        dh=(16-3132/5*z+3132*z^2-6696*z^3+6480*z^4-11664/5*z^5)*L;
    end
    if i==3
        h=-45*z+1053/2*z^2-4149/2*z^3+3699*z^4-3078*z^5+972*z^6;
        dh=(-45+1053*z-12447/2*z^2+14796*z^3-15390*z^4+5832*z^5)*L;
    end
    if i==4
        h=40*z-508*z^2+2232*z^3-4356*z^4+3888*z^5-1296*z^6;
        dh=(40-1016*z+6696*z^2-17424*z^3+19440*z^4-7776*z^5)*L;
    end
    if i==5
        h=-45/2*z+297*z^2-2763/2*z^3+2889*z^4-2754*z^5+972*z^6;
        dh=(-45/2+594*z-8289/2*z^2+11556*z^3-13770*z^4+5832*z^5)*L;
    end
    if i==6
        h=36/5*z-486/5*z^2+468*z^3-1026*z^4+5184/5*z^5-1944/5*z^6;
        dh=(36/5-972/5*z+1404*z^2-4104*z^3+5184*z^4-11664/5*z^5)*L;
    end
end

```

```

    if i==7
        h=-z+137/10*z^2-135/2*z^3+153*z^4-162*z^5+324/5*z^6;
        dh=(-1+137/5*z-405/2*z^2+612*z^3-810*z^4+1944/5*z^5)*L;
    end
end

return

```

```

%.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....
%----- Print and plot results of current step -----RESULTS
function [] =
results(x,indice,nelem,XX,YY,xlengthT,n,nu,test,ndm,nbasis,nnstep,npts,phiT)
    xp=zeros(3*nbasis,1);
    axis('square'); hold on;
    for nel=1:nelem
        xlength=xlengthT(nel);
        phi=phiT(nel);
%.. Transformation Matrix
        To=[cos(phi) sin(phi) 0;
            -sin(phi) cos(phi) 0;
            0 0 1];
        for i=1:nbasis
            T(3*i-2:3*i,3*i-2:3*i)=To;    %complete T
        end
        for i=1:3*nbasis
            if indice(nel,i) ~= 0
                xp(i)=x(indice(nel,i));
            else
                xp(i)=0;
            end
        end
    end

%.. Transform x to local system
    xp=T*xp;

%.. Determine if current step is an output step
    if mod(n,nnstep) == 0

%.... Compute and print current geometry of beam

        z = 0; dz = 1/(npts-1);
        for ii = 1:npts
            u = zeros(3,1);
            for i = 1:nbasis
                [h,dh] = basis(i,z,xlength,nbasis); mm = 3*(i-1);
                u(:) = u(:) + h*xp(mm+1:mm+3);
            end
            y1(ii) = z*xlength + u(1); y2(ii) = u(2);
            z = z + dz;
        end

        for i=1:npts

```

```
Y1(i)=XX(nel)+y1(i)*cos(phi)-y2(i)*sin(phi);
Y2(i)=YY(nel)+y1(i)*sin(phi)+y2(i)*cos(phi);
end

fprintf('%5i%9.5f%14.4e%14.4e%14.4e%4i%12.2e\n',n,x(ndm),u',nu,test)
plot(Y1,Y2,'-');
end
end

return
```

## REFERENCIAS

1. Hjelmstad, Keith D., (2005) *Fundamentals of Structural Mechanics*, Second Edition. Springer Science+Business Media Inc., New York, chapters 10 and 12.
2. CEE 471 Fall (2007) class handout. Title of the handout: *Term Project 2*, Prof. K. D. Hjelmstad.
3. MATLAB (2000) The Language of Technical Computing, Version 6.0, Release 12, September 22.
4. HP50g (2006) Graphing Calculator, User's Manual, HP Development Company, Edition 1.

# SÍNTESIS DE UN SORBENTE HÍBRIDO APLICADO EN LA REMOCIÓN SELECTIVA DE ARSÉNICO DESDE AGUAS SUPERFICIALES CONTAMINADAS

Luis H. Cumbal Flores<sup>1</sup> y Marcelo M. Zuñiga Salazar<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigaciones Científicas  
Escuela Superior Politécnica del Ejército

<sup>2</sup>Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente  
Escuela Superior Politécnica del Ejército

## RESUMEN

Los materiales que se aplican para la remoción eficiente de arsénico (As) son los que tienen afinidad química con el metaloide y sus formas hidrolizadas. Las partículas de óxidos de hierro exhiben excelentes propiedades conducentes a la captura selectiva de contaminantes traza como el arsénico, pero por sus tamaños diminutos no pueden ser usadas en aplicaciones tipo flujo pistón porque ocasionan elevadas caídas de presión. Encapsulando estas partículas dentro de materiales soporte mejora sus características hidráulicas y mecánicas.

En este proyecto se preparó un nuevo material sorbente mediante la aplicación de un procedimiento químico simple. El material sorbente híbrido está compuesto de una matriz de quitosano (biopolímero) y partículas de óxidos de hierro dispersadas dentro de las esferas del biopolímero. El material una vez preparado fue usado para remover arsénico desde aguas contaminadas. Las pruebas de sorción de arsénico usando agua sintética muestran que 10 µg/L de As se alcanzan luego de tratar 3000 volúmenes de lecho de agua contaminada. Además, una planta prototipo cargada el material híbrido puede tratar 12500 L de agua contaminada de origen natural sin exceder los 50 µg/L. El material puede también reusarse luego de su regeneración con sosa cáustica y acondicionamiento con agua acidificada.

## ABSTRACT

Materials that are used for arsenic (As) removal are those with chemical affinity towards the metalloid and its hydrolyzed forms. Iron oxides particles exhibit excellent properties conducive to selective capture of trace contaminants such as arsenic. However, these tiny particles can not be used in plug flow applications due to the development of high pressure loss. Harnessing these particles within supporting materials improve their hydraulic and mechanical characteristics.

In this study, we prepared a new sorbent material by a simple chemical procedure. The hybrid sorbent is formed by a matrix of chitosan (biopolymer) and iron oxide particles dispersed within of the biopolymer spheres. The sorbent once prepared was used to remove arsenic from contaminated waters. Arsenic sorption tests using synthesized water show that 10 µg/L of As is reached after treating 3000 bed volumes of contaminated water. In addition, a pilot plant loaded with the hybrid sorbent can treat 12500 L of natural water contaminated with arsenic without exceeding 50 µg/L. The material can also be reused after its regeneration with caustic soda and conditioning with acidified water.

## 1 INTRODUCCIÓN

El arsénico (As) es un metaloide tóxico que está presente en las aguas superficiales y subterráneas en forma trivalente y pentavalente. La ingestión de agua contaminada con arsénico es un problema de salud pública a nivel mundial [1,2], pues por exposición crónica, el

arsénico se acumula en el organismo y a ciertas concentraciones ocasiona afecciones en la piel. La evidencia epidemiológica de personas con ingestión prolongada de arsénico inorgánico, vía agua de bebida, es la hiperqueratosis palmo-plantar, cuya manifestación principal es la pigmentación de la piel y callosidades localizadas en las palmas de las manos y plantas de los pies. La presencia de arsénico en agua, su grado de contaminación y la incidencia de enfermedades de piel en la India, Bangladesh, Taiwán, Vietnam, Argentina y México se describen en diferentes estudios [3-11].

Por otra parte, las partículas de óxido de hierro son excelentes adsorbentes, de especies químicas, incluyendo iones metálicos [12-14], aniones inorgánicos [15,16] y algunos compuestos orgánicos [17,18]. Los óxidos de Fe(III) hidratados (HFO) exhiben excelentes propiedades conducentes a la captura selectiva contaminantes traza por su comportamiento de ácido débil. La predominancia de sus grupos funcionales y su capacidad de remoción depende del pH ( $pK_{a1}=6.5$  y  $pK_{a2}=9$ ) [19]. Por ejemplo a  $pH \leq 4$  remueve arseniatos por un efecto combinado de interacción electrostática e interacción ácido-base de Lewis, en el rango de pH de 6.5 a 8.5 inmoviliza arsénico por interacción ácido-base de Lewis y a  $pH \geq 11$  captura cationes metálicos [20]. Los métodos de preparación de las partículas de óxidos de Fe(III) son simples, sin embargo estas partículas diminutas no pueden ser utilizadas en columnas de lecho fijo, barreras reactivas, ni en ninguna configuración tipo flujo pistón, debido a que causan elevadas caídas de presión y porque no son durables. El encapsulamiento de las partículas de óxidos de Fe(III) en materiales soporte mejora sus propiedades hidráulicas y mecánicas y las vuelve químicamente más estables. Investigaciones previas han utilizado como materiales de soporte arenas, alginato de sodio, carbón activado, etc., pero los resultados no han sido satisfactorios [20-24].

En este estudio se prepararon esferas de quitosano, biopolímero que se encuentra en forma natural en los caparzones de los crustáceos y en las paredes celulares de algunas plantas y hongos, que luego fueron impregnadas con partículas de óxido de Fe(III) y utilizadas en la remoción de arsénico desde aguas sintéticas y naturales usando columnas de lecho fijo de laboratorio y en una planta piloto.

## **2 METODOLOGÍA**

### **2.1 Preparación del material sorbente**

El procedimiento consta de las siguientes etapas:

- Molienda y tamizado.- Gránulos de quitosano son sometidos a molienda y tamizado para obtener tamaños de 250  $\mu\text{m}$ .
- Disolución.- El quitosano tamizado es disuelto en una solución de ácido acético al 4% y el producto se almacena a temperatura ambiente por 15 días para disminuir la viscosidad.
- Formación de esferas.- La solución se introduce en una jeringa de 50 mL y se deja caer gota por gota en una solución al 5% de NaOH.
- Lavado y entrecruzamiento.- Después de 16 horas de contacto con la solución alcalina, las esferas de quitosano son lavadas con agua desmineralizada y depositas en una solución al 2.5% de glutaraldehído.
- Carga de óxidos de Fe (III).- 100 g de esferas de quitosano son sumergidas en un reactor conteniendo 500 mL de  $\text{FeCl}_3$  al 3% y agitadas a 40 rpm por 48 horas.
- Desorción y precipitación.- Las esferas extraídas del reactor son sumergidas en 500 mL de una solución de NaOH al 5% para la desorción y precipitación simultánea de los átomos de Fe(III) en la superficie y poros de las esferas.
- Lavado.- Las esferas impregnadas con los óxidos de hierro son sometidas a sucesivos lavados con agua desmineralizada para nivelar el pH a un valor igual a 7.

### **2.2 Ensayos con columnas de lecho fijo**

Se condujeron usando una columna de 1.1 cm de diámetro y 30 cm de longitud, empacada con quitosano impregnado con óxidos de Fe(III) (Q-OFH). La razón diámetro de

columna al diámetro del sorbente fue de aproximadamente 10:1. Se corrieron dos series de columnas, la primera se alimentó con agua sintética preparada con 100 µg/L de arsénico, 120 mg/L de sulfatos, 90 mg/L de cloruros y 100 mg/L de bicarbonatos y pH = 6.0. En la segunda serie se utilizó agua natural proveniente del río Tuminguina. En las dos series de ensayos, se utilizó una bomba peristáltica de desplazamiento positivo, a un caudal de 1 mL/min. El efluente se recogió en tubos de ensayo colocados en un colector de fracciones Eldex PN 1243.

### 2.3 Ensayos de regeneración

En el proceso de regeneración, se utilizó una solución al 5% de NaOH. El regenerante se alimentó a la columna de lecho fijo con un caudal de 0.5 mL/min. El efluente se recogió en el colector de fracciones y para posteriormente análisis. Las esferas y gránulos regenerados fueron lavados con ocho volúmenes de lecho de una solución al 10% de ácido acético.

### 2.4 Ensayos de digestión ácida

Para este ensayo, 250 mg de quitosano impregnado con OFH fueron sumergidos en dos lotes consecutivos de solución ácida (200 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 2N). Los lotes fueron colocados en un agitador rotativo a 40 rpm durante 48 horas. Los sobrenadantes fueron filtrados y analizados por hierro total.

### 2.5 Análisis químicos

Para la cuantificación de arsénico en muestras tomadas del colector de fracciones, de la planta piloto y de las aguas del río Tuminguina, se utilizó el sistema Generador de Hidruros, Perkin Elmer, acoplado a un Espectrómetro de Absorción Atómica, Perkin Elmer, AA 100 (GH-AA100) equipado con una lámpara de descarga de electrones a 197.3 nm de longitud de onda. Para medir el contenido de hierro total depositado en las esferas de quitosano se empleó igualmente el AA 100, Los cloruros, sulfatos y bicarbonatos fueron analizados siguiendo métodos estándares del Standard Methods.

### 2.6 Reactivos químicos

Todos los reactivos químicos utilizados en esta investigación fueron de grado analítico y comprados a la empresa Espectrocrom, representante en el Ecuador de Sigma-Aldrich Chemicals. El agua desmineralizada usada en este estudio, se la obtuvo desde un desmineralizador Millipore Direct-Q3.

## 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Contenido de hierro total depositado en las esferas de quitosano

El contenido de hierro total se cuantificó con la ayuda del espectrómetro de absorción atómica luego de una digestión ácida usando el Método Fe-4500. Como se observa en la Figura 1, el contenido de hierro en las esferas de quitosano varía con el ciclo de carga.

La Figura 1 indica que luego de cuatro ciclos se logra impregnar 38 mgFe/g de quitosano húmedo. Notar que en los primeros ciclos, el contenido de hierro total es solamente 22.3 mg/g, por lo que se requieren más de dos ciclos de carga para tener una cantidad significativa de óxidos de hierro en el interior del quitosano.

La carga de partículas de óxido de hierro en las esferas de quitosano es solamente moderada, debido que a pH ácido (pH = 1.6) los grupos amino del quitosano se encuentran cargados positivamente y repelen a los átomos de Fe(III).

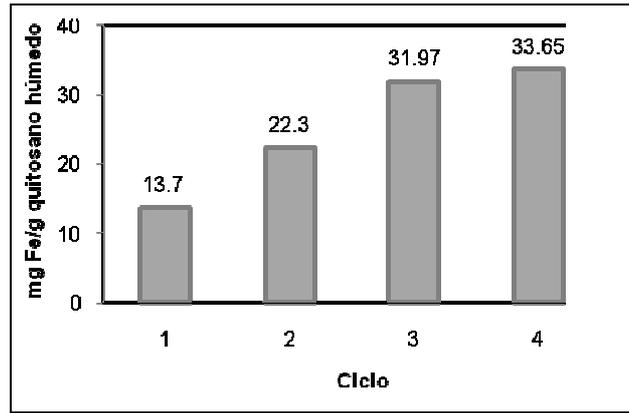


Figura 1 Contenido de Fe total en las esferas quitosano en función del ciclo de carga

### 3.2 Columna de lecho fijo usando agua sintética

En la Figura 2 se presenta el historial de la concentración de arsénico en un ensayo de sorción usando esferas de quitosano impregnadas con óxidos de Fe (III) y agua sintética a pH igual a 6.2. Notar que 50 µg/L se alcanzan luego de tratar 40,000 volúmenes de agua contaminada con As. La selectividad por los oxianiones de As(V) puede explicarse porque a pH = 6.2, los sitios reactivos de los óxidos de Fe(III) dispersos en las esferas de quitosano, predominante se encuentran cargados positivamente, por lo tanto remueven As mediante la combinación de dos interacciones: i) electrostática y ii) ácido-base de Lewis y representadas por las reacciones [25]:



LAB: interacción ácido base de Lewis

Por otra parte, los grupos amino del quitosano a pH 6.2 son en su mayor parte positivos y en consecuencia retienen electrostáticamente a los oxianiones de As(V). Bajo condiciones ideales del proceso de sorción, el porcentaje de grupos amino cargados positivamente responde a las siguientes ecuaciones [26]:



$$K_a = \frac{[\text{QNH}_2][\text{H}^+]}{[\text{QNH}_3^+]} \quad (4)$$

$$[\text{QNH}_2]_T = [\text{QNH}_3^+] + [\text{QNH}_2] \quad (5)$$

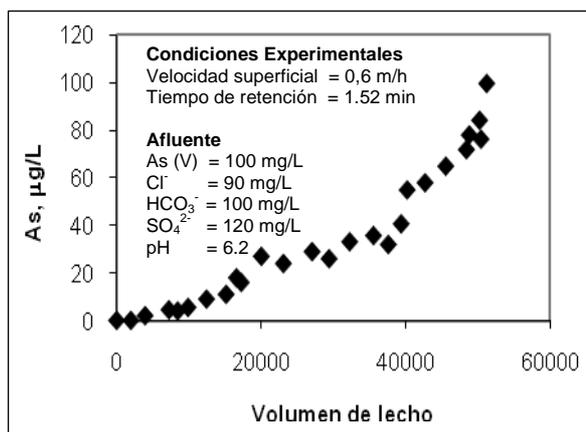
De las ecuaciones 4 y 5, el porcentaje de grupos amino positivamente cargados puede obtenerse mediante la siguiente relación:

$$\frac{[\text{QNH}_3^+]}{[\text{QNH}_2]_T} = \frac{1}{1 + \frac{K_a}{[\text{H}^+]}} \quad (6)$$

Donde  $[\text{QNH}_2]$  representa el grupo amino neutro,  $[\text{QNH}_3^+]$  es el grupo amino ionizado positivamente,  $[\text{QNH}_2]_T$  constituye el grupo amino total presente en el quitosano y  $K_a$  es la constante de disociación (mol/L). La  $pK_a$  ha sido reportada por Roberts (1992b) en el rango de 6.2 a 7.0 [27]

Comparando con las arenas recubiertas con óxidos de hierro [21], el quitosano modificado muestra una mejor capacidad de sorción porque los sitios reactivos están no solamente localizados en la superficie externa sino también en el interior de la red de los poros de las esferas.

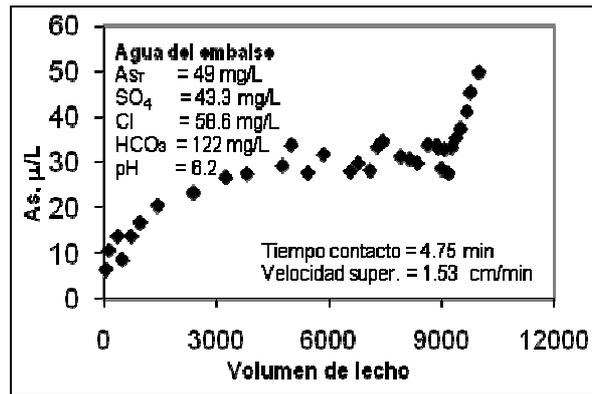
Con los resultados de esta prueba se extrapoló la capacidad de remoción del quitosano (2734  $\mu\text{g As/g}$  de quitosano húmedo). Es preciso anotar sin embargo que el experimento se condujo con quitosano mixto (normal-desintegrado). De manera que los finos de las esferas pudieron generar una mayor área superficial y consecuentemente pudieron contribuir al incremento en la capacidad de remoción de As, aunque los finos no pueden utilizarse en filtros de plantas de tratamiento debido a que provocan excesiva caída de presión.



**Figura 2** Historial de concentraciones de As en una columna de lecho fijo empacada con quitosano modificado con óxidos de Fe(III).

### 3.3 Columna de lecho fijo usando agua cruda del embalse del río Tuminguina

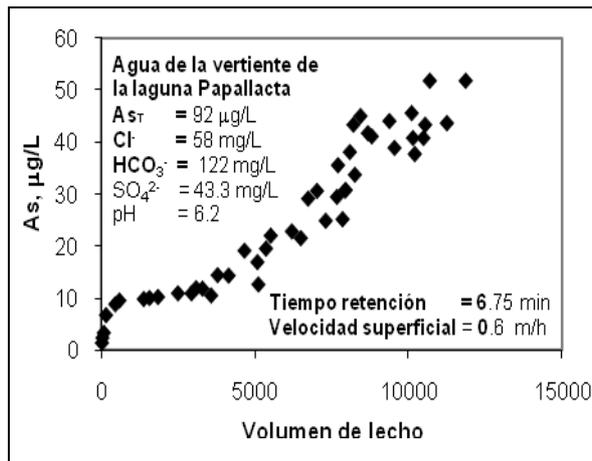
Para evaluar la capacidad de remoción arsénico del quitosano impregnado con OFH se utilizó agua cruda del embalse de la EMAAP-Q, ubicado en el río Tuminguina. La concentración de As<sub>T</sub> del agua reservorio fue de 49  $\mu\text{g/L}$  y la del resto de componentes se indican en la Figura 3. Antes del ensayo el agua natural fue ajustada a pH 6.0 y luego fue alimentada a la columna con una bomba peristáltica. Notar que la concentración de 10  $\mu\text{gAs}_T/\text{L}$ , se alcanza luego de pasar 420 volúmenes de lecho y que la concentración del efluente de la columna es igual a la del influente (49  $\mu\text{g/L As}_T$ ) luego de pasar 8852 volúmenes de lecho. En este ensayo además, se determinó que la capacidad de remoción de As es igual a 179.7  $\mu\text{g As}_T/\text{g}$  sorbente, valor que comparado con el del ensayo con agua sintética es de un orden de magnitud inferior. Este fenómeno puede ser atribuido a la competición de la materia orgánica natural (40 mg/L, medida como carbono orgánico total) por los sitios de sorción en los óxidos de Fe(III) y a la formación de complejos entre la materia orgánica natural y el As(III), favoreciendo la elusión temprana del arsénico con el efluente de la columna. Redman *et al.* (2002), reportan que la presencia de materia orgánica provoca un desplazamiento y retraso de las especies arsenicales de los sitios de sorción en sorbentes naturales, por la ocupación u obstrucción de una gran proporción de superficie reactiva, provocando de esta manera una disminución en la cantidad de sitios activos para capturar arsénico[28].



**Figura 3** Historial de concentraciones de As en una columna de lecho fijo empacada con quitosano modificado con óxidos de Fe(III)

### 3.4 Columna de lecho fijo utilizando agua cruda con una pre-columna de carbón activado

Con el propósito de evitar la rápida elusión de arsénico desde la columna de lecho fijo, se procedió a colocar una pre-columna de carbón activado para retener la materia orgánica natural. Los resultados de este experimento revelan que los 50 µg/L de As<sub>T</sub>, se alcanzan luego de pasar aproximadamente 10700 volúmenes de lecho de agua natural contaminada con As y que se pueden remover 760 µg/L de As<sub>T</sub> (ver Figura 4).



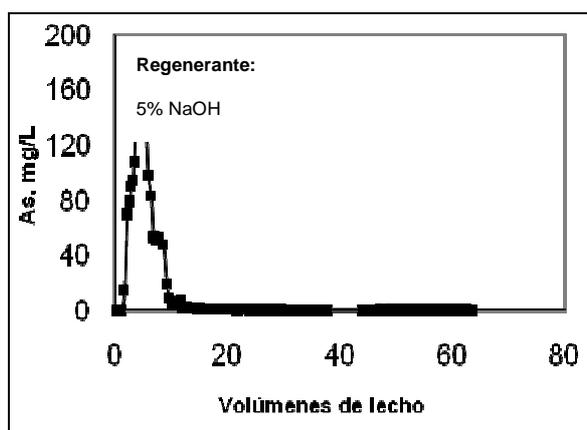
**Figura 4** Perfil de As en el efluente del arreglo experimental con dos columnas de lecho fijo usando agua de la vertiente de la laguna de Papallacta.

Es evidente que la columna con carbón activado colocada antes de la columna con quitosano modificado produce un mejoramiento en la remoción de As desde el agua contaminada. Toles et al. (1997), señalan que el carbón activado remueve eficientemente compuestos orgánicos no polares y recalcitrantes en la potabilización de agua y en el tratamiento de aguas residuales [29].

### 3.5 Regeneración del quitosano impregnado con OFH

Los materiales sorbentes son viables económicamente cuando éstos son usados durante varios ciclos de sorción y desorción. Para examinar la factibilidad de que el Q-OFH sea reusado, se lo regeneró con una solución al 5% de NaOH. En la Figura 5, se muestra el perfil de concentraciones de arsénico total durante la regeneración. Notar que con solo 10 volúmenes de sosa cáustica se puede recuperar un 89% de arsénico retenido en el material durante la sorción (673 µg As<sub>T</sub>/g quitosano). La observación de que la desorción de arsénico

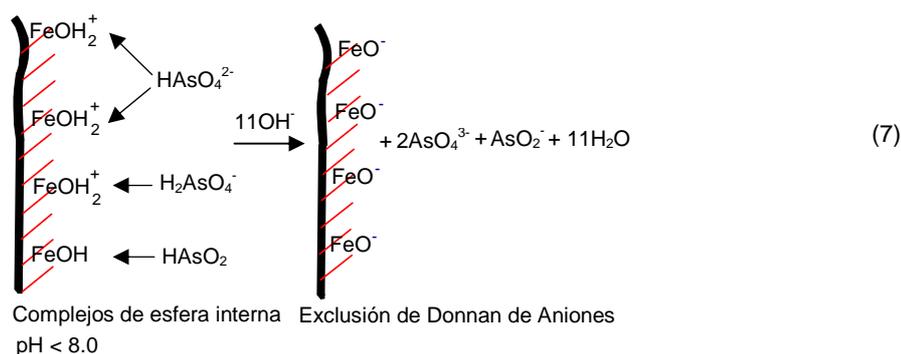
fue completada en solo 10 volúmenes de lecho, demuestra que los sitios de sorción de las partículas de OFH son fácilmente accesibles.



**Figura 5** Perfil de concentración de arsénico durante la regeneración del Q-OFH.

A pH alcalino, los sitios de sorción en las partículas OFH no contienen hidrógenos y se hallan cargados negativamente; De igual manera todas las especies arsenicales tienen carga negativa a este pH (aniones), de manera que el efecto de co-exclusión de Donnan es el que predomina dando como resultado una eficiente desorción de las especies arsenicales [30].

La estequiometría de las reacciones de desorción de los arseniatos y arsenitos adsorbidos en las superficies de las partículas OFH, se expresan de la siguiente manera [25]:



**Figura 6** Ilustración del mecanismo de desorción de las especies arsenicales durante la regeneración del Q-OFH.

Posterior a la regeneración, las esferas de Q-OFH deben ser reacondicionadas con 0.3 M de ácido acético para disminuir el pH. Se necesitaron solo ocho volúmenes de solución ácida para que el pH alcance 5.5. Luego del reacondicionamiento, las esferas de Q-OFH están listas para el siguiente ciclo de sorción y ningún ajuste posterior de pH es necesario. En la Figura 7 se resumen las reacciones químicas de protonización [25].

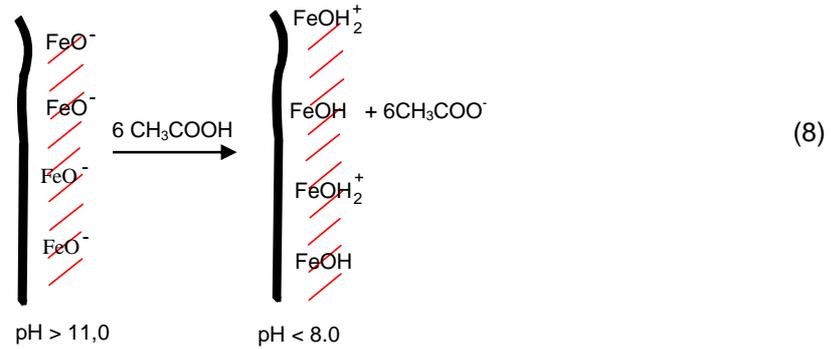


Figura 7 Procesos de acondicionamiento de Q-QFH

### 3.6 Diseño, instalación y operación de una planta piloto para remover arsénico desde agua de la vertiente de la laguna de Papallacta

Para el diseño de la planta se tomaron en cuenta los datos de los ensayos de sorción del arsénico en el Q-OFH usando columnas de lecho fijo y en las pruebas cinéticas de sorción. La planta fue diseñada para abastecer con agua segura a una comunidad de 20 personas, con un consumo promedio de de 15 litros agua/día/persona (agua para bebida y alimentación). En los ensayos de sorción se determinó que el Q-OFH tiene una capacidad promedio de 0.5 mgAs/g de quitosano húmedo. Con este último dato y los valores de velocidad superficial y tiempo de retención, se dimensionó el filtro que contiene el material sorbente. Las características del filtro se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1 Especificaciones del filtro de la planta piloto

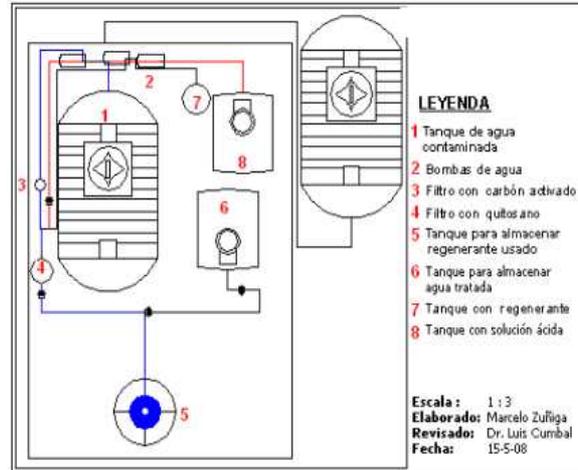
Especificaciones técnicas	Unidad	Valor
Caudal	L/min	0.50
Altura	cm	45.00
Diámetro exterior	cm	21.60
Diámetro interior	cm	21.20
Área transversal	dm <sup>2</sup>	3.46
Altura de lecho con Q-OFH	cm	14.44
Densidad húmeda del Q	g/L	1000.00

Por otra parte, la dosificación del cloruro férrico usado en este estudio como coagulante, para inmovilizar el arsénico contenido en el regenerante usado, fue realizada en forma manual. En la Tabla 2 se enlistan los componentes de la planta piloto y en la Figura 8 se observa la distribución de sus unidades.

Tabla 2 Componentes de la planta piloto

Componentes de la planta piloto	Volumen L
Tanque de almacenamiento de agua cruda	4000
Tanque para almacenar regenerante	250
Tanque para acondicionamiento	250
Tanque para almacenar solución estabilizadora de pH	50
Tanque para recolectar los precipitados de Fe(III)	50
Filtro de carbón activado	10

En cambio en la Tabla 3 se indican las características de operación de la planta. Las tres bombas de 0.25 HP que i) alimentan con agua cruda a la planta prototipo, ii) ayudan a circular la solución regenerante por el filtro que contiene Q-OFH, iii) bombean la solución ácida luego de la regeneración y acondicionan las esferas de Q/OFH a un pH igual a 6.0; fueron seleccionadas considerando un caudal de diseño (0.5 L/min).



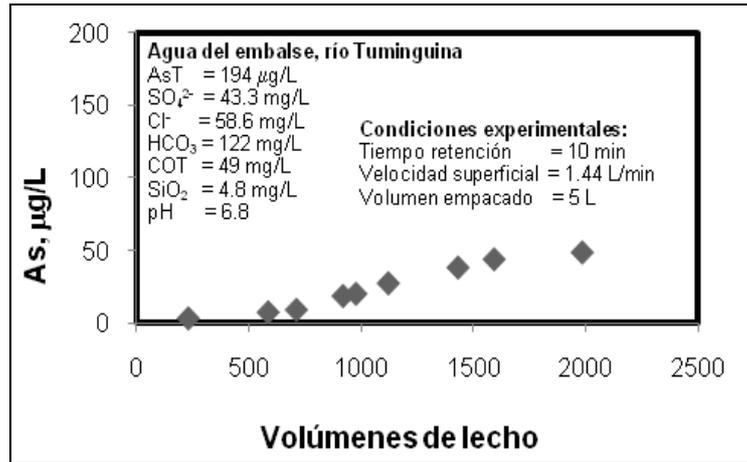
**Figura 8** Planta prototipo para remover arsénico.

**Tabla 3** Características de operación de la planta prototipo

Parámetro de Operación	Valor
Contenido de As en la vertiente de la Laguna de Papallacta	194 µg/L As
Masa As acumulada/día: <i>consumo diario de agua x concentración de As</i>	58.2 mgAs/g/d
Masa removido por quitosano: <i>capacidad quitosano x masa del quitosano</i>	2500 mg As
Días antes de regeneración: <i>As removido/ Masa de As diaria</i>	42.96
Tiempo para alcanzar 300 L/d	10 h
Masa de Q-OFH: <i>masa removido por Q-OFH/capacidad del Q-OFH</i>	5000 g
Volumen de Q-OFH: <i>masa Q-OFH/densidad Q-OFH</i>	5 L
Caudal de agua tratada:	30 L/h
Velocidad superficial del agua: <i>caudal/área transversal</i>	1.44 cm/min
Tiempo de retención: <i>altura del Q-OFH/velocidad superficial</i>	10 min
Volumen regenerante (5% NaOH):	50 L

### 5.7 Primer ciclo de operación de la planta prototipo

En la Figura 9 se muestra la concentración de As medido en el tanque de recolección del agua tratada durante el primer ciclo de operación de la planta prototipo.

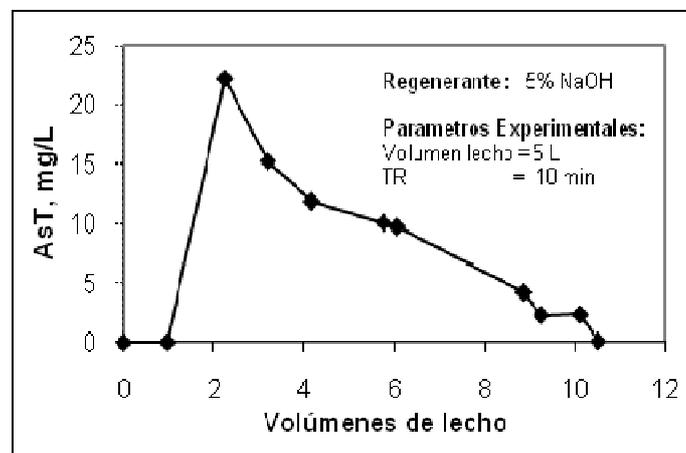


**Figura 9** Concentración de As<sub>T</sub> en el primer ciclo de operación en la planta prototipo usando agua del embalse de la EMAAP-Q, localizado en el río Tumingüina.

Notar que luego de pasar 710 volúmenes de lecho de agua cruda se alcanza la concentración de 10 µg As<sub>T</sub>/L mientras que se pueden tratar más de 2500 volúmenes de lecho (12500 L) sin que se llegue todavía a los 50 µg/L de arsénico. La rápida elusión del arsénico desde el filtro conteniendo el Q-OFH puede estar asociada con la elevada concentración del As en el agua cruda (194 µg/L).

### 5.8 Primera regeneración del Q-OFH usado en la planta piloto

En la Figura 10 se observa la regeneración del Q-OFH empacado en el filtro de la planta prototipo. Fue necesario el uso de solo 10 volúmenes de lecho (50 L de sosa caustica) para recuperar aproximadamente el 50% de arsénico desde el Q-OFH.



**Figura 10** Perfil de concentración de As durante la regeneración del Q-OFH empacado en la planta piloto.

## 4 CONCLUSIONES

- La impregnación con 38 mg Fe<sub>T</sub>/g quitosano húmedo es bastante buena si se toma en consideración que a pH de la dosificación con los átomos de Fe(III) (pH = 1.6), los grupos amino del quitosano están cargados positivamente y repelen los cationes de Fe. Notar que la dispersión de los OHF en una mayor área superficial favorece el incremento en la reactividad del quitosano y consecuentemente mejora la remoción selectiva de las especies arsenicales.

- El quitosano impregnado con óxidos de Fe(III) presenta varias ventajas con respecto a otros materiales soporte emergentes: i) disponibilidad de la materia prima para su procesamiento, ii) fácil metodología de preparación, iii) buenas propiedades mecánicas e hidráulicas, iv) posibilidad de uso en varios ciclos de adsorción y desorción, v) no altera la calidad del agua porque no es tóxico, requerimiento indispensable para ser utilizado en tratamientos de aguas de bebida, vi) eficiente regeneración, requisito indispensable para que sea reusado y vii) biodegradación rápida.
- El mecanismo de retención ejercido por las esferas Q-OFH sobre las especies arsenicales, se fundamenta en la combinación de interacciones electrostáticas y ácido-base de Lewis. Los oxianiones arsenicales se ligan electrostáticamente con los grupos positivos de los óxidos de Fe(III) mientras que la interacción ácido-base de Lewis forma complejos de esfera interna entre el arsénico (donador de un par de electrones) y los OFH (aceptador de par de electrones).
- El arreglo columna de pre-columna activado de carbón y columna de lecho fijo con Q-OFH exhibe una significativa mejora en la capacidad de remoción de As desde las aguas de la laguna de Papallacta. La pre-columna con carbón activado retiene de materia orgánica natural que compite por los sitios de sorción con el arsénico, forma complejos con el As(III) e impide la captura de arsénico.
- El volumen de agua tratada en la planta piloto (12500 L) en su primer ciclo de operación es bastante halagador, considerando que la concentración de As en el agua fue superior a 190 µg/L. La eficiencia de tratamiento podría mejorarse si se modifica ligeramente el procedimiento de carga de los átomos de Fe(III) en las esferas de quitosano y si se controla la salida y posterior deterioro del Q-OFH.
- La regeneración del Q-OFH empacado en el filtro de la planta prototipo es moderada con el paso de solo 10 volúmenes de sosa cáustica.
- La dificultad de inmovilizar y almacenar las especies arsenicales disueltas en la sosa cáustica luego de la regeneración es el principal inconveniente que presentan las esferas de Q-OFH.

## RECOMENDACIONES

- Investigar otros procedimientos para la impregnación de los óxidos de Fe(III) en las esferas de quitosano a fin de obtener la misma o mayor cantidad de óxidos dentro del quitosano en menos ciclos de carga.
- Realizar más pruebas con la planta prototipo para conocer la potencialidad de aplicarse en el tratamiento de agua contaminada con As en pequeños caseríos.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su gratitud al Consejo Nacional de Educación Superior (CONESUP) y a la Escuela Politécnica del Ejército (ESPE) por financiar la presente investigación. Al Cuerpo de Ingenieros del Ejército por proveernos de un tanquero para el transporte del agua contaminada con arsénico desde la vertiente de la laguna de Papallacta. Al señor Alexis Sánchez por su colaboración en la instalación de la planta prototipo.

## REFERENCIAS

1. Meharg, A.A., Mazibur, M.D. (2003), "Arsenic contamination of Bangladesh paddy field soils: implications for rice contribution to arsenic consumption". *Environ Sci Technol.* **37**, 29-34.

2. Roychowdhury T, Uchino T, Tokunaga H, Ando M. (2002), "Survey of arsenic in food composites from an arsenic-affected area of West Bengal, India". *Food Chem Toxicol.* **40**, 1611—21.
3. Dhar R. Kr., Biswas B. Kr., Samanta G., Mandal B. Kr., Chakraborti D., Roy S., Jafar A., Islam A., Ara G., Kabir S., Khan A. W., Ahmed S. A., Hadi, S. A. (1997), "Groundwater arsenic calamity in Bangladesh". *Curr. Sci.* **73**, 48--59.
4. Chakraborti D., Rahman M. M., Paul K., Chowdhury U. K., Sengupta M. K., Lodh D., Chanda C. R., Saha K. C., Mukherjee S. C., (2002), "Arsenic calamity in the Indian subcontinent. What lessons have been learned?", *Talanta.* **58**, 3--22.
5. Smith A. H., Goycolea M., Haque R., Biggs M. L., (1998), "Marked increase in bladder and lung cancer mortality in a region of Northern Chile due to arsenic in drinking water". *Am. J. Epidemiol.* **147**, 660—669.
6. Das D., Chatterjee A., Samanta G., Mandal B., Chowdhury T. R., Samanta G., Chowdhury P. P., Chanda, C., Basu, G., Lodh D., Nandi S., Chakraborty T., Mandal S., Bhattacharya S. M., Chakraborti D., (1994), "Arsenic contamination in groundwater in six districts of West Bengal, India: The biggest arsenic calamity in the world". *Analyst.* **119**, 168N-170N.
7. Cebrian M. E., Albores A., Garcia-Vargas G., Del Razo L. M., Ostrosky-Wegman P., (1994) *Arsenic in the Environment. Part II: Human Health and Ecosystem Effects*, Nriagu, J. O., Ed. (John Wiley & Sons: NY), *Chronic arsenic poisoning in humans: The case of Mexico*, pp. 93107.
8. Armienta M. A., Rodriguez R., Aguayo A., Cenicerros N., Villaseñor G., Cruz O. (1997), "Arsenic contamination of groundwater at Zimapan, Mexico". *Hydrogeol. J.*, **5**, 39--46.
9. Brown, K. G.; Chen, C.-J., (1995), "Significance of exposure assessment to analysis of cancer risk from inorganic arsenic in drinking water in Taiwan". *Risk Anal.* **15**, 475—484.
10. Berg M., Tran H. C., Nguyen T. C., Pham H. V., Schertenleib R., Giger W. (2001), "Arsenic contamination of groundwater and drinking water in Vietnam: A human health threat". *Environ. Sci. Technol.* **35**, 2621-626.
11. Frederick P., Kenneth B., Chien-Jen C., (1994), "Health implications of arsenic in drinking water", *Journal AWWA*, **86**, 9, 52--63.
12. Laxen, D. P. H. (1983), "Adsorption of lead, cadmium, copper, and nickel onto hydrous iron oxides under realistic conditions", *Heavy Met. Environ., Int. Conf.*, 4th, 2, 1082-5.
13. Slavek, J. and Pickering, W. F. (1986), "Extraction of metal ions sorbed on hydrous oxides of iron(III)", *Water, Air, and Soil Pollution*, **28**(1-2), 151-62.
14. Music, S.; Ristic, M., (1992), "Adsorption of zinc(II) on hydrous iron oxides", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **162**, 2, 351-62.
15. Pierce, M. L. and Moore, C. B., (1982), "Adsorption of Arsenite and Arsenate on Amorphous Iron Oxide", *Water Research*, **16**, 1247-1253.
16. Manning, B.A.; Fendorf, S.E.; and Goldberg, S., (1998), "Surface Structures and Stability of Arsenic(III) on Goethite: Spectroscopic Evidence for Inner-Sphere Complexes", *Environ. Sci. Technol.*, **32**, 16, 2383-2388.
17. Matheson, L. J.; Tratnyek, P. G. (1994) "Reductive Dehalogenation of Chlorinated Methanes by Iron Oxides", *Environ. Sci. Technol.*, **28**, 2045-2053.
18. Wang, C. G. and Zhang, W., (1997), "Synthesizing Nanoscale Iron Particles for Rapid and Complete Dechlorination of TCE and PCBs", *Environ. Sci. Technol.*, **31**, 7, 2154-2156.

19. Ratnaïke R.N., (2003), "Acute and chronic arsenic toxicity". *Postgrad. Med. J.* 79, 391—96.
20. Cumbal, L. & SenGupta, A. K., (2005), "Preparation and Characterization of Magnetically Active Dual-Zone Sorbent", *Industrial Engineering and Chemistry Research*, **44**, 3, 600-605.
21. Benjamin, M. M., Sletten, R. S., Bailey, R. P., Bennett, T., (1996), "Sorption and Filtration of Metals Using Iron-Oxide Coated Sand", *Water Research*, **30**, 11, 2609--2620.
22. Zouboulis, A. I. and Katsoyiannis, I. A., (2002), "Arsenic Removal Using Iron Oxide Loaded Alginate Beads", *Ind. Eng. Chem. Res.*, **41**, 6149-6155.
23. Min, J. H. and Hering, J. G., (1998), "Arsenate Sorption by Fe(III)-Doped Alginate Gels", *Water Research*, **32**, 5, 544-1552.
24. De la Torre, E.; Iordanov, P.; Muñoz, G. A., (2005), "Desarrollo, Síntesis y Caracterización de Carbón Activado con Propiedades de Intercambio Iónico", *Revista. Ciencia, Centro de Investigaciones Científicas, Escuela Politécnica del Ejército*, **8**, (1), 39—46, Quito.
25. Cumbal, L., (2004), *Polymer-Supported Hydrated Fe Oxide (HFO) Nanoparticles: Characterization and Environmental Applications*. Ph. D. Thesis, Lehigh University, Bethlehem, PA.
26. Niu, C. H., Volesky, B., Cleiman, D., (2007), "Biosorption of As(V) with acid-washed crab shells", *Water Research*, **41**, 2473-2478.
27. Roberts, G.A.F., (1992b), "Chitin Chemistry. Macmillan", London, UK, pp. 1—58.
28. Redman, A., Macalady, D., Attmann, D., (2002), *Natural Organic Matter affects Arsenic Speciation and sorption onto Hematite*, (Environmental Science Technology Publisher).
29. Toles, C. A., Marshall, W. E., Johns, M. M., (1997), "Granular activated carbons from nutshells for the uptake of metals and organic compounds", *Carbon*, **35**, 9, 1407-1414.
30. Helfferich, F., (1963) *Ion Exchange*, McGraw-Hill Co., New York.

# DESARROLLO TECNOLÓGICO PARA LA INDUSTRIA PETROQUÍMICA EN EL ECUADOR

Vicente Delgado y Vladimir Aguirre

Centro de Investigaciones Científicas  
Escuela Superior Politécnica del Ejército

## RESUMEN

El desarrollo tecnológico en el área de hidrocarburos, es un reto que están enfrentando los centros de investigación superior. Con la finalidad de dar valor agregado a las reservas significativas de crudo.

En el presente trabajo, se propone el diseño de un equipo piloto de destilación fraccionada, formada por una caldera, columna empacada, unidad de reflujo, separador de muestras y condensador.

La finalidad es separar en función del punto de ebullición, los componentes de la gasolina comercial, para caracterizar los componentes por cromatografía de gases.

Se inicia separando la fracción de éter de petróleo, se analiza sus componentes hexanos, heptanos, octanos, y con esta información se propone aplicaciones para la industria nacional.

## ABSTRACT

The technological development in the area of hydrocarbons is a challenge that has to assume the investigation centers. With the purpose of generating value added to the significant reservations of raw.

Presently work intends the design and factory of a team pilot of fractional distillation, formed by a boiler, packed column, reflux unit, separator of samples and condensed.

The purpose is to separate in function of the point of boil the components of the gasoline to characterize the components for Gas Chromatography.

You proceed to separate the fraction of ether of petroleum and to analyze their components, hexanos, heptanos, and octanos and with this information to propose applications for the national industry.

## 1 INTRODUCCIÓN

El petróleo es producto de los cambios naturales sobre la materia Orgánica, que se ha acumulado debajo de la superficie de la tierra en cantidades increíbles y ha sido descubierta y utilizada para satisfacer nuestras variadas necesidades de combustible.

El Ecuador es poseedor de este recurso y se desea aportar con técnicas que dan valor agregado a este recurso natural.

Partiendo de hidrocarburos livianos como gasolina, diesel y empleando técnicas de refinación (destilación) se ha logrado producir sustancias químicas que satisfacen necesidades industriales, sociales y de investigación para síntesis química.

Es importante refinar estos derivados para desarrollar técnicas de separación físico-química, además proponer un diseño y construir con tecnología nacional el equipo de destilación fraccionada, para caracterizar los componentes químicos de cada una de las

fracciones destiladas mediante la aplicación de cromatografía de gas y proponer aplicaciones de estas fracciones para la industria.

## 2 MATERIA PRIMA

La gasolina es una mezcla de hidrocarburos derivada del petróleo que se emplea como combustible en motores de combustión interna con encendido a chispa. Tiene una densidad de 720 g/L. Un litro de gasolina tiene una energía de 34,78 mega julios aproximadamente. Sin embargo, en términos de masa, la gasolina tiene una energía de 48,31 MJ/Kg. Se obtiene a partir de la **nafta de destilación directa**, que es la fracción líquida más ligera del petróleo (exceptuando los gases). La nafta también se obtiene a partir de la conversión de fracciones pesadas del petróleo (gasoil de vacío) en unidades de proceso denominadas FCC (craqueo catalítico fluidizado) o hidrocráqueo. La gasolina es una mezcla de cientos de hidrocarburos individuales desde C4 (butanos) hasta C11 como, por ejemplo, el metilnaftaleno.

Normalmente se considera nafta a la fracción del petróleo cuyo punto de ebullición se encuentra aproximadamente entre 28 y 177 °C. A su vez, este subproducto se subdivide en nafta ligera (hasta unos 100 °C) y nafta pesada (el resto). La nafta ligera es uno de los componentes de la gasolina, con número de octano en torno a 70. La nafta pesada no tiene la calidad suficiente como para ser utilizada para ese fin, y su destino es la transformación mediante reformado catalítico, proceso químico por el cual se obtiene también hidrógeno, a la vez que se aumenta el octanaje de dicha nafta.

Además de la nafta reformada y la nafta ligera, otros componentes que se usan en la formulación de una gasolina comercial son la nafta de FCC, la nafta ligera isomerizada, la gasolina de pirólisis desbencenizada, butano, butanos, MTBE, ETBE, alquilato y etanol. Las fórmulas de cada refinería suelen ser distintas (incluso perteneciendo a las mismas compañías), en función de las unidades de proceso de que dispongan y según sea verano o invierno. Si no está refinada puede tener hasta 1000 ppm de azufre. Tiene alrededor de un 40% de aromáticos y 20% de olefinas. Sus números de octano (MON/RON) están en torno a 80/93.

## 3 TEORÍA DE DESTILACIÓN

En la mezcla simple de dos líquidos solubles entre sí, la volatilidad de cada uno es perturbada por la presencia del otro. En este caso, el punto de ebullición de una mezcla al 50%, por ejemplo, estaría a mitad de camino entre los puntos de ebullición de las sustancias puras, y el grado de separación producido por una destilación individual dependería solamente de la presión de vapor, o volatilidad de los componentes separados a esa temperatura. Esta sencilla relación fue enunciada por vez primera por el químico francés François Marie Raoult y se llama ley de Raoult. Sólo se aplica a mezclas de líquidos muy similares en su estructura química, como el benceno y el tolueno. En la mayoría de los casos se producen amplias desviaciones de esta ley. Si un componente sólo es ligeramente soluble en el otro, su volatilidad aumenta anormalmente.

### 3.1 Destilación fraccionada

Si se consigue que una parte del destilado vuelva del condensador y gotee por una larga columna apilada, en la que el líquido fluye hacia abajo sobre una pila de anillos o trocitos de tuberías de vidrio se llama destilación fraccionada. La única desventaja de la destilación fraccionada es que gran parte (más o menos la mitad) del destilado condensado debe volver a la parte superior de la torre y eventualmente debe hervirse otra vez, con lo cual hay que suministrar más calor, las columnas empacadas son usadas para destilación.

El contacto líquido – gas en una columna empacada es continua, no por etapas, como en una columna de platos. El flujo de líquido cae hacia abajo en la columna sobre el área de empaque y el gas o vapor asciende en contracorriente, en la columna. En algunas columnas de absorción de gases se usa corrientes en flujo. El comportamiento de una columna empacada

depende mucho del mantenimiento de una buena distribución de líquido y gas a través del lecho empacado y esto es una consideración importante en el diseño de columnas empacadas.

Un diagrama esquemático se indica en la figura 1, en la cual se indican las partes de una columna empacada. Una columna de destilación con empaque será similar a la columna de platos.

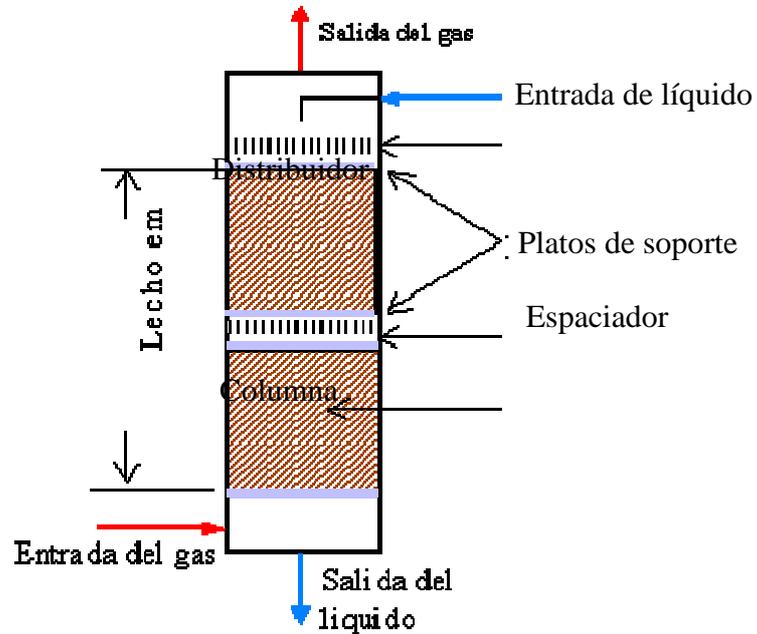


Figura 1 Columna Empacada.

### 3.2 Procedimiento de diseño de columnas empacadas

El diseño de una columna empacada involucra las siguientes etapas:

- Seleccionar el tipo y tamaño de empaque.
- Determinar la altura de la columna para la separación especificada.
- Determinar el diámetro de la columna (capacidad), para manipular los flujos de líquido y vapor.
- Seleccionar y diseñar los dispositivos internos de la columna, soportes de empaque, distribuidos de líquido, redistribuidores.

## 4 FUNDAMENTO TEÓRICO

### 4.1 Tipos de empaque

Los principales requerimientos de los empaques son: que estos deberían proporcionar un área grande y una área interfacial entre el gas y el líquido también grande; Adicionalmente tener una estructura abierta, baja resistencia al flujo de gas, promover una distribución uniforme de líquido sobre la superficie del empaque y Promover un flujo de gas o vapor uniforme a través de la sección transversal de la columna.

Diversos tipos y formas de empaques han sido desarrollados para satisfacer estos requerimientos los cuales generalmente son divididos en tres clases.

#### 4.1.1 Empaques vaciados o al azar

Estas son piezas discretas de empaques de una forma geométrica específica las cuales son vaciadas o colocadas al azar en la columna y es el tipo de empaque que se aplica en el presente estudio.

#### 4.1.2 Empaques estructurados o arreglados

Estos se hacen en capas de malla de alambre u hojas corrugadas. Secciones o partes de estos empaques son colocados dentro de la columna.

#### 4.1.3 Parrillas

Estas también son colocadas sistemáticamente dentro de la columna.

Los empaques al azar son las más comunes en las prácticas comerciales. Los empaques estructurados son menos comerciales, pero su mercado ha crecido rápidamente en la última década. Las aplicaciones de las parrillas están limitadas principalmente a servicios de transferencia de calor y lavado y/o donde se requieran altas resistencias a las incrustaciones.

Aunque las columnas empacadas para absorción y desorción también pueden diseñarse como un proceso por etapas, es usualmente más conveniente usar la forma integrada de las ecuaciones diferenciales establecidas para las velocidades de transferencia de masa en un punto en la columna.

Cuando la concentración de soluto es pequeña, (menor a 10 por ciento), los flujos de gas y líquido serán esencialmente constantes a lo largo de la columna y la altura de empaque requerida,  $Z$ , en términos del coeficiente de transferencia total de la fase gas  $K_G$  y la composición del gas esta dada por:

$$Z = \frac{G_m}{K_G a P} \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{y - y_e} \quad (1)$$

Donde,  $G_m$  es el flujo molar de gas por unidad de área de sección transversal;  $K_G$  es la composición del gas;  $a$  es el área interfacial por unidad de volumen;  $P$  es la presión total;  $y_1$  y  $y_2$  es la fracción molar del soluto en el gas en el fondo y en el tope de la columna respectivamente;  $y_e$  es la concentración del gas en equilibrio con la concentración del líquido en cualquier punto.

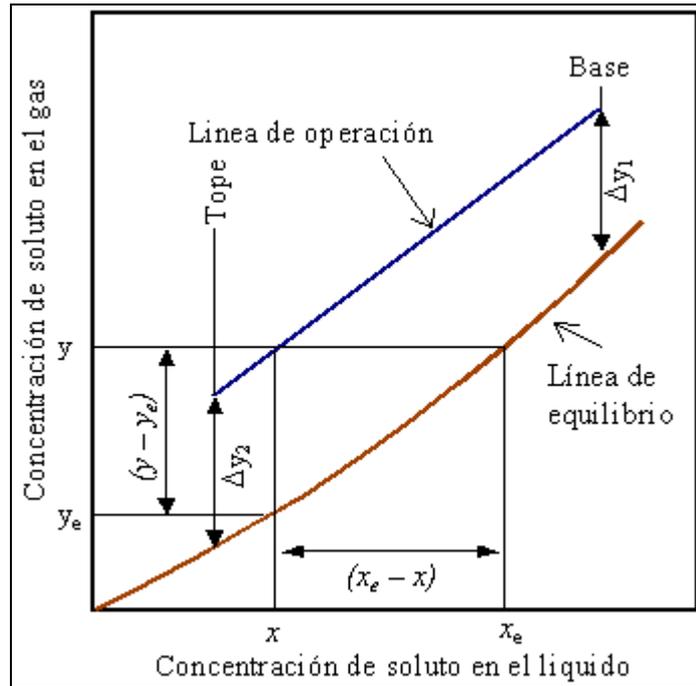
En términos del coeficiente de transferencia total de la fase líquida  $K_L$  y la composición del líquido:

$$Z = \frac{L_m}{K_L a C_t} \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{x_e - x} \quad (2)$$

Siendo,  $L_m$  el Flujo molar de líquido por unidad de área de sección transversal;  $a$  el área interfacial por unidad de volumen;  $C_t$  es la concentración molar total;  $x_1$  y  $x_2$  es la fracción molar del soluto en el líquido en el fondo y en el tope de la columna, respectivamente;  $x_e$  es la concentración del líquido en equilibrio con la concentración del gas en cualquier punto;  $y_e$  es la concentración del gas en equilibrio con la concentración del líquido en cualquier punto.

## 5 TEORIA SOBRE COLUMNAS DE SEPARACIÓN

La relación entre la concentración de equilibrio y la concentración actual se muestra en la Figura 2.



**Figura 2** Relaciones de concentración en absorción de gases.

Para propósitos de diseño, es conveniente escribir las ecuaciones ( 1 ) y ( 2 ) en términos de las "Unidades de Transferencia" ( $HTU$ ); donde el valor de la integral es el número de las unidades de transferencia y el grupo frente al signo de integral, el cual tiene las unidades de longitud, es la altura de una unidad de transferencia.

$$\begin{aligned} Z &= H_{OG} N_{OG} \\ Z &= H_{OL} N_{OL} \end{aligned} \quad (3)$$

Donde  $H_{OG}$  es la altura de una unidad de transferencia de la fase gas.

$$H_{OG} = \frac{G_m}{K_G a P} \quad (4)$$

Siendo  $N_{OG}$  es el número de unidades de transferencia de la fase gas

$$N_{OG} = \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{y - y_e} \quad (5)$$

$H_{OL}$  es la altura de una unidad de transferencia de la fase líquida

$$H_{OL} = \frac{L_m}{K_L a C_t} \quad (6)$$

$N_{OL}$  es el número de unidades de transferencia de la fase líquida

$$N_{OL} = \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{x_e - x} \quad (7)$$

El número de unidades de transferencia de la fase gas es frecuentemente más conveniente expresado en términos de la presión parcial del gas soluto.

$$N_{OG} = \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p - p_e} \quad (8)$$

La relación entre la altura total de una unidad de transferencia y el coeficiente individual de película de las unidades individuales  $H_L$  y  $H_G$ , las cuales se basan en la fuerza impulsora dada por la concentración a través de las películas de gas y de líquido, está dada por:

$$H_{OG} = H_G + m \frac{G_m}{L_m} H_L$$

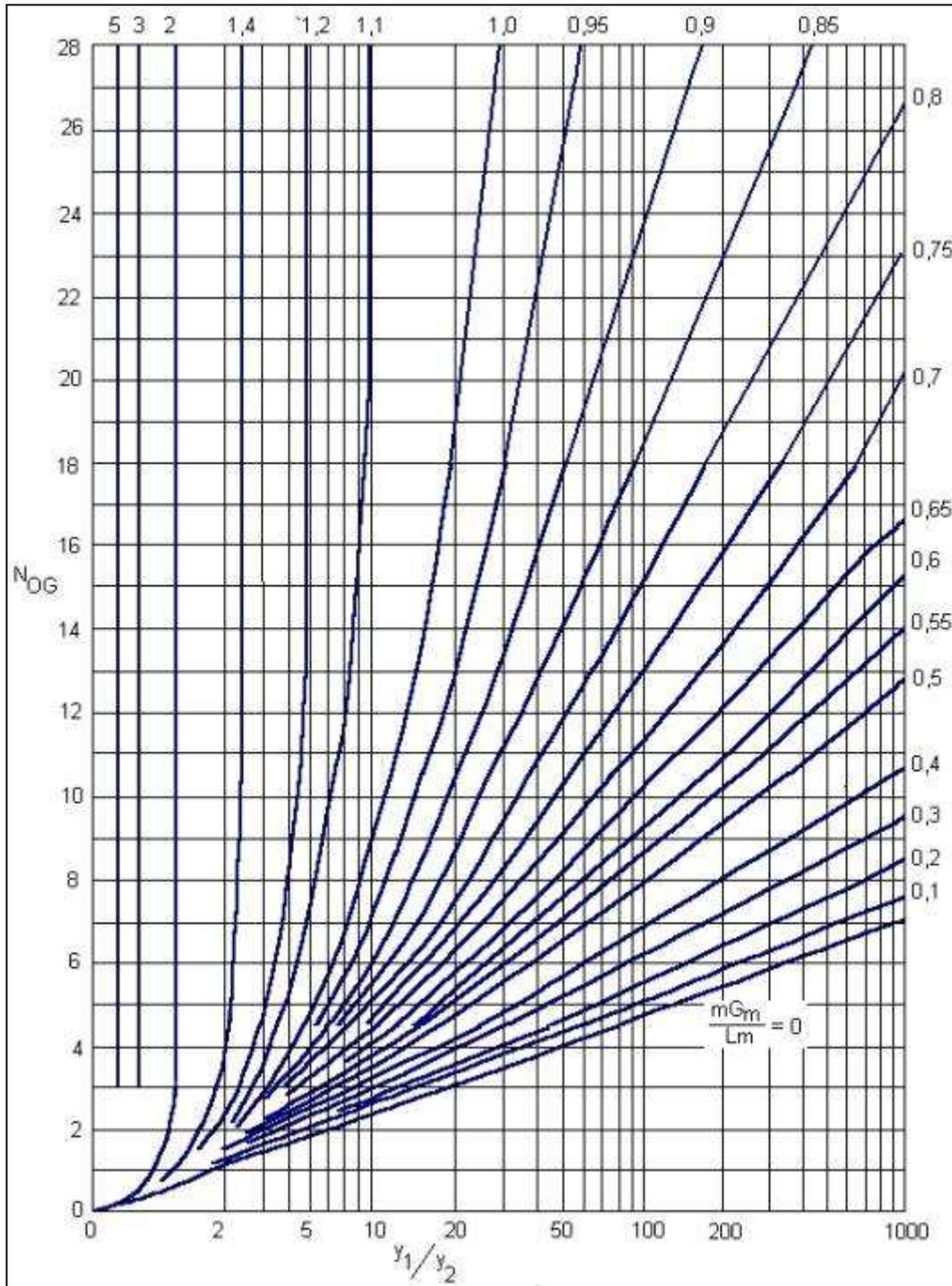
$$H_{OL} = H_L + \frac{L_m}{mG_m} H_G \quad (9)$$

Donde  $m$  es la pendiente de la línea de equilibrio y  $G_m/L_m$  la pendiente de la línea de operación.

El número de unidades de transferencia se obtiene por integración gráfica o numérica de las ecuaciones (5), (7) y (8)

Donde las líneas de operación y equilibrio son rectas, y ellas pueden usualmente ser consideradas así para sistemas diluidos. El número de unidades de transferencia está dado por:

$$N_{OG} = \frac{y_1 - y_2}{\Delta y_{lm}}$$



**Figura 3** Número de unidades de transferencia  $N_{OG}$  como una función de  $y_1/y_2$  con  $mG_m/L_m$  como parámetro.

Donde  $\Delta y_m$  es la media logarítmica de la fuerza impulsora (la concentración), dada por:

$$\Delta y_m = \frac{\Delta y_1 - \Delta y_2}{\ln(\Delta y_1 / \Delta y_2)}$$

$$\Delta y_1 = y_1 - y_{e^*}$$

$$\Delta y_2 = y_2 - y_e$$

Si la curva de equilibrio y las líneas de operación pueden tomarse como líneas rectas y la alimentación de solvente es esencialmente libre de soluto, el número de unidades de transferencia es dado por:

$$N_{OG} = \frac{1}{1 - (mG_m / L_m)} \ln \left[ \left( 1 - \frac{mG_m}{L_m} \right) \frac{y_1}{y_2} + \frac{mG_m}{L_m} \right]$$

Esta ecuación es graficada en la figura 3 la cual puede ser usada para hacer un estimado rápido del número de unidades de transferencia requerido para una separación dada.

De la figura. 3 se puede ver que el número requerido de etapas para una separación dada es muy dependiente de la velocidad de flujo  $L_m$ . Si la velocidad de solvente no se fija por otras consideraciones del proceso, la figura 3 se puede usar para hacer estimados rápidos de la altura de la columna para diferentes velocidades de flujo para encontrar el valor más económico. Coldburn (1939) sugirió que el valor óptimo del término  $mG_m/L_m$  debe estar entre 0.7 y 0.8.

### 5.1 Predicción de la altura de una unidad de transferencia

No hay un método enteramente satisfactorio para predecir la altura de una unidad de transferencia. En la práctica el valor para un empaque particular dependerá no solamente de las propiedades físicas y velocidades de flujo del gas y líquido, sino también de la uniformidad de la distribución de líquido a través de la columna, la cual depende de la altura de la columna y del diámetro. Esto hace dificultoso extrapolar datos obtenidos a partir de pequeñas columnas de laboratorio y de plantas piloto a tamaños de columnas industriales. Siempre que sea posible los estimados deben basarse en valores actuales obtenidos a partir de columnas en operación de similar tamaño a la que se está diseñando. Valores experimentales para varios sistemas son dados por Eckert (1963) y Connel *et al.* (1960). Valores para el término  $K_G$  a partir de los cuales se puede estimar la altura de la fase gas  $H_{OG}$ , se pueden encontrar en diferentes publicaciones; Eckert (1975), Norman (1961), Perry y Green (1980). El término  $K_G a$  es normalmente usado cuando se reportan datos experimentales de los coeficientes de transferencia de masa para empaques, así el área interfacial efectiva para la transferencia de masa será menor que el área superficial actual del empaque.

Muchas correlaciones se han publicado para predecir la altura de una unidad de transferencia, y los coeficientes de transferencia de masa. El método aplicado en este estudio es fiable para trabajos preliminares de diseño con un adecuado factor de seguridad.

**Tabla 1** Valores típicos de la  $HTU$  para empaques al azar

Empaque	HTU (UNIDADES DE TRANSFERENCIA)
25 mm	0,3 a 0,6 m
38 mm	0,5 a 0,75 m
50 mm	0,6 a 1,0 m

## 5.2 Experimental

El primer paso efectuado en el laboratorio es la destilación simple. En este proceso se aprovecha que cada compuesto tiene una temperatura característica de ebullición. En el laboratorio basta una manta calefactora, un matraz y un refrigerante para separar la mezcla por destilación. Sin embargo, en la industria se requieren enormes equipos que se denominan torres de destilación.

El equipo de una destilación simple se presenta en la figura 4 y de una torre de destilación primaria se muestra en la figura 5, Para el diseño de una torre de destilación es un reto clásico estimar ¿Qué diámetro proponer para la columna? ¿Cuántos platos de contacto líquido-vapor hacen falta o emplear rellenos y que tipo de relleno? ¿En qué lugar de la columna se alimenta con el hidrocarburo? ¿A qué temperatura debe introducirse? ¿Cuánto alimentar al rehervidor?



**Figura 4** Destilación simple de gasolina

**Tabla 2** Temperatura de ebullición de hidrocarburos

Nombre	Intervalo de temperatura de ebullición (°C)	Número de carbonos	Uso
Éter de petróleo	20 - 80	5 a 7	disolvente
Gasolina	35 - 220	5 a 12	combustible de autos
Querosín	200 - 315	12 a 16	combustible de aviones

La temperatura cambia a lo largo de la columna. En la parte superior se tiene la más baja temperatura, donde se encuentran en equilibrio los componentes más ligeros (y de menor punto de ebullición). Por el contrario, en la parte inferior la temperatura es mucho más alta y es también la proporción de los componentes pesados y menos volátiles.

Como se colectan diversas fracciones de la columna de destilación, la gasolina logra separarse en varias componente, cada una con un diferente intervalo de temperaturas de ebullición e hidrocarburos de diferente número de carbonos en su cadena (véase la tabla 2).



**Figura 5** Columna de destilación fraccionada experimental.

La mayor parte de la gasolina que se destilan directamente de los crudos son  $n$  parafinas en forma predominante, estos materiales tienen propiedades antidetonantes como ejemplo tenemos al Hexano alrededor de 2%,  $n$  Heptano.

La *volatilidad* se estudia de acuerdo a la curva de destilación ASTM. La volatilidad de una gasolina se define como la tendencia a pasar a fase vapor en unas condiciones determinadas. Para una gasolina concreta nos interesa conocer el IBP (PIE): punto inicial de ebullición y el PFE: punto final de ebullición, punto en el que se recoge:

- 10% destilado
- 20% destilado
- 50% destilado
- % total de residuo
- % total pérdidas

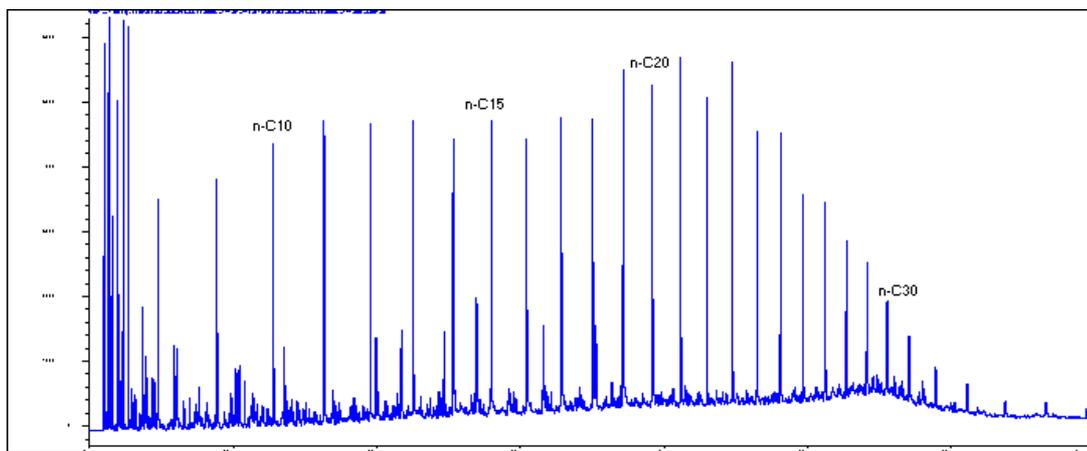
En el BOE, para la gasolina 97 nos interesa, además, conocer los siguientes datos:

- % recodido a 70°C
- % recogido a 100°C
- % recogido a 180 °C

Como una regla general para empaques de cerámica puede tomarse como el 25 por ciento del peso del empaque.

Experimentalmente se desarrollan someramente las características de la cromatografía gaseosa, enfocada hacia el análisis de las mezclas de hidrocarburos. Por otra parte, se menciona que el análisis cromatográfico de una mezcla gaseosa proporciona los datos necesarios para calcular, con razonable exactitud, casi todos los parámetros de interés de dicha mezcla. Esto es así gracias a dos factores concurrentes:

- El cromatograma de una mezcla de gases proporciona la composición individual de todos los componentes mayoritarios de la mezcla.
- Las propiedades de los gases son básicamente aditivas. En otras palabras, las propiedades de la mezcla son calculables a partir de las propiedades de los componentes individuales. La composición compleja de los componentes puede apreciarse en la figura 6.



**Figura 6** Cromatograma de hidrocarburos

El cromatograma fue obtenido mediante una columna de alta resolución (columna capilar) y un detector FID, que sólo es sensible a los hidrocarburos de la mezcla.

- La serie de parafinas normales (los picos más altos y casi equi-espaciados en el cromatograma, es perfectamente identificable.
- Existe un “fondo” importante de componentes no resueltos (separados en forma incompleta) correspondientes a compuestos ramificados, aromáticos, cíclicos, etc. Sin embargo, pese a la complejidad aparente de este cromatograma, el reporte de laboratorio que acompaña los estudios PVT suele adoptar la siguiente forma.

<b>Tabla 3</b> Porcentaje molar	
<b>Componente</b>	<b>[% Molar]</b>
i-Pentano	1.463
n-Pentano	2.697
Hexanos	5.037
Heptanos	7.569

Octanos	8.689
Nonanos	7.171
Decanos	6.589
Undecanos	5.327
Dodecanos	4.359
Tridecanos	4.403
Tetradecanos	3.621
Pentadecanos	2.830
Hexadecanos	2.472
Heptadecanos	2.434
Octadecanos	2.121
Nonadecanos	1.903
Eicosanos y sup.	27.216

Esta información, que aparece en la tabla 3 que indica los porcentajes molares de hidrocarburos, es la que se emplea como datos de entrada en los estudios de simulación de termodinámica.

## 6 CONCLUSIONES

- En el presente artículo se presenta el diseño de una columna de fraccionamiento a la escala piloto.
- Se estima que la composición de la muestra que es una mezcla líquida de hidrocarburos no se mide en forma directa, sino que es el resultado de una serie de mediciones, cálculos y simplificaciones que conducen a los valores.
- La caracterización de las diferentes fracciones "livianas" se obtendrá mediante cromatografía de alta resolución.
- Las propiedades de la fracción "pesada" se obtendrá por una vía independiente (preferentemente mediante una destilación fraccionada).
- La altura de la columna de 80 cm. se calculo para que la relación óptimo se encuentre entre  $mG_m/L_m = 0,6$  a  $0,8$ .
- Como una guía general, la altura máxima del lecho no deberá exceder a 3 tantos el diámetro de la columna para anillos Rasching, y 8 a 10 para anillos Pall y monturas Intalox y se esta ensayando para empaques vaciados al azar entre 13cm y 40 cm. Para un diámetro de la columna de 4.5 cm.
- Es de notar que existen numerosas herramientas de control que permiten establecer la confiabilidad de la composición obtenida como densidad, índice de refracción, punto de ebullición, viscosidad.
- Es necesario un estimado de la cantidad de liquido retenido en el empaque y esta fue ensayada experimentalmente cuya resultado de retención es de 15 ml para una altura de 40 cm. de empaque.

- La destilación se basa en la transferencia de masa entre las fases líquido - vapor de una mezcla de hidrocarburos. Cuya relación se monitorea mediante la medición del flujo de la materia prima y del destilado.
- La destilación permite la separación de los componentes de una mezcla de hidrocarburos, como es la gasolina, en función de sus temperaturas de ebullición.
- Para que se produzca la “separación o fraccionamiento” de los cortes, se debe alcanzar el equilibrio entre las fases líquido-vapor, ya que de esta manera los componentes más livianos o de menor peso molecular se concentran en la fase vapor y por el contrario los de mayor peso molecular predominan en la fase líquida, en definitiva se aprovecha las diferencias de volatilidad de los hidrocarburos.
- El equilibrio líquido-vapor, depende principalmente de los parámetros termodinámicos, presión y temperatura del sistema. Las unidades se diseñan para que se produzcan estos equilibrios en forma controlada y durante el tiempo necesario para obtener las fracciones especificadas.
- Básicamente el proceso consiste en vaporizar los hidrocarburos de la gasolina y luego condensarlos en cortes definidos. Modificando fundamentalmente la temperatura, a lo largo de la columna fraccionadora.
- La fase líquida se logra con reflujos o reciclo de hidrocarburos retornados a la torre. Estos reflujos son corrientes líquidas de hidrocarburos que se enfrían por intercambio con crudo o fluidos refrigerantes. La función u objetivo principal de estos, es eliminar o disipar en forma controlada la energía cedida a los hidrocarburos en la caldera, de esta manera se enfría y condensa la carga vaporizada, en cortes o fracciones de hidrocarburos específicas, obteniéndose las fracciones correspondientes.
- En la presente investigación se emplea como materia prima gasolina extra de libre venta.
- Un equivalente barato de la torre de burbujeo es la llamada columna apilada, en la que el líquido fluye hacia abajo sobre una pila de empaque de vidrio.
- La única desventaja de la destilación fraccionada es que gran parte (más o menos la mitad) del destilado condensado debe volver a la parte superior de la torre y eventualmente debe hervirse otra vez, con lo cual hay que suministrar más calor. Por otra parte, el funcionamiento continuo permite grandes ahorros de calor, ya que el destilado que sale puede ser utilizado para precalentar el material que entra.

## REFERENCIAS

Encarta (2007), *Deshidrogenación* [DVD]. Microsoft Corporation.

Manual del Ingeniero Químico, 6ta. Ed., McGraw-Hill, 1980

Wuithier, Pierre, ( 1981), “El petróleo, refinación y tratamiento químico”, Ed.Cepsa S.A., Madrid.

Mukhlyonov, J.P., (1982), “A practical course in Chemical Technology”, Ed. Mir, Moscu.

Nelson, W.L: (1969), “Petroleum refinery Engineering”, Ed. Mc.Graw Hill, New York.

Chauvel, A.; Lefebvre, G.; Raimbault, C., (1980), “Production olefins et d aromatiques le vapocraquage et les BTX”, Ed Technip, Paris.

Kern, Donald, (1976), “Procesos de transferencia de calor”, Ed. CECSA; Mexico.

Maxwell, J.B., (1965), "Data book on hydrocarbons", Standard Development company, 8 New Jersey.

Perry, R, Chilton, J.; Kikpatrick, S.; "Chemical Engineers handbook", Ed. Mac Graw-Hill 4 New York

Pavlov, K.F.; Romankov, P.; Noskov, A., (1981), "Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química", Ed. MIR, Moscu.

Mac Cabe, Smith, (1981), "Operaciones básicas de Ingeniería Química":Ed. Mac Graw-Hill. Barcelona.

Ocon, Tojo, (1981), "Problemas de Ingeniería Química", Ed. Aguilar, Madrid.

Himmelblau, D., (1981), "Basic principles and calculations in Chemical Engineering", Ed. Prentice-Hall. 3-edición, New York.

Izurieta, H.; Aguilar, H. (1985), "Manual de transferencia de calor", EPN, Quito.

Chemical Engineering, "Desbook: Calculation, Ed. Mac Graw-Hill, New York, 1989

Chromalox, (1989), "Catálogo de productos de calentamiento y problemas de control", USA.

Cecchetti, (1970), Hydrocarbon Process., 42(9), 159 (1963), o por un procedimiento de corrección simultánea propuesto en Goldstein y Stanfield (Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 9, 78) y Hess (Hydrocarbon Process., 56(5), 241 (1977)).

Cecchetti (1963), Hydrocarbon Process. 42(9), 159.

Goldstein y Stanfield, (1970), Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 9, 78.

Hess (1977). Hydrocarbon Process., 56(5), 241.

Nelson, (1958), Petroleum Refinery Engineering, 4 ed. McGraw-Hill, New York.

Edmister W., (1961), Applied Hydrocarbon Thermodynamics, vol. 1, 1<sup>st</sup> ed., Gulf Publishing Company, Houston, Texas.

Bayley, R y Coates, (1948), J. Petroleum Refiner. Octubre, 547-553.

Hengstebeck, J. (1946), American Institute of Chemical Engineers. 42, 309-329.

Jenny F. y Cicalesse M. (1945), Industrial and Engineering Chemistry. Octubre, 956-959.

Jenny J., (1939), . American Institute of Chemical Engineers. 35, 635-677.

## CARACTERIZACIÓN ESPACIAL DE HÁBITATS EN UN PAISAJE FRAGMENTADO DE SANTO DOMINGO DE LOS TSÁCHILA

Jaime Villacís, Diego Cortez, Jorge Zurita, Marco Luna, Carlos Chiriboga.

Departamento de Ciencias de la Vida  
Escuela Superior Politécnica del Ejército

### RESUMEN

El objetivo general de este estudio fue generar información que ayude a enriquecer el conocimiento sobre la estructura y composición de paisajes fragmentados y conocer como los ecosistemas forestales contribuyen a la conservación de la diversidad arbórea de la zona. Para esto se utilizó una fotografía aérea, la cual se la digitalizó a escala de 1:5000 en ambiente SIG y se utilizó la guía de fotointerpretación propuesta por el proyecto FRAGMENT.

La composición y la configuración espacial de los hábitats en el paisaje, se determinó cuantificando la cantidad de parches correspondiente a cada clase o categoría de hábitat. Para la caracterización arbórea de los hábitats en el paisaje, se seleccionaron dos hábitats (bosque secundario y bosque ripario) y se establecieron 8 parcelas de muestreo por cada hábitat.

La información se analizó con estadística descriptiva, ANDEVAS y pruebas de comparación de medias de Duncan (5%). Se determinó el uso del suelo en 23275,4497 ha y se identificaron 9 hábitats diferentes. El hábitat potrero con árboles ocupó el 40,70% del área de estudio, seguido de cultivos de ciclo corto y cultivos perennes que alcanzaron el 14,58% y 25,20% respectivamente. Se encontraron 60 especies de árboles en los dos hábitats inventariados (en el bosque ripario 40 especies y en el bosque secundario 43 especies).

Se encontraron 27 familias botánicas diferentes; la familia Fabaceae – Mim fue la más representativa ya que agrupó al 17,32% de las especies Inventariadas, mientras que el 11,29% del total de especies inventariadas se agruparon en 15 familias. El 16,19% de los árboles inventariados corresponden a “Pechuga de gallina” (*Aegiphila alba*), seguido por “Pachaco” (*Schizolobium parahyba*) que agrupó al 9,22% del total de especies.

De acuerdo a los resultados del Índice de Valor de Importancia (IVI%) se observó que las especies con mayor valor fueron: *Aegiphila alba* con 12,062% y *Pouteria capacifolia* con 11,342%. El bosque secundario presentó similar abundancia, riqueza y diversidad que el bosque ripario, lo que implica que se pueden establecer estrategias de conservación similares en estos dos tipos de hábitats para contrarrestar los efectos de la fragmentación del paisaje sobre la biodiversidad.



## 1 INTRODUCCIÓN

En paisajes fragmentados es común encontrar remanentes de bosques primarios inmersos en una matriz dominada por áreas agrícolas y ganaderas, donde se pueden encontrar diferentes tipos de cobertura arbórea tales como bosques riparios, vegetación secundaria de distintas fases de sucesión, árboles aislados, y árboles en línea (Kleinn 2000). Ésta cobertura arbórea puede ser de suma importancia para la conservación de la biodiversidad, en primera instancia por que forma parte de ella y además por que puede proveer de hábitats y recursos indispensables para la sobrevivencia de los organismos en áreas abiertas (Galindo- González *et al.* 2000, Morales y Klein 2001).

En años recientes ha aumentado el interés por conocer la biodiversidad en áreas influenciadas por actividades agrícolas y ganaderas, con el fin de recomendar actividades de manejo para la conservación (Villacís 2003). Por otro lado, conocer la riqueza diversidad y composición de árboles en áreas abiertas, es vital para la conservación de biodiversidad puesto que se ha demostrado su rol para la sobrevivencia de especies en lugares donde la intervención humana es frecuente (Guevara *et al* 1998). Poco se conoce aun sobre la distribución, composición y estructura de los diferentes hábitats que conforman los paisajes fragmentados tropicales y sobre la diversidad arbórea que se puede encontrar en estos lugares. Conocer la composición y estructura del paisaje es importante para la conservación pues es una herramienta que permite entender a escalas mayores los distintos problemas ambientales relacionados con los organismos y documentar dicha información para estudios posteriores (Guariguata y Kattan 2002).

La zona de Santo Domingo de los Tsáchilas está dotada de una alta biodiversidad, en una variedad de ecosistemas que se extienden en una zona con un alto índice de especies endémicas, considerada por científicos ambientales como laboratorio para la investigación genética mundial. Por su ubicación geográfica, tiene un comercio muy rico ya que se ha convertido en un puerto terrestre de intercambio entre Sierra y Costa. La actividad más importante es la ganadería, pues es aquí en donde se desarrolla el mayor mercado ganadero del país. El propósito de este estudio fue generar información que ayude a enriquecer el conocimiento sobre la estructura y composición de paisajes fragmentados y conocer como los ecosistemas forestales contribuyen a la conservación de la diversidad arbórea de la zona de Santo Domingo de los Tsáchilas.

## 2 METODOS

El presente estudio se realizó en un área de 23275 ha. El área de estudio se encuentra en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, Región Litoral, latitud 00°24'5" S y longitud 79°16'36" W. La zona se ubica a 300 m de altitud con una precipitación media anual de 3045,1 mm. La humedad relativa promedio es del 85.8 % y la temperatura promedio es de 24,2 °C con poca variación durante el día (INIAP 2004).

Se caracterizó el paisaje en términos de la composición y estructura (área y distribución) de los diferentes hábitats (o usos del suelo) presentes en la zona. La fotografía aérea se digitalizó a escala de 1:5000 en ambiente SIG (archivo tipo .*dwg*) y se utilizó la "guía de fotointerpretación" propuesta por el proyecto FRAGMENT (Morales y Kleinn 2001) para interpretar la fotografía y determinar los hábitats presentes en la zona. Los hábitats se determinaron recorriendo el área de estudio, donde se observó diferentes sistemas de producción pecuaria y cultivos, por lo cual se definió a consideración personal los siguientes: cultivos de ciclo corto, cultivos perennes, potreros con árboles, potreros sin árboles, plantaciones forestales, bosques riparios, bosques secundarios y zonas pobladas. La definición de los hábitats mencionados, agruparon a todos los diferentes cultivos y formas de producción ganadera de la zona. En cada hábitat se tomó puntos de georeferenciación con los GPS, con los cuales se identificó con exactitud en la fotografía aérea los colores que identificaron a cada hábitat. Las medidas utilizadas en el

análisis del paisaje calculados (Kramer 1997, Coppedge *et al.* 2001, Gallego 2002) fueron las siguientes: área total de la clase (ha), proporción en el paisaje (%), número de parches y densidad de parches (#/100 ha).

Para analizar la composición y la configuración espacial (estructura) de los elementos o hábitats en el paisaje, se determinó la cantidad de parches correspondiente a cada clase o categoría de hábitat. Se estimó el área y la proporción de cada uno de los tipos de hábitats, además del número de parches según hábitat y su densidad de parches en el paisaje.

## **2.1 Composición, estructura y diversidad arbórea de diferentes hábitats.**

### **2.1.1 Muestreo**

De los datos suministrados de la fotointerpretación, se elaboró un mapa de uso del suelo o de hábitats que se comprobó en el campo y fue la base para dirigir el proceso de muestreo y establecimiento de las parcelas para la caracterización arbórea de los hábitats en el paisaje. En total se ubicaron y establecieron 16 parcelas de muestreo (8 por cada hábitat) de 100 m x 10 m y 20 x 50 m (0.1 ha) en 2 de los hábitats encontrados donde se visualizó un mayor número de árboles (por razones económicas). Para ubicar estas parcelas, se seleccionaron al azar 16 puntos sobre el mapa de hábitats (8 puntos por tipo de hábitat) y mediante un sistema de posicionamiento global (GPS Garmin) se localizó cada uno de estos puntos en el campo. Este punto se denominó esquina principal y de allí se partió para establecer y orientar la parcela, en sentido norte-sur. En cada una de estas parcelas de 0,1 ha se midieron todos los árboles con un diámetro a la altura del pecho mayor o igual a diez centímetros ( $dap \geq 10$  cm), el DAP, la altura total el arae basal y el volumen total. Todas las especies de árboles fueron identificadas en el campo con la ayuda del Dr. Fernando Hurtado, especialista en botánica taxonómica.

### **2.1.2 Riqueza y diversidad arbórea**

Para cada parcela se calculó el número de individuos, y la riqueza (S), (que se refiere al número de especies total presentes en un área determinada). La diversidad florística se analizó mediante el cálculo de los índices de Shannon, Simpson (Magurran 1988), Berger – Parker, Margaleff, Alpha y Mackintosh.

### **2.1.3 Composición y estructura arbórea**

Se determinó la abundancia, la frecuencia de individuos por especie y frecuencia de especies por familia para cada una de las 8 parcelas de cada hábitat. Se calculó también el índice de valor de importancia (IVI), para determinar las especies más importantes por parcela y para cada uno de los diferentes hábitats analizados. Para comparar la abundancia, diversidad, riqueza y dominancia entre bosque secundario y bosque ripario se realizaron ANDEVAS y pruebas de comparación de medias de Duncan al 5 % (Infostat 2007).

## **3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **3.1 Uso del suelo**

Se determinó 7 diferentes hábitats en la zona de estudio: cultivos de ciclo corto, potreros sin árboles, potreros con árboles, cultivos perennes, bosques, bosques riparios y plantaciones forestales (Cuadro 1).

**Cuadro 1** Descripción de los diferentes tipos de hábitats identificados en Santo Domingo de los Tsáchilas Ecuador, 2008.

<b>2 HABITAT</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Cultivos de ciclo Corto	Áreas caracterizadas por presencia de especies de ciclo de vida inferior a un año. Fácilmente diferenciadas por colores claros más intensos en comparación con las áreas de potreros.
Potreros	Áreas dedicadas exclusivamente a la ganadería, identificados por presentar colores claros.
Potreros con árboles	Áreas dominadas por árboles agrupados en las pasturas. En el área de estudio se identificó gran cantidad de éstas áreas. Muestra colores claros al igual que en áreas de potreros con la diferencia de pequeñas manchas de colores oscuros dispersos en el área.
Cultivo perenne	Áreas caracterizadas por presencia de especies de ciclo largo, es decir superior a los dos años. Identificados por colores oscuros y en la mayoría de los casos alineados sistemáticamente.
Bosque	Áreas donde los árboles son la especie vegetal dominante. Se caracterizaron por la presencia de árboles maduros de diferentes edades, especies y porte variado. Presenta colores oscuros intensos sin ningún tipo de alineación.
Bosque Ripario	Franjas alargadas de bosque secundario, encontradas en arroyos, ríos y esteros.
Plantación Forestal	Áreas de cultivos leñosos especialmente maderables y fácilmente distinguibles debido a que se mostraban alineados sistemáticamente.

El área total de la zona de estudio fue 23275,4497 ha. El 14,57% del área total fue destinada a la siembra de cultivos de ciclo corto (maíz, yuca, malanga), el 25,19% a la siembra de cultivos perennes (cacao, cítricos, palmito, palma africana, banano), el 40,70% a potreros con presencia de árboles, el 10,42% a potreros sin árboles y el 0,07% a plantaciones forestales. En cuanto a bosques primarios y secundarios se destinó un 7,16% del área total y a bosques riparios se destinó el 0,96% (Cuadro 2).

**Cuadro 2** Representación porcentual de cada uno de los hábitats en el paisaje fragmentado de Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador 2008.

<b>Hábitat</b>	<b>Total ha</b>	<b>% del paisaje</b>	<b>N° de parches</b>
Bosque	1668,65	7,17	79
Bosque ripario	224,99	0,97	24
Cultivos de ciclo corto	3392,82	14,58	1632
Potreros con árboles	9474,08	40,70	2331
Potreros sin árboles	2426,90	10,43	436
Cultivos Perennes	5865,34	25,20	847
Plantación Forestal	16,46	0,07	5
Indeterminado	111,20	0,48	8
Poblados	105,32	0,45	3

El hábitat que predominó en la zona fue potrero con árboles con 9474, 07 ha, seguido por cultivos perennes con 5865,33 ha, esto se debe a que en la mayor parte del área de estudio la topografía de la zona dificulta la explotación agrícola, por lo que son tierras aptas para la siembra de pastos y producción ganadera. El hábitat potrero con árboles estuvo formado por 2331 parches, seguido por cultivos de ciclo corto que contó con 1632 parches, los hábitats bosque ripario y bosque secundario estuvieron formados por 24 y 79 parches respectivamente.

Estos resultados son diferentes a los encontrados por Chacón (2003) en Costa Rica, en donde encontró 12 tipos de hábitats en 293 parches: bosque denso, vegetación secundaria joven, bosque ripario, palmito, grupo de árboles en pasturas, plantaciones forestales y frutales, huertos, pastos y suelo desnudo. También difieren de otro estudio realizado en Guanacaste, Costa Rica, en donde se determinaron seis tipos de hábitats que dominaron el paisaje: fragmentos de bosque seco, bosques riparios, charrales, cercas vivas y potreros de alta cobertura de árboles (Cárdenas 2002).

### 3.2 Caracterización del componente arbóreo

Se encontró 60 especies de árboles en los dos hábitats inventariados (en el bosque ripario 40 especies y en el bosque secundario 43 especies). El número total de árboles fue de 531 agrupados en 27 familias botánicas. La altura promedio de los árboles fue de  $14.85 \pm 0.45$  m, el área basal promedio fue de  $0.08 \pm 0.01$  m<sup>2</sup> y el volumen promedio fue de  $0.71 \pm 0.08$  m<sup>3</sup>.

Se agruparon 348 árboles de 10 especies, el 16,19% de los árboles inventariados correspondieron a "Pechuga de gallina" (*Aegiphila alba*), siendo la especie de mayor importancia. Para la especie "Pechuga de gallina" se inventarió 86 individuos, seguido por "Pachaco" con 49 individuos. El 9,22% del total de individuos correspondió a "Pachaco" (*Schizolobium parahyba*) (Cuadro 3). Se encontró 27 familias botánicas diferentes en el inventario realizado. La familia Fabaceae – Mim fue la más representativa ya que agrupó al 17,32% de las especies inventariadas. El 11,29% del total de especies inventariadas se agruparon en 15 familias.

**Cuadro 3** Especies más comunes, nombre vulgar, familia, porcentaje y número de parcelas con la especie.

Nombre vulgar	Especie	Familia	# individuos	%	# parcelas con la especie
Pechuga de gallina	<i>Aegiphila alba</i>	VERBENACEAE	86	16,20	12
Pachaco	<i>Schizolobium parahyba</i>	FABACEAE	49	9,23	4
Chísparo	<i>Pithecellobium exelsum</i>	FABACEAE	48	9,04	4
Inga	<i>Inga marginata</i>	FABACEAE	36	6,78	5
Caucho	<i>Castilla elastica</i>	MORACEAE	33	6,21	12
Vísola	<i>Wettinia quinaria</i>	ARECACEAE	33	6,21	6
Zapotillo	<i>Pouteria capacifolia</i>	SAPOTACEAE	20	3,77	11
Nacedera	<i>Erythrina smithiana</i>	FABACEAE	17	3,20	2
Uva	<i>Pouroma bicolor</i>	CECROPIACEAE	15	2,82	7
Laurel	<i>Cordia alliodora</i>	BORAGINACEAE	11	2,07	4

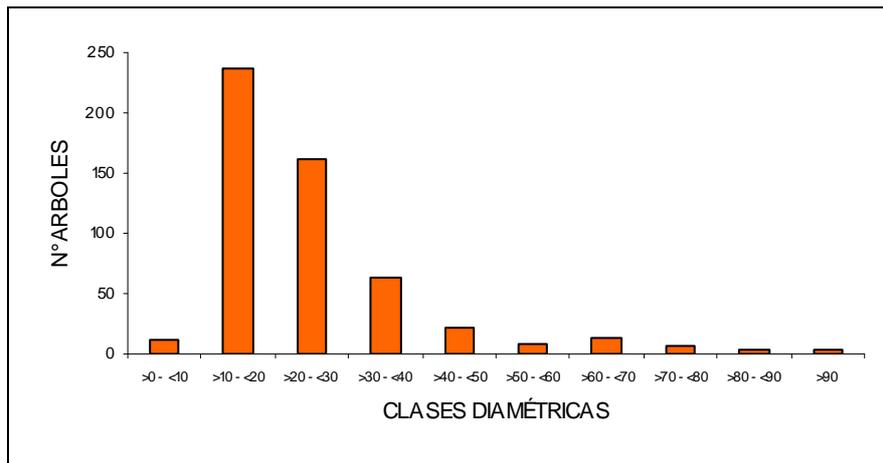
De acuerdo a los resultados del Índice de Valor de Importancia (IVI%) se observó que las especies con mayor valor fueron: *Aegiphila alba* ("Pechuga de gallina") con 12,062% y *Pouteria capacifolia* ("Mamey") con 11,342%. Las dos especies se encontraron distribuidas ampliamente en bosque ripario y bosque secundario. El 66,028% del IVI% correspondió a 10 especies y el 33,97% a 51 especies. El menor porcentaje de IVI% perteneció a las especies *Brownea multijuga* ("Clavelín") y *Grias multinervia* ("Grias") con un IVI% de 0,118% (Cuadro 4).

**Cuadro 4** Abundancia relativa de la especie (A%), dominancia relativa de la especie (D%), frecuencia relativa de la especie e índice de valor de importancia (IVI%) de especies inventariadas más comunes.

Nombre vulgar	A%	D%	F%	IVI %
Pechuga de gallina	16,20	7,99	0,89	25,09
Pachaco	9,23	6,09	0,28	15,59
Chísparo	9,04	10,11	0,27	19,42
Inga	6,78	7,69	0,34	14,81
Caucho	6,21	5,11	0,80	12,13
Vísola	6,21	5,11	0,40	11,72
Mamey	3,77	18,98	0,71	23,46
Nacedero	3,20	1,23	0,13	4,56
Uva	2,82	2,33	0,45	5,61
Laurel	2,07	2,00	0,26	4,33

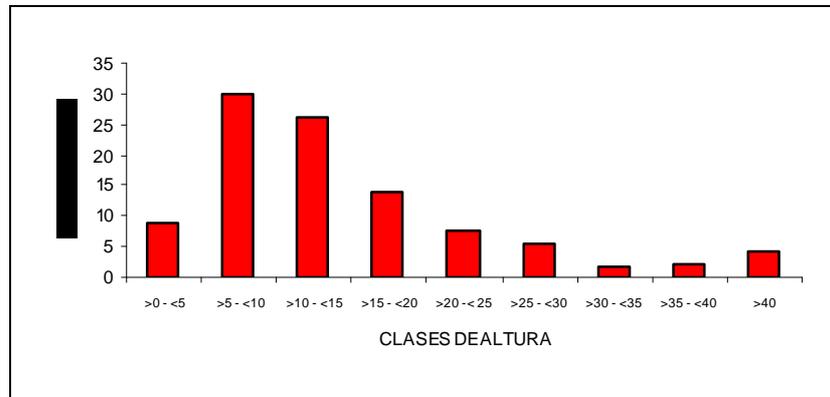
**3.3 Distribución de diámetros a la altura de pecho y alturas en árboles inventariados.**

En las parcelas se encontraron un total de 519 árboles con dap  $\geq$  10 cm. El 44,63% de los árboles inventariados presentaron un dap  $\geq$  10 cm y  $<$  20 cm. Tres árboles presentaron un dap  $\geq$  90 cm que corresponde al 0,56%. El 96,40% de los árboles inventariados tienen dap  $<$  50 cm que corresponde a 496 árboles (Figura 1).



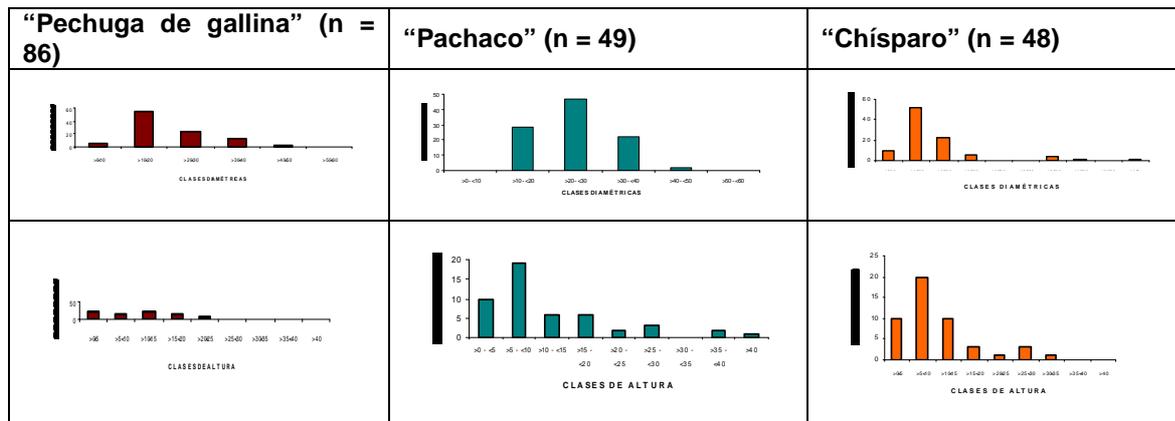
**Figura 1** Distribución de clases diamétricas de árboles presentes en parcelas (n = 531 individuos), Santo Domingo de los Colorados, Ecuador, 2007.

Se determinó que el 29,75% de los árboles inventariados alcanzaron una altura de  $>$ 5 y  $<$ 10 m, seguido por el 26,17% de árboles que alcanzaron una de  $>$ 10 y  $<$ 15m. 23 árboles superaron los 40 m, que representó el 4,33% y el 30,69% de los árboles presentó una altura de  $>$ 15 y  $<$ 40 m (Figura 2).



**Figura 2** Distribución de clases de altura de árboles presentes en parcelas (n = 531 individuos), Santo Domingo de los Colorados, Ecuador, 2007.

De los 531 individuos inventariados las especies más comunes fueron “Pechuga de gallina”, “Chísparo” y “Pachaco”, y ninguna de las tres presentó individuos en todas las clases diamétricas. La “Pechuga de gallina” no presentó individuos con dap > 50 cm, en cambio, “Chísparo” presentó individuos con dap > 100 cm. “Pachaco” presentó el 97,95% de sus individuos con dap >10 y < 40 cm. La especie “Chísparo” no presentó altura > 35 m, en cambio, “Pechuga de gallina” y “Pachaco” presentaron individuos con altura > 40 m (Figura 3).



**Figura 3** Distribución de clases diamétricas y clases de altura en las 3 especies más abundantes en parcelas de bosque secundario y ripario (n = 531 individuos), Santo Domingo de los Colorados, Ecuador, 2007.

La familia STERCULIACEAE presentó el mayor promedio de altura con  $25,96 \pm 10,32$  m. La mayor área basal y volumen presentó la familia SAPOTACEAE con  $0,34 \pm 0,20$  m<sup>2</sup> y  $2,19 \pm 1,10$  m<sup>3</sup> respectivamente. La familia LECYTHIDACEAE obtuvo la menor altura, área basal y volumen con  $8,27 \pm 1,13$  m,  $0,02 \pm 0,00072$  m<sup>2</sup> y  $0,07 \pm 0,01$  m<sup>3</sup> (Cuadro 5).

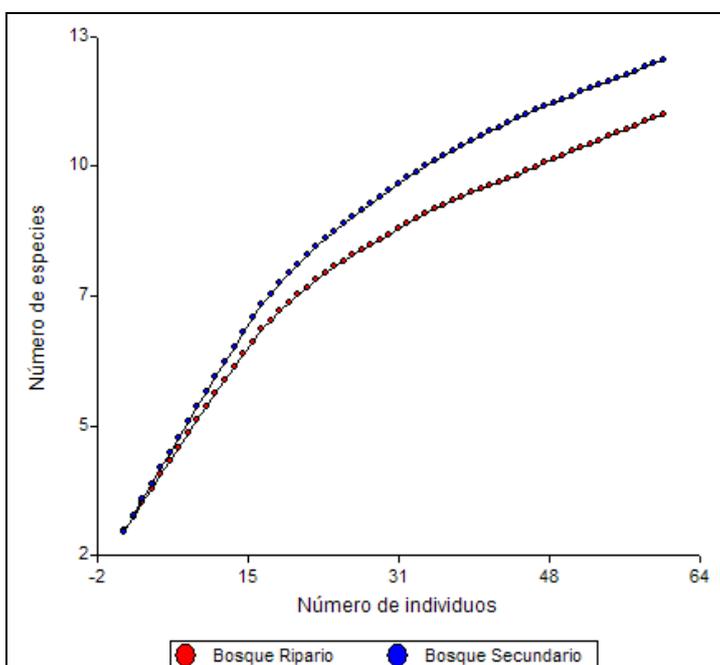
### 3.4 Diferencias entre hábitats

En el bosque secundario se encontraron 282 árboles que corresponden a 43 especies distintas y en el bosque ripario se inventariaron 249 árboles que corresponden a 40 especies, agrupados en 23 familias para los dos casos (Cuadro 5).

**Cuadro 5** Hábitat, número de parcelas, árboles, especies y familias.

Hábitat	Nº de parcelas	Nº total de árboles	Nº total de especies	Nº total de familias
Bosque secundario	8	282	43	23
Bosque ripario	8	249	40	23

No existieron diferencias estadísticas en la riqueza de especies de las árboles presentes en los hábitats, a pesar que la curva de acumulación de especies (Figura 4) sugiere que los bosques secundarios son los más diversos. En cada hábitat existió un aumento progresivo de las especies conforme aumentaban los individuos inventariados.



**Figura 4** Curva de acumulación de especies arbóreas en hábitats en base al número total de árboles inventariados por cada hábitat, Santo Domingo de los Colorados, Ecuador, 2007.

La altura promedio, área basal y volumen fue mayor en el bosque secundario que en el bosque ripario pero no presentaron diferencias significativas (Cuadro 6).

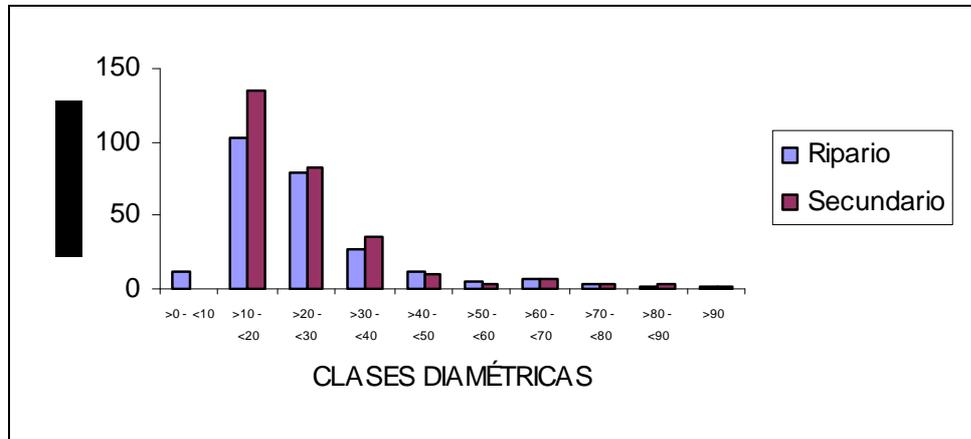
**Cuadro 6** Promedio ( $\pm$ Se) de altura, área basal y volumen de árboles de acuerdo al hábitat. Santo Domingo de los Colorados, Ecuador, 2007

(Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas,  $p < 0,05$ ).

Variable	Bosque ripario	Bosque secundario
Altura total (m)	14,68 $\pm$ 0,57a	15 $\pm$ 0,69 <sup>a</sup>
Área basal (m <sup>2</sup> )	0,07 $\pm$ 0,01a	0,09 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup>
Volumen (m <sup>3</sup> )	0,62 $\pm$ 0,08a	0,78 $\pm$ 0,14 <sup>a</sup>

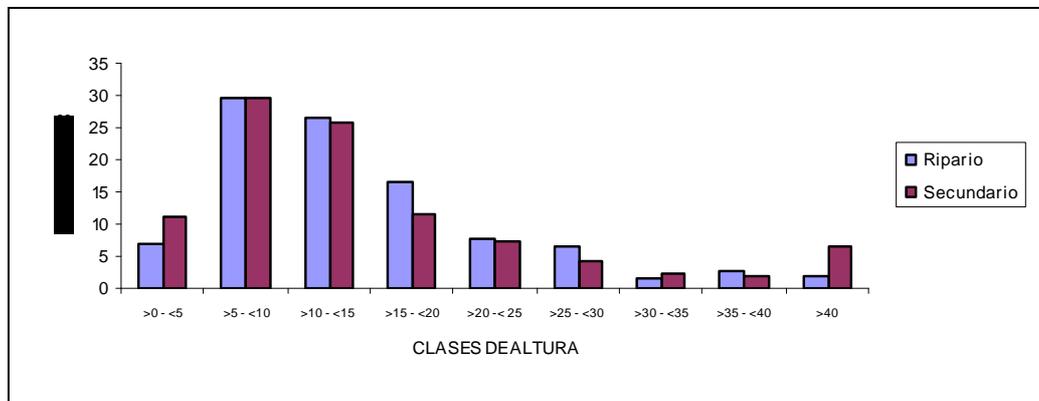
En bosque secundario 134 individuos presentaron un dap >10 y < 20 cm, categoría en la que agrupó el mayor número de árboles. 2 árboles alcanzaron un dap >90 cm, en bosque secundario y 146 árboles presentaron un dap >20 y <90 cm. En bosque ripario 5 árboles presentaron un dap >70 cm, y

115 árboles alcanzaron un dap >0 y < 20 cm. Con un dap >20 y <70 cm, en bosque ripario se inventariaron 129 árboles (Figura 6).



**Figura 6** Distribución de clases diamétricas de árboles presentes en parcelas de bosque secundario y ripario (n = 531 individuos), Santo Domingo de los Colorados, Ecuador, 2007.

En bosque ripario y secundario el 29% de los árboles inventariados tuvieron una altura  $\geq 5$  m y < 10 m. En bosque secundario y ripario el 52,83% y 61,45% de los árboles presentaron una altura  $\geq 10$  m y < 40 m respectivamente. En bosque ripario el 2% de los árboles inventariados tuvieron una altura  $\geq 40$  m; en cambio el 6,38% de los árboles inventariados en bosque secundario tuvieron una altura  $\geq 40$  m (Figura 7).



**Figura 7** Distribución de clases por altura de árboles presentes en parcelas de bosque secundario y ripario (n = 531 individuos), Santo Domingo de los Colorados, Ecuador, 2007.

No se observaron diferencias significativas entre los hábitats para los índices de Shannon ( $p = 0,5825$ ), Berger – Parker ( $p = 0.8979$ ), Simpson ( $p = 0.8757$ ), Margaleff ( $p = 0.6703$ ) y Alpha ( $p = 0.2542$ ). Para Mackintosh ( $p = 0.0453$ ) si se observó diferencia significativa entre los hábitats (Cuadro 7).

Estos resultados son similares a los encontrados en la zona de Río Frío en donde no se reportaron diferencias significativas para los índices de Shannon y Simpson entre bosques densos intervenidos y bosques riparios (Chacón 2003). Sin embargo en otro estudio realizado en guanacaste, se determinó diferencias estadísticas para los índices de Shannon, Simpson y Margaleff, entre los diferentes hábitats, debido a la gran diferencia física existente entre hábitats como cercas vivas y

bosques (Cárdenas 2002) y en otro estudio desarrollado por Correa (2000), en Nicaragua se determinó diferencias estadísticas para el índice de Alpha debido a la diferencia en la intervención del hombre en los hábitats en estudio como en bosque y café con bosque por lo que se pudo encontrar gran diversidad de especies en el bosque, pero en el hábitat café con bosque pocas especies arbóreas se encontraban en combinación con el cultivo de café.

**Cuadro 7** Promedio índices ( $\pm$ Se) de diversidad y abundancia de especies de acuerdo al hábitat. Santo Domingo de los Colorados, Ecuador, 2007  
Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas,  $p < 0,05$ .

Índice	Bosque ripario	Bosque secundario	CV%
Shannon	0,92 $\pm$ 0,11 a	1,00 $\pm$ 0,07 a	30
Berger - Parker	0,38 $\pm$ 0,07 <sup>a</sup>	0,36 $\pm$ 0,07 a	53,59
Simpson	0,23 $\pm$ 0,06 a	0,21 $\pm$ 0,07 a	82,22
Margaleff M	40,77 $\pm$ 1,63 a	39,64 $\pm$ 2,02 a	12,91
Alpha	5,63 $\pm$ 1,36 a	8,98 $\pm$ 2,47 a	77,09
Mackintosh	1,19 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup>	1,15 $\pm$ 0,01 b	2,79

#### 4 CONCLUSIONES

La diversidad de árboles de los bosques secundarios y bosques riparios de la zona de Santo Domingo de los Tzachilas es bastante alta, pero se puede estar perdiendo rápidamente por la extracción de madera.

Existe potencial para manejar los árboles existentes en los hábitats, pero la regeneración de más árboles es muy baja. Por lo que es importante incentivar la protección de árboles en peligro de extinción y tratar de manejar los árboles en las fincas para tener beneficios para la conservación y la producción.

#### 5 IMPLICACIONES

Se debe reconocer la importancia de los árboles en los hábitats de las fincas para integrar estos elementos en los planes de conservación y producción. Se podría aumentar su valor para la conservación: diversificando las especies presentes; aumentando su diversidad estructural y ubicándolas estratégicamente en el paisaje. Los árboles en las fincas deben y pueden ser utilizados tanto para fines productivos como de conservación.

#### REFERENCIAS

1. Bennett, A.F., (1999), *Linkages in the landscape: the role of corridors and connectivity in wildlife conservation*. UICN, Gland, Switzerland and Cambridge. 254 pp.
2. Cárdenas, G., (2002), *Cobertura arbórea y diversidad de aves en un paisaje fragmentado en Cañas, Costa Rica*. Tesis. CATIE. Turrialba, Costa Rica.
3. Chacón, M., (2003), *Caracterización especial de hábitats y determinación de la diversidad arbórea de un paisaje fragmentado*. Tesis. CATIE. Río Frío, Costa Rica.
4. Coppedge B.R., Engle D.M., Fuhlendorf S.D., Masters R.E. & Gregory M.S., (2001) "Landscape cover type and pattern dynamics in fragmented southern Great Plains grasslands, USA". *Landscape Ecology* **16**, 677-690.

5. Correa, A., (2000), *Evaluación de un paisaje fragmentado para la conservación y recuperación de biodiversidad*. Tesis. CATIE. Turrialba, Costa Rica.
6. Galindo-Gonzalez J., Guevara S. and Sosa V.J., (2000), "Bat-and bird-generated seed rains at isolated trees in pastures in tropical rainforest", *Conservation Biology* **14(6)**, 1693-1703.
7. Gallegos, A, E, Ramírez, M, Morarles y E, Hernández., (2002), *Valor de importancia de especies arbóreas en un bosque tropical de Jalisco*. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, México.
8. Guariguata, M.R. y Kattan, G.H. (ed.) (2002), *Ecología y Fragmentación de Bosques Tropicales*, Editores. Ediciones LUR, Cartago, Costa Rica. 691 pp.
9. Guevara, S.; Laborde, J.; Sánchez, G., (1998) "Are isolated trees in pastures a fragmented canopy?", *Selbyana* **19 (1)**, 34-43.
10. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP). (2004), Datos meteorológicos de Santo domingo de los Colorados. (en línea). Consultado el 15 de noviembre del 2004. Disponible en <http://www.iniap-ecuador.gov.ec/estaciones/eesantodomingo.html>
11. INFOSTAT. (2007), Programa estadístico. Universidad de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>
12. Kleinn (2000), "On large-area inventory and assessment of trees outside forests: definition and survey options for large-area inventory and assessment of trees outside forests", *Unasylva*, **51**, 3-10.
13. Kramer, E. (1997), "Measuring landscape changes in remnant tropical dry forests. In:WF, Laurance, RO, Bierregaard Jr. Tropical Forest Remnants. Ecology, Management, and Conservation of Fragmented Communities". *University of Chicago Press, Chicago*. 386- 399p.
14. Morales y Kleinn (2001), *Guía de Fotointerpretación del proyecto FRAGMENT*, Proyecto TROF. Mimeografiado
15. Villacís, J., (2003), *Relaciones entre la cobertura arbórea y el nivel de intensificación de las fincas ganaderas en Río Frío, Costa Rica*. Tesis MSc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 129 p.