

Ingeniería

Revista Semestral de la Universidad de Costa Rica

ISSN 1409-2441

Vol. 17 (1)

Ene/Jul 2007

CONTENIDO

Artículos

1. Dimensionamiento y costeo de una planta de lavado de vehículos recolectores de desechos sólidos para los principales cantones del Área Metropolitana de Costa Rica 17-26
Ruiz, Francisco.
2. Caracterización de los registros acelerográficos obtenidos en el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica..... 27-41
Schmidt, Víctor; Quirós, Christopher.
3. Optimización aplicada a la calibración y validación de modelos de elementos finitos de puentes 43-59
Rodríguez, Wilson; Muñoz, Edgar; Núñez, Federico.
4. Análisis mediante modelos físicos de interacción suelo-estructura en tuberías encerradas 61-76
Rodríguez, Jorge; Ruiz, Daniel; Coral, Álvaro; Pereira, Mauricio.
5. Pasta hidrotérmica y termoquímica a la soda obtenida a partir de residuos de paste (*Luffa cylindrica Roem*) 77-84
Blanco, María Lorena.
6. Diseño y construcción de un equipo de pruebas para la determinación de la resistencia al flujo de aire en granos y semillas..... 85-96
Aguilar, José Francisco.

Notas técnicas

1. Prototipo didáctico para la enseñanza de la Ingeniería Estructural 99-111
Muñoz, Edgar; Núñez, Federico; Otalora, Camilo.
2. Análisis de los factores que intervienen sobre la resistencia al flujo de aire en granos y semillas en operaciones de manejo poscosecha 113-124
Aguilar, José Francisco.

Trabajos de Graduación

Lista de proyectos de graduación de grado y posgrado del año 2006 de la Facultad de Ingeniería..... 127-140

Normas

Normas para la presentación de artículos a la Revista Ingeniería 143-150

EDITORIAL
UCR

<http://www.revistaingenieria.inii.ucr.ac.cr>
www.ucr.ac.cr / ISSN 1409-2441

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica

ENERO/JULIO 2007 - VOLUMEN 17 - Número (1)

Número (1)

Enero / Julio 2007

Volumen 17

REVISTA INGENIERÍA



EDITORIAL
UCR

CARACTERIZACIÓN DE LOS REGISTROS ACELEROGRÁFICOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO DE INGENIERÍA SÍSMICA DE LA UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

*Víctor Schmidt Díaz
Christopher Quirós Serrano*

Resumen

El Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS), del Instituto de Investigaciones en Ingeniería de la Universidad de Costa Rica, es el primer centro de investigación en esta área de la ingeniería, tanto a nivel nacional como de América Central.

Desde 1983, la red de acelerógrafos del LIS ha registrado más de mil trescientos acelerogramas, correspondientes a cuatrocientos veinte sismos sentidos, siendo algunos de ellos los causantes de daños severos en edificios, muertes y cuantiosas pérdidas económicas.

Al 28 de junio del 2007, el LIS cuenta con treinta y dos instrumentos digitales en operación, lo que permite obtener registros de prácticamente todos los sismos sentidos que ocurren en el país. Las estaciones donde se encuentran colocados estos instrumentos están ubicadas en distintos tipos de suelo, clasificados como: roca (10 % del total de los sitios donde se ubican los instrumentos), un 27 % en suelo firme y un 63 % en suelo blando.

Se llevó a cabo el análisis y la caracterización de todos los registros en campo libre (libres de la interacción del suelo con la estructura donde se ubica la estación) disponibles hasta la fecha en el LIS, considerando parámetros tales como: la aceleración pico, la intensidad de Arias, la energía de entrada, la raíz cuadrática media de la aceleración, el período predominante del evento, los gráficos de Husid y la duración de la fase fuerte del movimiento, entre otros. En la actualidad, todos los registros acelerográficos se encuentran a disposición de cualquier usuario que así los requiera.

Palabras clave: acelerograma, parámetros descriptivos, sismos fuertes.

Abstract

The Earthquake Engineering Laboratory (LIS) is the first of its kind devoted to the study of that branch of engineering in Central America.

Since its foundation in 1983, the LIS accelerometer network has acquired more than 1300 records corresponding to 424 earthquakes. Some of those earthquakes have caused considerable damage to structures, significant economic losses, and taken human lives.

The strong motion network is currently made of 32 digital accelerometers. The instruments are located over different soil types classified as rock (10%), firm soil (27%), and soft soil (63%).

In order to inform the general public on the kind of data the LIS operates, a detailed analysis is conducted regarding all the instruments located on free-field (far from the interaction soil-structure). The parameters that are analyzed correspond to the peak ground acceleration (PGA), spectral acceleration, velocity and displacement, the fundamental period, Arias intensity, the Husid graphics, the specific energy, and the effective duration and peak acceleration.

The records from the LIS are available upon request.

Key words: accelerograms, descriptive parameters, earthquakes.

Recibido: 09 de agosto del 2006 • **Aprobado:** 02 de mayo del 2007

1. INTRODUCCIÓN

El Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS) de la Universidad de Costa Rica es el primer centro de investigación de este país en este campo. Asimismo, es de los únicos en el área centroamericana dedicado exclusivamente a la investigación en Ingeniería Sísmica. Posee una red de acelerógrafos, que son instrumentos diseñados para medir sismos fuertes, cuyo objetivo fundamental es la obtención de acelerogramas.

Esta red de instrumentos empezó a operar en 1983, como extensión de un programa de medición de sismos fuertes. La ocurrencia de varios sismos importantes en el corto tiempo transcurrido desde su creación (1990-1992), permitió la consolidación del LIS como un centro de investigación de reconocido prestigio. Los ingenieros del laboratorio han tenido la oportunidad única de evaluar cuantitativamente los efectos de diferentes sismos sobre las construcciones y los suelos, así como dar a conocer los resultados de sus investigaciones por medio de publicaciones, conferencias y seminarios. Todo esto a partir de los acelerogramas registrados por más de veinte años, que han sido un insumo fundamental para el desarrollo de la ingeniería sísmica, tanto en Costa Rica como a nivel internacional.

2. DESCRIPCIÓN DE LA RED DE ACELERÓGRAFOS DEL LIS

El Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS) cuenta con una red de treinta y seis estaciones acelerográficas, en la que se encuentran colocados un total de cuarenta acelerógrafos, los cuales registran la actividad sísmica en distintos puntos del país. Han sido colocados a partir de estudios de zonificación sísmica hechos por sismólogos costarricenses y extranjeros, en los que se ha logrado identificar la zona de subducción a lo largo de la Costa Pacífica, así como diversos sistemas de fallas locales que afectan los principales centros de población del país.

Los registros que se analizaron en este estudio, provienen de instrumentos colocados en la condición de campo libre, que corresponde a sitios cuya interacción entre el suelo y la estructura donde se ubica el instrumento, es despreciable. La condición ideal se da cuando el aparato es colocado en una losa, en contacto directamente con el suelo, pero también se considera dentro de esta categoría, el nivel inferior de edificios de uno y dos pisos.

Según el Código Sísmico de Costa Rica 2002 (CSCR, 2002), el territorio nacional se divide en tres grandes zonas de acuerdo con la actividad sísmica presente: Zona II, Zona III y Zona IV, ordenadas de menor a mayor amenaza sísmica. Las estaciones acelerográficas mencionados se encuentran, en su mayoría, en regiones definidas como zonas III y IV, es decir, donde se concentra la mayor actividad sísmica de Costa Rica.

Un factor que afecta significativamente la aceleración del suelo registrada durante un sismo, es el tipo de suelo sobre el cual se colocan los acelerógrafos. Los instrumentos del LIS se encuentran predominantemente sobre suelos firmes o blandos, según la clasificación del ATC (ATC, 1985). De acuerdo con esta clasificación, los suelos firmes están compuestos por rocas sedimentarias o volcánicas con espesores de arcilla inferiores a 20 m y velocidades de la onda cortante en el rango de 1500 m/s a 1700 m/s. Corresponden aproximadamente a suelos tipo S_2 , según el CSCR-2002. Los suelos blandos están compuestos de rocas volcánicas fuertemente alteradas, donde los niveles freáticos son altos, la arcilla tiene un espesor de hasta 10 m sobre suelo firme y la velocidad de la onda cortante va de 800 m/s a 1200 m/s, son equivalentes a la clasificación S_3 del mismo código. La intensidad de las aceleraciones registradas suele ser mayor en suelos blandos que en firmes para un mismo sismo y una misma distancia hipocentral, lo cual significa que los daños en edificaciones son comúnmente mayores, cuanto más blando y profundo sea el suelo que subyace bajo ellas (Schmidt et. al, 2005). En el Cuadro 1 se muestra la clasificación de las estaciones del LIS, de acuerdo con la zonificación sísmica y el tipo de suelo donde se encuentran.

Cuadro 1. Clasificación actual de las estaciones en campo libre del LIS según el tipo de suelo y de la zona sísmica donde se ubican.

Condición	Suelo firme Zona III	Suelo firme Zona IV	Suelo blando Zona II	Suelo blando Zona III	Suelo blando Zona IV
Estaciones	CCH, CDN, FRA, LIB, LIM, RAL, RBA, RTU, TBA	NYA, GLF, QSP	SCS	ALJ, CLD, ECA, GTS, HTO, ISD, LPF, OVS, PAR, PCL, RGA, RMO, SLG, SRM, TGA	STC
Total de estaciones en campo libre	9	3	1	15	1
Registros en campo libre ¹	228	31	1	415	9

¹seleccionados para este estudio

Fuente: (Los autores).

Cuadro 2. Algunas características de los registros obtenidos por la red de acelerógrafos del LIS.

Primer registro	Terremoto de Golfito 7,2 Ms (03 de abril de 1983)
Mayor profundidad	186 km, sismo de Bebedero de Cañas (20 de julio de 1998)
Distancia hipocentral más larga	748 km, terremoto de El Salvador en estación San Isidro
Distancia hipocentral más corta	5 km, sismo de Frailes en estación Frailes
Sismo con más registros	Veintidós registros, sismo de Damas (20 de noviembre del 2004)
Mayor cantidad de sismos registrados en un mismo día	Ocho registros, el 22 de agosto de 1999 a raíz de la secuencia sísmica de Quepos, cuyo evento principal ocurrió el 20 de agosto (6,9 Mw)
Mayor aceleración registrada	0,459 g (450 cm/s ²), correspondiente al terremoto de Alajuela (5,7 Ms, 22 de diciembre de 1990)
Estación con mayor número de registros	CDN con un total de noventa y siete

Fuente: (LIS).

La red de acelerógrafos del LIS es heterogénea en lo que a tipos de instrumentos se refiere. En sus inicios, la red estuvo constituida únicamente por acelerógrafos analógicos SMA-1 (EERI, 1993). En 1987, el LIS adquirió su primer acelerógrafo digital tipo SSA-1 y en 1998, se obtuvieron los primeros acelerógrafos ETNA y K2. En el año 2001, se realizaron las primeras conversiones de

acelerógrafos analógicos a digitales (SMA-QDR). Actualmente, la red del LIS está compuesta, en su mayoría, por acelerógrafos digitales.

Los acelerógrafos analógicos (SMA-1) utilizan dispositivos ópticos para registrar, sobre una película fotográfica, la aceleración del terreno en función del tiempo, mientras que los digitales

(SMA-QDR, SSA-1, SSA-2, ETNA, K2) poseen sensores que producen un voltaje proporcional a la aceleración del terreno, que permite registrarla de manera electrónica. Tienen la ventaja de que disminuyen las fuentes de error durante el procesamiento y hacen que los datos sean más confiables y accesibles, además de que estén disponibles inmediatamente después de la ocurrencia del sismo.

De acuerdo con los datos registrados hasta la fecha, el sismo con mayor número de registros corresponde al de Damas, que tuvo una magnitud momento (M_w) de 6,2 (20 de noviembre 2004) con veintidós registros. El 20 de agosto de 1999 fue el día en que se registraron más sismos, con ocho eventos con magnitudes entre 4,6 M_w a 6,5 M_w , originados en las cercanías de Dominical de Osa. El movimiento con la mayor distancia hipocentral captado por los acelerógrafos del LIS, fue el ocurrido el 13 de enero del 2001 en El Salvador, registrado por la estación de San Isidro (ISD) a una distancia de 748 km del foco (sitio en el que se inicia la fractura de la roca y de donde surgen las primeras ondas sísmicas). La estación que ha logrado reconocer más sismos (noventa y siete en total) es la de CDN, localizada en Aguacaliente de Cartago.

En el Cuadro 2 se resumen las principales características de los registros del LIS obtenidos a lo largo de veintitrés años.

3. DEFINICIÓN DEL ACELEROGRAMA

El acelerograma es el registro de la aceleración en función del tiempo, en un sitio determinado, como el suelo o las estructuras. Es registrado por acelerógrafos. Comúnmente, la historia de las aceleraciones se registra en tres componentes: dos en el plano horizontal (llamadas longitudinal y transversal) y otra en sentido vertical. Muchas veces el instrumento se orienta de manera que la componente longitudinal coincida con la dirección Norte-Sur (Sauter, 1989).

La Figura 1 muestra un acelerograma registrado por la red del LIS, en el que se aprecian sus

diferentes componentes básicos: escala de tiempo, escala de aceleración, PGA o aceleración pico del terreno, así como la duración de la fase fuerte, la cual se analizará más adelante.

Al ser un valor de aceleración, el PGA suele darse en valor absoluto, con unidades como: gals (1 gal = 1 cm/s^2), m/s^2 , g (fracción de la aceleración de la gravedad), o en $g \cdot 100$.

Debido a que los sismos son eventos aleatorios en el tiempo y en el espacio, los acelerogramas resultan ser una superposición de ondas sumamente compleja que depende del proceso de ruptura en el hipocentro, de su propagación y atenuación, así como de los efectos de sitio debidos a la geología y a las condiciones geotécnicas que existan en el lugar donde se ubique el instrumento de registro. Considerando lo anterior, la forma de los acelerogramas es siempre distinta, por lo que cada registro es único e irrepetible, de ahí la importancia de contar con instrumentos que permitan su obtención. Las Figuras 2 y 3 muestran dos acelerogramas con características distintas. La Figura 2 corresponde a un registro muy cercano a la fuente, con una distancia hipocentral corta y obtenido en roca. Este tipo de formas de onda se caracterizan por su corta duración y su contenido de altas frecuencias. Por otro lado, la Figura 3 presenta un ejemplo de un acelerograma registrado a una larga distancia hipocentral y en un sitio considerado como suelo blando (tipo S_3 de acuerdo con el CSCR-2002). En este caso, el registro es de larga duración y predominan frecuencias más bajas (o bien, periodos largos), debido al filtrado de altas frecuencias que sufre la señal a lo largo de su propagación, hasta llegar a la superficie.

En la actualidad, en el LIS se cuenta con más de mil trescientos acelerogramas registrados en más de veintitrés años, correspondiente a cerca de cuatrocientos veinte sismos sentidos. Esta información está disponible en forma gratuita para investigadores y profesionales a quienes les resulte de utilidad. Para solicitarla, deberá seguir las instrucciones indicadas en la página: <http://www.inii.ucr.ac.cr/lis> bajo el botón de “descargas”.

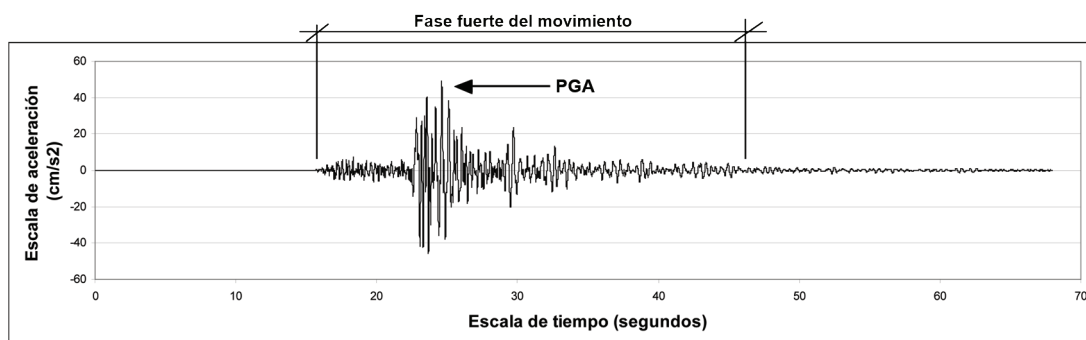


Figura 1. Componentes principales de un acelerograma.
Fuente: (Los autores).

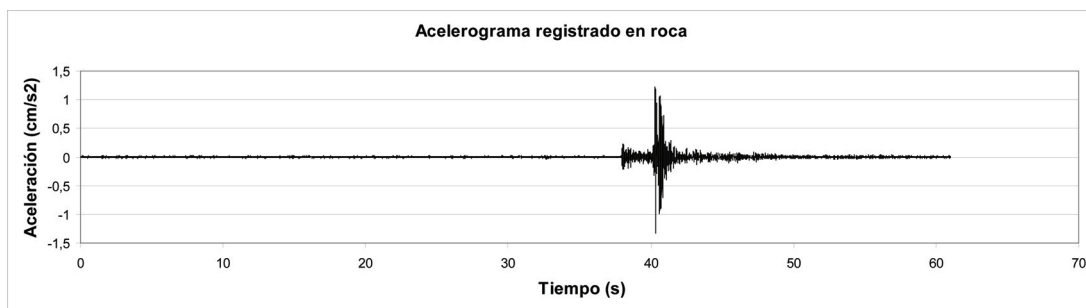


Figura 2. Acelerograma obtenido en roca, a una corta distancia hipocentral.
Fuente: (Los autores).

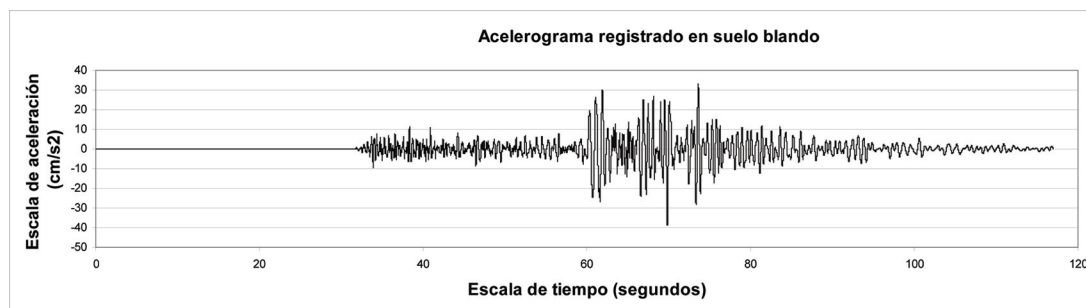


Figura 3. Acelerograma obtenido en suelo blando (S3), a una larga distancia hipocentral (248 km).
Fuente: (Los autores).

4. PARÁMETROS DESCRIPTIVOS DE LOS ACELEROGRAMAS DEL LIS

En la literatura, existen diversos términos y parámetros que permiten caracterizar los acelerogramas, para facilitar los análisis comparativos entre distintos registros de aceleración. Se clasifican según su significado,

sea que correspondan a cálculos de energía o duración, o bien, a comparaciones entre los valores de aceleración pico (PGA). En este apartado se consideran algunos de los más importantes utilizados por investigadores a nivel mundial, de manera que se faciliten las comparaciones entre registros nacionales, de acuerdo con su procedencia (zona sísmica y condición del suelo).

Finalmente, se compara el concepto de “energía de entrada” a partir de registros nacionales y los obtenidos a partir de registros extranjeros considerados como importantes, según el daño observado en zonas cercanas a los sitios de registro.

4.1 Parámetros para cuantificar la liberación de la energía

Un sismo consiste en la liberación de gran cantidad de energía, que da como resultado el movimiento de una sección de la corteza terrestre. Este desplazamiento súbito, de masas en la litosfera, se produce cuando las tensiones en estos bloques sobrepasan la resistencia del material que los conforma y por lo tanto, se produce un rompimiento repentino, aun cuando las tensiones se han acumulado (Sarria, 1995). Debido a lo anterior, la severidad de un sismo depende de la cantidad de energía liberada durante el proceso de ruptura y del movimiento de la corteza, así como del proceso de propagación de las ondas y de efectos locales debido a las condiciones de suelo en cada sitio en particular.

Entre los distintos tipos de la cuantificación de la energía liberada por un sismo, a partir de la lectura de un acelerograma específico, se han definido dos medidas cuyo uso es bastante común en los estudios de Ingeniería Sísmica y que son bastante semejantes en su expresión matemática: “*La Raíz Cuadrática Media de la Aceleración (RCM)* y la *Intensidad de Arias (I_A)*” (Husid, 1973).

La RCM de la aceleración para cada componente se ha utilizado como medida de comparación de la severidad de un sismo; sin embargo, Husid (1973), señala que es un valor muy sensible al intervalo del registro que haya sido seleccionado para su cálculo. Adicionalmente, la variación de este parámetro en el tiempo resulta importante cuando se desea conocer si una estructura determinada sobrepasa un límite de deformación máximo, antes de finalizar el sismo. Por otro lado, RCM es, en muchos casos, el único parámetro que permite la explicación de fenómenos que se presentan en el estudio de estructuras con posibilidad de sufrir colapso. Se define como:

$$\ddot{u}_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t \ddot{u}_g^2(\tau) d\tau} \quad (1)$$

Donde:

\ddot{u}_{rms} : raíz cuadrática media de la aceleración, m/s²

τ : una variable temporal, s

\ddot{u}_g : aceleración del suelo durante el movimiento sísmico, m/s²

t: tiempo para el cual se evalúa la RCM, s

La I_A , se define como la cantidad de energía por unidad de peso disipada por una familia de osciladores de un grado de libertad, cuyas frecuencias están comprendidas en el rango $(0, +\infty)$, para un sismo y amortiguamiento dados (Arias, 1973). La deducción de la expresión para la intensidad de Arias considera como modelo estructural el oscilador de un grado de libertad con amortiguamiento viscoso, al igual que la teoría de espectros de respuesta. La expresión simplificada para la intensidad de Arias es:

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_0} \ddot{u}_g^2(\tau) d\tau \quad (2)$$

Donde:

I_A es la intensidad de Arias, m/s

τ : una variable temporal, s

\ddot{u}_g : aceleración del suelo durante el movimiento sísmico, m/s²

t_0 : duración total del movimiento, s

g: aceleración de la gravedad, m/s²

Como en el caso de la aceleración cuadrática media, la definición del límite superior de la integral queda supeditado, ya sea a alguna definición de duración de fase fuerte, a la duración total del registro acelerográfico o al criterio del usuario.

Es importante hacer ver que, tanto la I_A como la RCM dependen de la misma integral, por lo que al utilizar cualesquiera de estas dos definiciones, se pueden esperar resultados semejantes.

Con el fin de cuantificar la energía liberada según los registros sísmicos del LIS, se estimó la I_A , seleccionando únicamente los acelerogramas obtenidos en campo libre. La muestra se obtuvo clasificando los registros de acuerdo con el tipo de suelo y la zona sísmica, tal y como se indica en el Cuadro 1. Se tomaron registros obtenidos a lo largo de veintitrés años, aún de estaciones que ya no se encuentran en funcionamiento.

Del análisis realizado se obtuvo que solamente once registros tienen una I_A superior a los 0,135 m/s, valor reconocido como significativo para determinar posibles daños en estructuras sometidas a acciones sísmicas (Bommer & Martínez, 1999 y 2000). En el Cuadro 4 se muestran los porcentajes de registros según cada intervalo de I_A correspondientes al suelo blando Zona III, que es la clasificación que presenta mayores valores de este indicador.

Obsérvese que en ambas componentes horizontales (longitudinal y transversal), los porcentajes en cada categoría son semejantes y en la vertical son mayores para valores de I_A muy bajos y menores para rangos de I_A intermedios. El valor mayor de I_A corresponde a 1,744 m/s y se obtuvo a partir del registro del terremoto de Piedras Negras (Alajuela, 22 de diciembre de 1990) en la estación ALJ, ubicada en el Parque Central de la ciudad de Alajuela.

4.2 Definiciones de duración

Otro de los parámetros comúnmente utilizados en Ingeniería Sísmica, para la caracterización de los acelerogramas, corresponde a la definición de la duración. A pesar de que existen varias, en este trabajo se utilizaron las siguientes tres:

4.2.1 Duración significativa (DS)

En esta definición, la fase fuerte se establece como el tiempo que transcurre entre los instantes en que se acumulan el 5% y el 95% de la Intensidad de Arias, para cada componente del registro. Debido a esto, siempre da una duración mayor que cero para cualquier registro y se tiene la ventaja de que la extensión de la duración no depende del nivel de aceleración registrado. Además, se debe resaltar que según esta definición, el preevento y el postevento del registro influyen poco en el resultado final, ya que al empezar a contar el

Cuadro 4. Registros entre intervalos definidos para la Intensidad de Arias, en suelo blando Zona III (%).

Intervalo de I_A (m/s)	Longitudinal	Vertical	Transversal
$0 - 1,25 \cdot 10^{-4}$	19	27	19
$1,26 \cdot 10^{-4} - 0,035$	34	41	33
0,036 - 0,075	36	28	36
0,076 - 0,11	4	1,5	3,5
0,111 - 0,134	1	0,5	1,5
0,135	6	2	7

$$I_{A \text{ máx}} = 1,744 \text{ m/s}$$

Fuente: (Los autores).

tiempo después de que se ha acumulado un 5% de la I_A y terminar 95% antes de la intensidad total, se evita, en la mayoría de los casos, tomar en cuenta estos tramos de bajas aceleraciones que poco aportan a la intensidad total en la duración de la fase fuerte del evento.

Con base en los resultados de la muestra analizada, se obtuvo lo siguiente:

- La DS es mayor a cero para todos los registros, debido a que la I_A es mayor a cero en cualquier registro de aceleraciones.
- Los registros en suelo blando muestran duraciones mayores que los de suelo firme.
- La componente vertical de los registros suele tener duraciones mayores que las horizontales, para un mismo registro.
- El 85% de los registros tiene una DS entre 0 s y 20 s.
- El 13% de los registros tiene una DS entre 20 s y 40 s.

En el Cuadro 5 se presenta un resumen de los resultados obtenidos para los registros nacionales en los que se obtuvieron valores mayores, según la zona sísmica y el tipo de suelo.

4.2.2 Duración acotada (DA)

En este caso, la duración de la fase fuerte del registro será el tiempo transcurrido entre la primera y la última aceleración, para cada componente, cuyo valor sea igual o superior a 0,05 g. Bruce Bolt fue el primero en sugerir esta definición, ya que en 1973, presentó el primer estudio sobre duración de fase fuerte, en el que determinó las duraciones de varios sismos haciendo uso de umbrales de 0,05 g y 0,10 g, después de someter los registros a un filtro frecuencial, de manera que cada duración obtenida estaba ligada a un rango pequeño de frecuencias (Bolt, 1973). Bajo este tipo de definiciones, un registro cuyo PGA sea muy cercano o menor que el umbral, puede tener una duración muy pequeña o del todo nula. Las duraciones acotadas o uniformes son muy sensibles a cambios en el umbral de aceleración, esto constituye una de sus principales desventajas y dificultades de interpretación.

Según los datos analizados, se obtuvo lo siguiente:

- En términos generales, la duración acotada es menor que la significativa.
- La DA es cero para el 90% de los registros, lo cual implica que la mayor parte del PGA de los datos disponibles es menor que 0,05 g.

Cuadro 5. Duraciones significativas máximas por tipo de suelo y zona sísmica.

Tipo de suelo y zona sísmica	DS máxima (s)	Registro	Mw
Firme, Zona III	70,5	8 de enero del 2000 en OVS	3,6
Blando, Zona III	39,6	22 de abril de 1991 (Limón en ALJ)	7,7
Firme, Zona IV	38,5	22 de abril de 1991 (Limón en GLF)	7,7
Blando, Zona IV	26,3	6 de mayo de 1988 en STC	6,4

Fuente: (Los autores).

- Se observaron nuevamente duraciones mayores para suelo blando que para suelo firme.
- En este caso, la DA resultó ser mayor en las componentes horizontales (longitudinal y transversal), que en la vertical. Esto es especialmente claro en registros cuya distancia hipocentral es intermedia y grande (mayor que 40 km), que corresponden a casos en los que hay un predominio de ondas superficiales y que son especialmente apreciables en los registros en el plano horizontal.

A continuación, se presenta el Cuadro 6 que resume las DA máximas.

4.2.3 Duración efectiva (DE)

Propuesta por Bommer y Martínez (1999 y 2000), esta definición se puede clasificar como una duración significativa, pero su novedad consiste en que los límites de I_A para los que se establece el inicio y el final de la fase fuerte son valores definidos de intensidad de Arias. El punto de inicio y el de final de la fase fuerte se definen con base en la forma del gráfico de Husid, cuando se alcanzan valores entre 0,01 m/s y 0,135 m/s de la I_A , tal y como se observa en la Figura 7.

Los autores establecen en su artículo, después de examinar una gran cantidad de registros tanto débiles como fuertes, que una I_A de 0,01 m/s será un valor adecuado para definir el inicio de la fase fuerte. En esta definición se establece que el final del tiempo efectivo corresponde al momento en que se ha acumulado una cantidad de energía (ΔI_A), que se fijó en el valor de 0,125 m/s.

De acuerdo con las estimaciones hechas por Quirós (2005), se concluye lo siguiente:

- Solamente un 5% de los registros analizados tiene una DE mayor que cero, que además corresponde a los sismos más fuertes según la base de datos utilizada.
- No hay una clara tendencia en cuanto a la componente que muestra el mayor valor de DE para un mismo registro.
- Se siguen observando mayores duraciones en suelo blando respecto al firme.
- La mayor cantidad de registros de los cuales se obtuvo DE corresponden a Zona III, suelo blando.
- En general, se observó que la DS es mayor que la DA, y estas a su vez mayores que la DE.

Cuadro 6. Duraciones acotadas máximas por tipo de suelo y zona sísmica.

Tipo de suelo y zona sísmica	DA máxima (s)	Registro	Mw
Firme, Zona III	14,2	07 de marzo de 1992 (Naranjo en FRA)	5,6
Blando, Zona III	25,3	22 de abril de 1991 (Limón en CTG)	7,7
Firme, Zona IV	4,7	25 de diciembre del 2003 (GLF)	6,6
Blando, Zona IV	0,3	16 de mayo de 1990 en STC	5,5

Fuente: (Los autores).

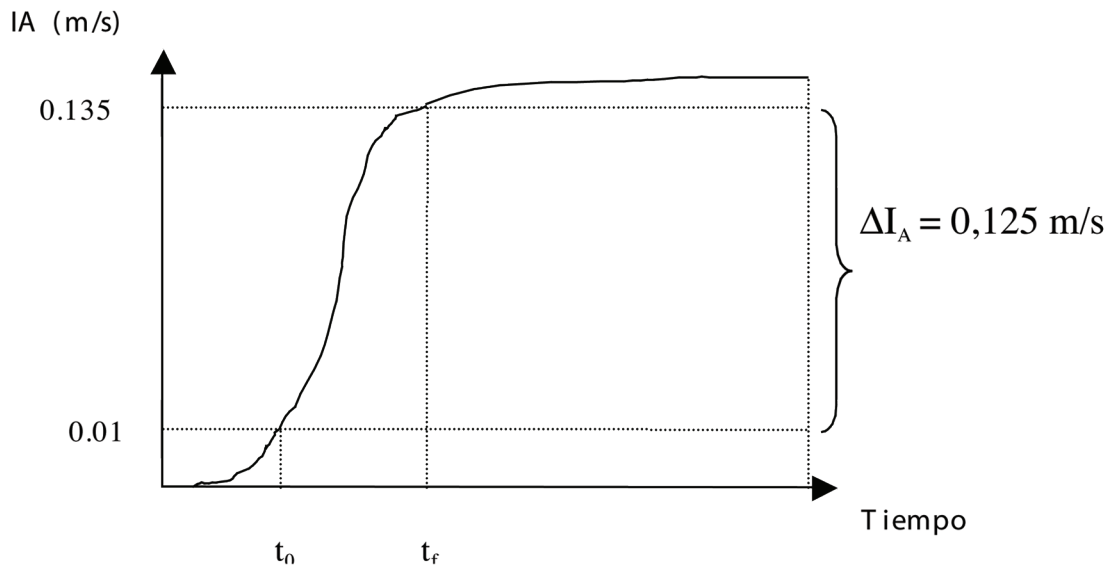


Figura 4. Gráfico de Husid y límites para la determinación de la duración efectiva. t_c es donde se alcanza una I_A de 0,01 m/s, t_f corresponde a una I_A de 0,135 m/s, o sea, a una energía acumulada de 0,125 m/s.
Fuente: (Bommer & Martínez, 1999).

Cuadro 7. Duraciones efectivas máximas por tipo de suelo y zona sísmica

Tipo de suelo y zona sísmica	DE máxima (s)	Registro	Mw
Firme, Zona III	19,7	22 de abril de 1991 (Limón en CCH)	7,7
Blando, Zona III	34,3	22 de abril de 1991 (Limón en GTS)	7,7
Firme, Zona IV	5,32	25 de diciembre de 2003 (GLF)	6,6
Blando, Zona IV	No existe		

Fuente: (Los autores).

Cuadro 8. Estimaciones de la razón PGAV / PGAH para la muestra de registros analizados.

Tipo de suelo	Zona sísmica	Promedio aritmético
	CSCR-2002	PGA_V/PGA_H
Firme	IV	0,733
Blando	IV	0,744
Firme	III	0,697
Blando	III	0,637

Fuente: (Los autores).

En el Cuadro 7 se muestra un resumen de los resultados obtenidos para la duración efectiva.

4.3 Comparación entre las aceleraciones pico del terreno (PGA) verticales respecto a las horizontales

De acuerdo con observaciones hechas a partir de registros sísmicos obtenidos alrededor del mundo, se ha generalizado la consideración de que la aceleración pico correspondiente a la componente vertical (PGA_V) es aproximadamente $2/3$ (0,67) de la aceleración horizontal (PGA_H).

En vista de que se trabaja con una amplia base de datos de acelerogramas de tres componentes (dos horizontales y una vertical por registro), se consideró oportuno establecer esta relación a partir de registros de Costa Rica.

Utilizando la misma clasificación del Cuadro 1, se estimó el promedio de las aceleraciones pico horizontales (PGA_H) de acuerdo con la siguiente relación:

$$PGA_H = \frac{PGA_L + PGA_T}{2} \quad (3)$$

Donde:

PGA_L y PGA_T : aceleraciones pico del registro en direcciones longitudinal y transversal, respectivamente, ambas en el plano horizontal, cm/s^2

Para estimar la razón entre valores verticales y horizontales se utilizó la siguiente relación:

$$\left(\frac{PGA_V}{PGA_H} \right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{PGA_V}{PGA_H} \right)_i \quad (4)$$

Donde:

$(\overline{PGA_V}/PGA_H)$: razón entre los promedios de las aceleraciones verticales y horizontales, adimensional

PGA_V : aceleración pico del registro leída de la componente vertical de cada registro, cm/s^2

n : número de registros considerados, adimensional

Para el análisis se eliminaron todos los registros con PGA inferiores que $0,05$ g, ya que estos casos corresponden a sismos muy débiles y por lo general, los picos de aceleración horizontal y vertical suelen ser muy parecidos.

Los resultados de la aplicación de estas ecuaciones se resumen en el Cuadro 8.

Se observa que en la Zona III, los resultados son bastante cercanos a la razón $2/3$. Sin embargo, para los registros de la Zona IV, esta razón resulta ser más bien baja, ya que se demuestra que la aceleración vertical en esos casos tiende a ser mayor que $0,7$, por lo que, en esta zona particular, al calcular el PGA_V como $2/3$ del PGA_H se estaría subestimando ligeramente el valor de la aceleración pico vertical. Por otro lado, debe tomarse en cuenta que, según los datos disponibles, la cantidad de registros en Zona IV es bastante inferior que la de Zona III, por lo que el resultado obtenido para la IV, puede deberse a sesgos en algunos de los registros que al ser pocos, resultan muy significativos al calcular el promedio. En este sentido, resultaría muy útil repetir el ejercicio cuando se cuente con una mayor cantidad de registros en la Zona IV.

4.4 Energía de entrada absoluta

Uno de los parámetros mundialmente reconocidos como indicador de daños considerables en las estructuras, lo representa la energía de entrada. En este caso, se considerará el cálculo de la absoluta.

Su derivación simplificada, parte de la ecuación del movimiento para un sistema de un grado de

libertad con amortiguamiento viscoso, sometido a un sismo en su base, expresada como (Barbat y Canet, 1994), Sarria, (1995):

$$m\ddot{u}_t + c\dot{u}_t + f_s = 0 \quad (5)$$

Donde:

m : masa del sistema, kg

c : constante de amortiguamiento viscoso, adimensional

$f_s = ku$: fuerza de restauración, kg•cm/s²

$u_t = u + u_g$: desplazamiento absoluto o total de la masa

u : desplazamiento relativo entre la masa y el suelo y u_g el desplazamiento del suelo a consecuencia del sismo, cm

Si se integra la ecuación anterior con respecto al movimiento relativo u , desde el momento en que se inicia el movimiento del suelo, es posible llegar luego de varias simplificaciones, a definir la energía absoluta E_i , que recibe la estructura como:

$$E_i = \int m\ddot{u}_t du_g \quad (6)$$

Esta definición es significativa desde el punto de vista físico, ya que el término $m\ddot{u}_t$ representa la fuerza de inercia aplicada sobre la estructura, que es igual a la fuerza total aplicada en la cimentación de la estructura. Por lo tanto, E_i representa el trabajo hecho por el cortante basal total durante el desplazamiento de la cimentación (Uang & Bertero, 1998).

La Energía de Entrada Absoluta (E_{ABS}) puede estimarse, para un sistema masa-resorte-amortiguador determinado, si de éste se conoce además la historia de aceleraciones del suelo (acelerograma de entrada) y la historia de los

desplazamientos como respuesta de este sistema sometido a un acelerograma específico.

Para que el concepto de E_{ABS} tenga mayor utilidad, ésta se suele calcular para una familia de osciladores de un grado de libertad, de manera que cada uno sea representado por una expresión:

$$\omega_i = \sqrt{k_i/m_i} \quad (7)$$

siendo:

w_i : frecuencia natural de vibración, 1/s

k_i : rigidez del sistema, kg/s²

m_i : masa de cada oscilador, kg

De este modo se obtiene un espectro de energías, del cual se puede identificar el periodo o rango de periodos correspondiente a la máxima energía y que representa los tipos estructurales que recibirán mayor energía al ser sometidos a cada registro específico. Al ser sistemas amortiguados, los cálculos deben hacerse para amortiguamientos, ξ , definidos. En este caso se utilizó el $\xi = 5\%$.

El Cuadro 9 muestra los resultados obtenidos a partir de cinco registros nacionales seleccionados de acuerdo con el daño provocado, además de cinco extranjeros reconocidos. Se incluye además: la fecha, la magnitud, el PGA, la Intensidad de Arias y el rango de periodos aproximado en el cual la energía es máxima.

Es posible observar que los PGA correspondientes a los registros nacionales suelen ser más bajos o similares a los extranjeros, a excepción del caso de San Fernando, en el que el PGA es significativamente más alto que los demás. Respecto a la Intensidad de Arias, los nacionales tienen valores de este parámetro por debajo de los extranjeros, sobre todo si se compara el máximo nacional, (Alajuela en ALJ) con respecto al máximo extranjero (Llolleo, Chile), teniendo el nacional una I_A diez veces menor, aproximadamente.

Respecto a las energías, existen registros nacionales a partir de los cuales se obtuvieron energías semejantes a los extranjeros. Tales son los casos de Alajuela en ALJ (el máximo de todos los nacionales) y Limón en CTG, que se comparan con Imperial Valley y con Kobe, respectivamente. Sin embargo, se observa que el máximo nacional es cinco veces menor que San Fernando o Lolleo y diez menor que México (máxima E_{ABS} obtenida para todos los registros extranjeros), lo cual permite concluir que, de acuerdo con la E_{ABS} , la gran mayoría de los registros nacionales son considerablemente inferiores a algunos de los más destructivos que se tienen documentados en el mundo.

Es importante resaltar el caso del registro de Limón, registrado en la estación ISD, del

que se obtuvo una energía baja respecto a los demás registros analizados. Sin embargo, el rango de estructuras que recibirán esta energía es bastante amplio: entre 0,2 s y 1,2 s, lo que significa que sistemas estructurales de dos y doce pisos aproximadamente, recibirán el mismo nivel de energía.

Del Cuadro 9 se observa además, que la magnitud de los sismos no correlaciona en forma directa con el PGA, la I_A o la E_{ABS} , por lo que no puede ser considerada como un parámetro válido para definir el potencial de daño en sistemas estructurales, tal y como había definido Cruz, Infante y Schmidt, (1998). Sin embargo, en términos generales sí hay correspondencia en que los registros analizados que muestran valores altos de I_A , también lo son para E_{ABS} .

Cuadro 9. Comparación entre la aceleración pico del suelo (PGA), la intensidad de Arias (I_A) y la energía absoluta (E_{ABS}), para sismos nacionales y extranjeros.

Registro ¹	Fecha	Magnitud	PGA	I_A	E_{ABS} para 5 % de amortización	Periodo de $E_{máx ABS}$
			(g)	(m/s)	(gals-cm)	(s)
Alajuela (ALJ)	1990.12.22	5,7	0,42	1,74	1,14E4	0,5-0,9
Limón (CMA)	1991.04.22	7,7	0,19	0,53	4,86E3	0,5
Limón (CTG)	1991.04.22	7,7	0,26	1,22	8,75E3	0,6-0,9
Limón (ISD)	1991.04.22	7,7	0,19	0,62	2,20E3	0,2-1,2
Imperial Valley (Centro)	1940.05.18	6,3	0,34	1,93	1,03E4	0,7-1,0
San Fernando (Pacoima)	1971.02.09	6,4	1,17	8,23	5,17E4	0,5
México (STC)	1985.09.19	8,1	0,1	1,26	1,24E5	1,2
Llolleo, (Llolleo)	1985.03.03	7,8	0,71	14,22	6,39E4	0,7
Kobe (KBU)	1995.01.17	7,2	0,35	0,62	7,95E3	0,8

¹ Nombre del sismo, estación de registro en siglas entre paréntesis

CONCLUSIONES

1. De acuerdo con su ubicación, más del 50% de las estaciones del LIS se ubican en Zona III, suelo S₃ según clasificaciones del CSCR-2002. Además, la mayor cantidad de registros disponibles provienen de estas estaciones. Existen zonas del país donde aún no existen estaciones de registro.
2. De los parámetros contenidos en la literatura que permiten estimar la energía liberada a partir de un registro sísmico conocido, se usó el de Intensidad de Arias. La mayor parte de los registros analizados tienen una I_A inferior que 0,135 m/s, que es un valor considerado como representativo respecto a la generación de daños en estructuras. Solamente once de los registros disponibles tienen una I_A superior a ese valor, siendo el mayor el obtenido con el registro del terremoto de Alajuela en la estación ALJ (valor igual a 1,74 m/s).
3. Respecto a las diferentes definiciones de duración de los registros consideradas, son pocos los acelerogramas que mostraron valores superiores a cero: para la duración significativa fue un 13%, para la acotada un 10% y para la efectiva solo un 5%, lo que permite concluir que respecto a este parámetro, la mayor parte de los registros obtenidos hasta la fecha son de muy corta duración en lo que se refiere a su fase fuerte. Esto es muy importante, ya que, según observaciones hechas cuando han ocurrido sismos fuertes en el mundo, se ha evidenciado que las estructuras que han sufrido más daños son aquellas que han tenido que soportar las fuerzas sísmicas por un prolongado lapso de tiempo, situación que no se evidencia en los registros de Costa Rica.
4. El supuesto generalizado de que el PGA_V (aceleración pico del suelo en componente vertical) es (2/3)•PGA_H (aceleración pico del suelo en componente horizontal) queda validado según los registros disponibles para la zona III, pero resulta inferior para los valores obtenidos en zona IV, en la cual

se observan valores altos de PGA en las componentes verticales.

5. Al comparar las estimaciones hechas para energías de entrada en relación con registros sísmicos extranjeros de probada destructividad, se evidencian algunos registros nacionales a partir de los cuales se obtuvieron energías semejantes a las obtenidas en otros países. Tales son los casos de Alajuela en ALJ (la máxima energía obtenida a partir de los nacionales) y Limón en CTG, que comparan con los registros de los sismos de Imperial Valley (M=6,3) y con Kobe (M=7,2), respectivamente. Sin embargo, se observa que el máximo nacional es cinco veces menor que el obtenido a partir de San Fernando (M=6,4) o Lolleo (M=7,8) y diez veces menor que México (M=8,1), lo cual permite concluir, que de acuerdo con la E_{ABS} que puede relacionarse con el daño esperado en estructuras, la gran mayoría de los registros nacionales son considerablemente inferiores a algunos de los más destructivos que se tienen documentados en el mundo.
6. Finalmente, la magnitud de los sismos no correlaciona en forma directa con la aceleración pico del suelo, la intensidad de Arias ni la energía de entrada absoluta, por lo que no puede ser considerado como parámetro válido para explicar el daño en sistemas estructurales.
7. Se espera obtener nuevas estimaciones de los parámetros mencionados anteriormente cada vez que ocurran sismos fuertes, así como incorporar parámetros nuevos y hacer las estimaciones considerando las direcciones máximas del movimiento, rotando las componentes longitudinal y transversal consideradas en este estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arias, A. (1970). A measure of earthquake intensity. R. J. Hansen, ed. Seismic design for nuclear power plants, MIT Press. Cambridge, Massachusetts, pp. 438-483.

- ATC (Applied Technology Council). (1985). Earthquake evaluation data for California. *13*.
- Barbat, A. & Canet, J. (1994). Estructuras sometidas a acciones sísmicas. Cálculo por ordenador. Centro Internacional de Métodos Numéricos. Barcelona, España.
- Bolt, B. (1973). The great Alaska earthquake of 1964: Geology and Geodesy. *Bulletin of the Seismic Society of America*. 63:740-742.
- Bommer, J. & Martínez, A. (1999). The effective duration of earthquake strong motion. *Journal of Earthquake Engineering*. 3(2): 127-172.
- Bommer, J. & Martínez, A. (2000). Strong motion parameters: definition, usefulness and predictability. En: *Memorias del 12º Congreso Mundial de Ingeniería Sísmica*.
- Comisión Permanente de Estudio y Revisión del Código Sísmico de Costa Rica. (2002). *Código Sísmico de Costa Rica 2002 (CSCR-2002)*. Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica. Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Cruz, M., Infante, E. & Schmidt, V. (1998). Evaluación del potencial de daño de sismos recientes en Costa Rica. En: *Memorias de X Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sísmica*, San José, Costa Rica. p.163-174. Editado por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica.
- Earthquake Engineering Research Institute (EERI). (1993). *US-Workshop. Costa Rica Earthquakes of 1990-1991. Effects on soils and structures*. Publication No. 93-A-1993.
- Husid, R. (1973). *Terremotos*. Editorial Andrés Bello. 1º Edición. Santiago, Chile.
- Quirós, Ch. (2005). Parámetros descriptivos de los acelerogramas de la base de datos del Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil. Escuela de Ingeniería civil. Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
- Sarria, A. (1995). *Ingeniería sísmica*. Editorial Uniandes. 2º Edición. Bogotá, Colombia.
- Sauter, F. (1989). *Introducción a la sismología*. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
- Schmidt, V., Moya, A., Climent, A., Rojas, W & Boschini, I. (2005). *Microzonificación sísmica de San José*. Costa Rica: Editorial de la Universidad de Costa Rica.
- Uang, C. & Bertero, V. (1998). Use of energy as a design criterion in earthquake resistant design. Reporte a la Fundación Nacional para la Ciencia. Editorial Earthquake Engineering Research Institute.

SOBRE LOS AUTORES

Víctor Schmidt Díaz

Licenciado en Ingeniería Civil con Posgrado en Ingeniería Sísmica.
Estudiante de Doctorado, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
Investigador del Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS), del Instituto de Investigaciones en Ingeniería.
Profesor, Escuela Ingeniería de Civil, Universidad de Costa Rica.
Teléfono: 253 7331
Correo electrónico: vschmidt@eic.ucr.ac.cr

Christopher Quirós Serrano

Licenciado en Ingeniería Civil.
Estudiante del Programa de Maestría
Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica
Consultor independiente
Teléfono: 253 7331
Correo electrónico: ingsismica@yahoo.com

