

INTEGRACIÓN DE DATOS GEOFÍSICOS Y GEOLÓGICOS PARA LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE CARORA, ESTADO LARA

Jesús ÁVILA, Javier OROPEZA, Alí GÓMEZ, Michael SCHMITZ y Kenny GARCÍA

Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas
Prolongación Calle Mara, Quinta FUNVISIS, El Llanito, Caracas, Venezuela.
Apartado 76880 – Caracas 1070. javila@funvisis.gob.ve

ÁVILA, J., OROPEZA, J., GÓMEZ, A., SCHMITZ, M., GARCÍA, K. (2014). Integración de datos geofísicos y geológicos para la microzonificación sísmica de Carora, estado Lara. *Revista Venezolana de Ciencias de la Tierra*, 46(1):1-17.

Manuscrito recibido: septiembre 2012; corregido recibido: julio 2013; aceptado: enero 2014

RESUMEN

Desde el año 2002 a la actualidad se han venido realizando estudios de microzonificación sísmica en varias ciudades del estado Lara, cuyo objetivo fundamental es obtener los niveles de amenaza y vulnerabilidad en las mismas y de esta forma conocer el riesgo sísmico. La ciudad de Carora se encuentra asentada en el borde sur-oriental de la cuenca de Carora, cuyo origen tectónico dado por las fallas de Burbusay y Mesa de Aregue en su condición de falla de sitio y a su cercanía con el sistema de fallas de Boconó, genera una amenaza sísmica moderada a alta. Debido a las condiciones de sitio, la ciudad de Carora representa un área potencial para ser afectada por efectos de cuenca y de borde de cuenca, en donde los sedimentos cuaternarios no consolidados pueden amplificar la onda sísmica generada por un terremoto. Los estudios geológicos de las unidades cuaternarias así como también la integración de datos geofísicos son insumos básicos para el cálculo de espesores sedimentarios de las cuencas y a su vez de la amenaza sísmica en superficie. En este trabajo se realiza la integración de datos geofísicos y de estudios geológicos para el cálculo de espesores sedimentarios del casco urbano de Carora. Estos valores de espesores sedimentarios son relacionados con valores de velocidades de onda corte en los primeros 30 m (Vs30) para generar los mapas preliminares de microzonas sísmicas de la ciudad.

Palabras clave: Gravimetría, ReMi, ruido sísmico ambiental, unidades cuaternarias.

ABSTRACT

Since 2005 to the present, seismic microzonation projects are carried out in several cities of Lara State in cooperation with the Lara State Government, whose main objective is to obtain the level of hazard and vulnerability of these cities, and thus calculate the seismic risk. Carora city is located in the southeastern edge of the Carora Basin. Due to its tectonic origin given by Burbusay and Aregue faults as local main tectonic features and the proximity to Boconó fault system, generates a relatively high seismic hazard. Due its location and site effects, Carora city represent an area that could be potentially affected by basin effect and basin-edge effect that occurs where the unconsolidated quaternary sediments amplify the seismic waves generated by an earthquake. Geological studies of Quaternary units as well as geophysical data integration are both basic key-input factors in the calculation of sedimentary basin thickness, and in turn of seismic hazard. In this work we present the integration of geophysical and geological studies to calculate the sedimentary thickness of Carora urban zone. These sedimentary thickness values are related with shear wave velocity values in the upper 30 m (Vs30) in order to generate preliminary seismic microzones of Carora city.

Key words: Gravimetry, ReMi, natural seismic noise, quaternary units.

INTRODUCCIÓN

En el marco del proyecto de microzonificación sísmica de las principales ciudades del estado Lara llevado a cabo con la cooperación entre la Gobernación del Estado Lara y FUNVISIS, se realizaron la adquisición, procesamiento e interpretación de diferentes tipos de datos geofísicos (gravimetría, ruido sísmico ambiental, ReMi –Refracción de Microtremores– y estudios geológicos. El objetivo es generar modelos del subsuelo de las cuencas en donde están emplazadas dichas ciudades, así como también mapas de espesores, los cuales son uno de los principales insumos

para la definición de las microzonas sísmicas de cada ciudad.

El área de estudio se limita al casco urbano de la ciudad de Carora, la cual está ubicada en la zona central del Estado Lara (Fig. 1A) y es la capital del municipio Pedro León Torres, tiene una extensión de 751 km² y se encuentra asentada en el borde suroriental de la cuenca de Carora contando con una población de 116.086 habitantes (Instituto Nacional de Estadística) (Fig. 1B).

Estudios realizados en las ciudades de Caracas (ABEKI 1995, DUVAL 1995, ROCABADO 2000) y Barquisimeto

(ROCABADO *et al.* 2002, SCHMITZ *et al.* 2009b) dan como resultado que los períodos fundamentales obtenidos a través del estudio de microtemores están relacionados con el espesor de sedimentos presentes en el subsuelo. La tendencia general es que a mayor profundidad de la columna sedimentaria, mayor será el valor de período obtenido en esa zona.

En este trabajo presentamos la integración cualitativa y cuantitativa de datos geofísicos e interpretaciones

geológicas para obtener una estimación inicial de los espesores sedimentarios de la ciudad de Carora.

Esta información será integrada con datos Vs30 (velocidad de ondas de corte en los primeros 30 m del subsuelo) obtenida usando aproximaciones de pendientes topográficas, y de esta forma definir las microzonas sísmicas de esta ciudad.

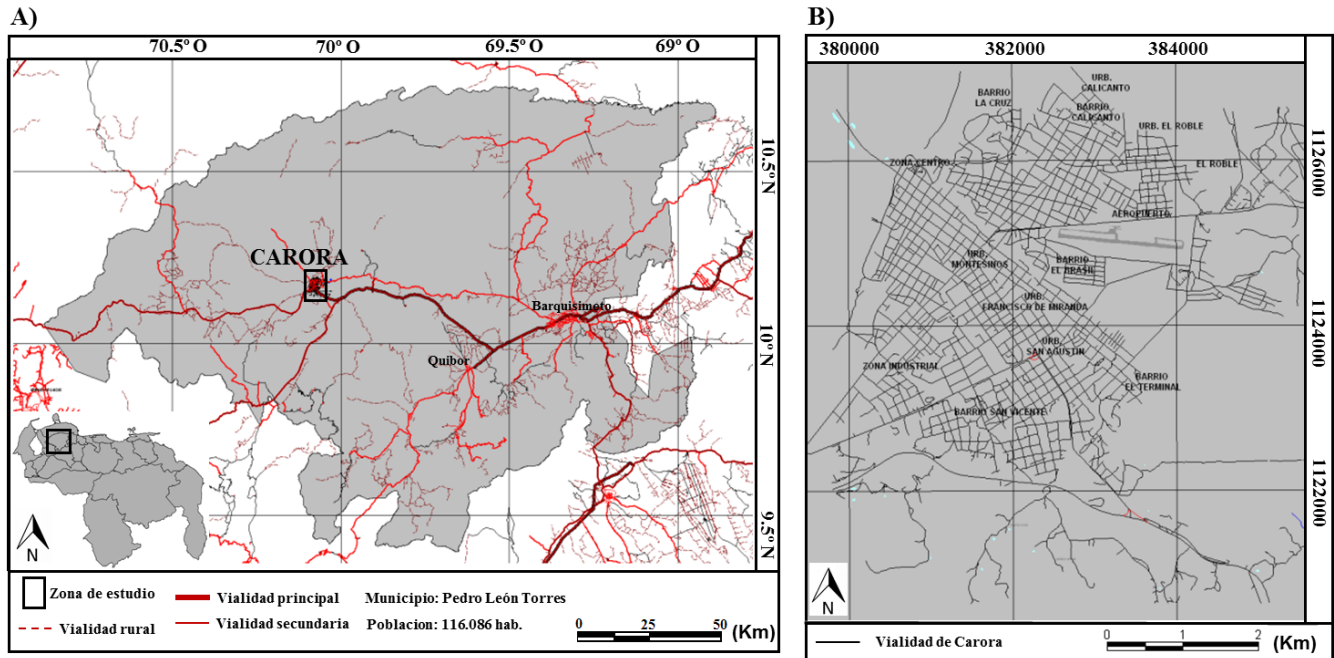


Fig. 1. Zona de Estudio. A) Localización regional de la zona de estudio en el estado Lara (Coordenadas Geográficas Latitud/Longitud WGS84). B) Casco urbano de la ciudad de Carora (Proyección UTM WGS84 Zona 19 Norte).

DATOS GEOFÍSICOS

En el área de estudio se han realizado estudios geofísicos a nivel local y regional. Algunos de los resultados de dos de estos estudios que son integrados en este trabajo se mencionan: el mapa de isoperíodos del subsuelo de Carora, a partir del cual se obtiene un mapa de espesores sedimentarios estimados (PAOLINI 2006), y un estudio gravimétrico regional que da como resultados un mapa de anomalía de Bouguer, modelos estructurales 2D y 3D del subsuelo y un mapa de espesores sedimentarios de la cuenca de Carora obtenido por MARTÍNEZ (2007).

Ruido sísmico ambiental

Durante el año 2006 se realizó la adquisición de 192 estaciones de datos de ruido sísmico ambiental con un espaciamiento promedio de 250 m localizadas en el casco urbano de la ciudad de Carora (PAOLINI 2006) (Fig. 2A).

A partir de estos datos y después de realizar un respectivo procesamiento se obtuvieron los resultados de los diferentes períodos fundamentales en cada estación. Dichos

períodos son agrupados en rangos para obtener el mapa de isoperíodos (Fig. 2B).

Usando los valores de isoperíodos y haciendo uso la ecuación lineal para el cálculo de espesores sedimentarios de cuencas urbanas ajustada por ROCABADO (2000) en sus estudios realizados en el Valle de Caracas, se obtiene un estimado del espesor sedimentario en cada estación de ruido sísmico ambiental adquirida.

Los mayores valores de período se concentran en la región central de la ciudad, cubriendo parte de las urbanizaciones: Montesinos, Francisco de Miranda y San Agustín y el barrio Brasil; así como también hacia el noreste de la misma, en especial la zona de El Roble y Calicanto (Fig. 2B).

Los menores valores de período se localizan en los extremos laterales del área de estudio, con un rango comprendido entre 0,4 s y 0,75 s, resaltando la zona Centro y el barrio El Terminal, ambos ubicados en dirección noroeste y sureste de la ciudad, respectivamente.

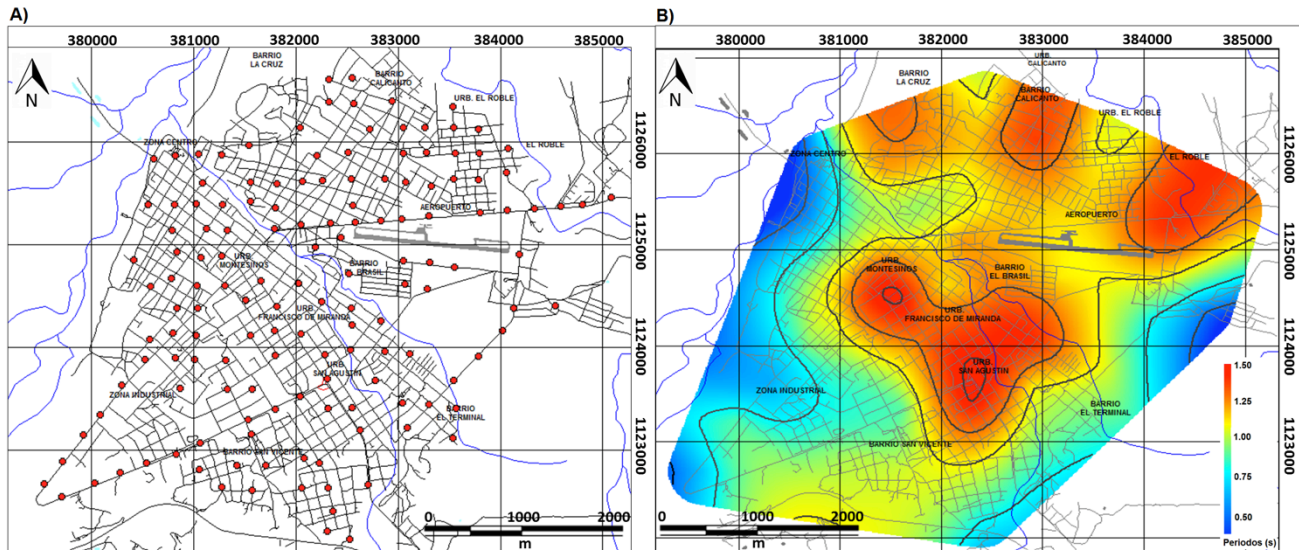


Fig. 2. A) Mapa de localización de estaciones de ruido sísmico ambiental, Puntos rojos: estaciones de ruido sísmico ambiental. B) Mapa de Isoperiodos obtenido para el casco urbano de la ciudad de Carora a partir de la interpolación de los datos de periodos fundamentales del subsuelo de las estaciones de ruido sísmico ambiental adquiridas en Carora. Ambos mapas tienen coordenadas UTM proyección WGS84 Zona 19 Norte (modificado de PAOLINI 2006).

En la zona industrial los periodos están comprendidos entre 0,7 y 0,8 s. Hacia el sur de la ciudad (barrio San Vicente), los valores de periodos se ubican en un rango entre 0,9 y 1,0 s, aumentando en dirección noreste, principalmente. En general, los mayores valores de período fundamental se aprecian en la región central de la ciudad, extendiéndose de forma progresiva hacia el norte, con una tendencia preferencial en dirección noreste. Igualmente, se observa una disminución de los mismos hacia los extremos noroeste y sureste de la ciudad.

Gravimetría

Se realizaron dos fases de tratamiento de los datos, la primera de ellas fue reprocesar parte de los datos gravimétricos adquiridos por el personal de FUNVISIS e INTEVEP-PDVSA en el marco del proyecto TUPURE-CARORA en donde se adquirieron un total de 2365 estaciones gravimétricas ordinarias y 217 estaciones gravimétricas de control estadístico (+/- un 10 % del total) en un área de 30.102 km² mediante diversas jornadas de trabajo de campo durante el periodo 09/2005 al 06/2006. La adquisición de los datos se llevó a cabo tomando lecturas de gravedad, altura y coordenadas correspondientes a cada estación ordinaria y realizando paralelamente su respectivo amarre a la estación base más cercana (MONCADA *et al.* 2006).

De ese total de estaciones adquiridas en el marco del proyecto TUPURE-CARORA, se reprocesaron un total de 915 estaciones ordinarias con 16 estaciones bases distribuidas en toda la zona de estudio regional cubriendo un área de estudio aproximada de de 16.116 km² correspondiente a la cuenca de Carora y abarca parte de los estados Lara, Falcón y Zulia ubicados en el occidente de Venezuela (Fig. 3A) (MARTÍNEZ 2007).

En la segunda fase realizada en el 2007, se realizó la adquisición y procesamiento de nuevas estaciones gravimétricas por parte de FUNVISIS dentro de la poligonal urbana de la ciudad de Carora, cubriendo una extensión cercana a 58 km² y logrando de esta forma una mayor densificación de estaciones y reduciendo así la distancia entre las mismas hasta 500 m (MARTÍNEZ 2007). Para cada estación se realizaron mediciones de gravedad, altura y coordenadas. Se utilizó la estación base ubicada en el aeropuerto de Carora con coordenadas en UTM E 383152,260 N 1125703,700 y valor de gravedad 978071,78 mGal según IGVS (Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar) (MARTÍNEZ 2007).

En esta segunda fase se adquirieron 86 estaciones ordinarias, que adicionadas a las 915 reprocesadas en la primera fase del trabajo, alcanzan un total de 1014 (MARTÍNEZ 2007) (Fig. 3A).

Luego de realizar el respectivo procesamiento de los datos y usando los datos de anomalía de Bouguer, los cuales fueron descompuestos en anomalía regional y anomalía residual (MARTÍNEZ, 2007), se generaron los modelos regionales del subsuelo en la cuenca de Carora. A partir de los distintos planos 2D de los modelos del subsuelo generados para construir el modelo 3D, se obtuvo un mapa de espesores sedimentarios estimados para la cuenca de Carora (Fig. 3B).

Según MARTÍNEZ (2007), la variación de los espesores se observa entre 0 y 1200 m, encontrándose los máximos valores al noreste de la depresión de Diquiva, al norte y en la parte central de la cuenca. Los espesores de sedimentos aumentan considerablemente desde el sureste hasta el centro de la cuenca y cercanías del Venado (Fig. 3A). Toda esta estructura es dominada tectónicamente por la Falla de Burbusay y la Falla Mesa de Aregue (Fig. 4), que al parecer es la responsable de controlar la forma de la cuenca

generando un frente inverso activo ubicado al norte de la cuenca (MARTÍNEZ 2007, AUDEMARD *et al.* 2007, OROPEZA 2012)

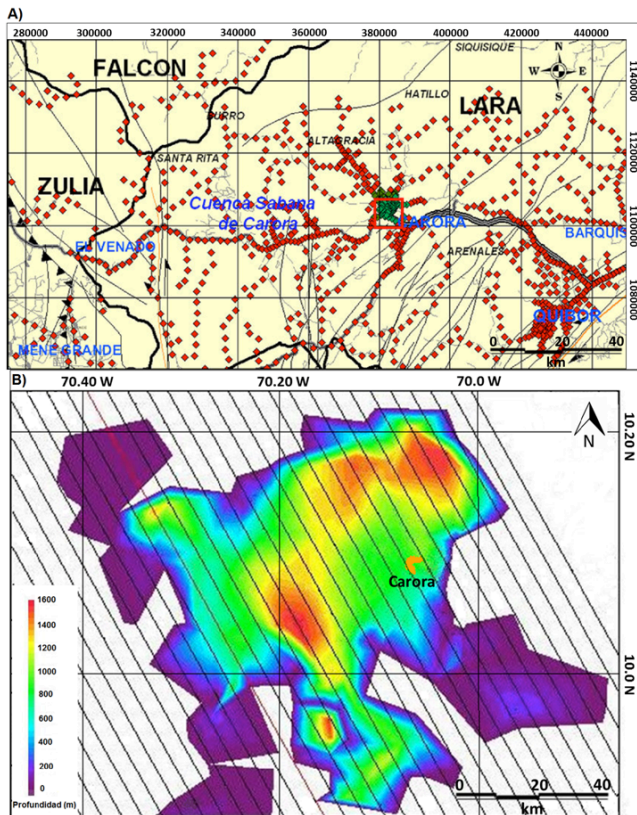


Fig. 3. A) Estaciones gravimétricas adquiridas en la Sabana de Carora, puntos rojos: estaciones gravimétricas adquiridas durante la primera fase (Proyecto TUPURE-CARORA, MONCADA *et al.* 2006), puntos verdes: estaciones gravimétricas adquiridas durante la segunda fase (MARTÍNEZ 2007), coordenadas UTM proyección WGS84 Zona 19 Norte. B) Mapa isópaco de espesores sedimentarios estimados en la cuenca de Carora, la líneas con dirección NO-SE representan los planos 2D que conforman el modelo gravimétrico 3D generado, coordenadas geográficas grados decimales Lat, Lon (modificado de MARTÍNEZ 2007)

En la cercanía de la ciudad de Carora se estima un espesor entre los 60 y 120 m el cual aumenta hacia la población de Altigracia (Fig. 3A) (MARTÍNEZ 2007).

CONTEXTO GEOLÓGICO

La cuenca de Carora representa el accidente topográfico más notable de la región centro-occidental del país. Se trata de una extensa planicie aluvial bordeada de importantes relieves montañosos como la Serranía de Baragua al norte, Serranía de Matatere al este y Serranía de Ziruma-Trujillo al oeste, conformados por rocas cretácicas y terciarias.

De acuerdo a diversos autores (BELLIZZIA & RODRÍGUEZ 1966, STEPHAN 1977, 1982, BAQUERO *et al.* 2009, URBANI & MENDI 2011, GÓMEZ 2012, entre otros), la evolución tectónica y estratigráfica de esta región esta definida por la superposición de fases tectónicas de estilos y edades diferentes que, de forma muy general, se pueden

esquematar de la siguiente manera: corrimientos hacia el sur que corresponden a los dominios Caribe, movimientos verticales relacionados con el levantamiento de la cadena de los Andes de Mérida, y finalmente, las deformaciones plio-holocenas que se relacionan con el régimen tectónico actual y que afectan las estructuras anteriores.

La cuenca de Carora es una cuenca tipo flexural controlada por las falla de Mesa de Aregue, que limita a la cuenca por el norte, y por la falla de Burbusay, localizada en la margen occidental del valle del río Bucare (OROPEZA 2012). De acuerdo a AUDEMARD *et al.* (1998, 2007), éstos accidentes tectónicos se conectan debido a la doble inflexión del segmento norte de la falla de Burbusay entre el sector de Puricaure y la Hda. Magamure, al oeste de la cuenca de Carora. Igualmente, AUDEMARD *et al.* (1998, 2007) sugieren que esta estructuración de la falla de Burbusay (Fig. 4), pueda corresponder a una gran rampa lateral de influencia cortical.

La ciudad de Carora, localizada en el borde suoriental de la cuenca homónima, se encuentra asentada mayoritariamente sobre sedimentos cuaternarios, depositados discordantemente sobre rocas cretácicas y terciarias, conformadas principalmente por las formaciones Barquisimeto y Matatere (OROPEZA 2012).

A continuación se describen brevemente las mismas, iniciando con las más antiguas (Fig. 5).

- Los depósitos Q5 (Pleistoceno Inferior), están representados por remanentes de rampas de explayamiento que han quedado suspendidas en forma de terraza en los topes de los cerros ubicados al este de la Qda. Mauricio.
- Los depósitos Q4 (Pleistoceno Inferior), están representados por abanicos de explayamiento de vergencia NO. Se trata de acumulaciones extremadamente pedregosas con cantos subangulares redondeados de hasta 1 m de diámetro, que ocupan el piedemonte suroeste del área de estudio (COPLANARH 1975).
- Los depósitos Q3 (Pleistoceno Inferior), están representados por abanicos de explayamiento, donde se asienta gran parte de la ciudad de Carora. Se trata de acumulaciones igualmente heterométricas pero más arenosas. Por su geometría y vergencia NO, estos depósitos se sumergen progresivamente bajo los depósitos más jóvenes de la planicie de desborde del río Morere. También, se observan en posición de terraza en ambos márgenes de las quebradas El Roble y Mauricio.
- Los depósitos Q2 (Pleistoceno Medio), son escasos en el área de estudio, están representados localmente por conos de deyección y terrazas.
- Los depósitos Q1 (Pleistoceno Superior), se trata de depósitos de terrazas aluviales localizadas principalmente en ambas márgenes de la Qda. El Roble.
- Los depósitos Q0 (Holoceno), representados por la planicie de desborde del río Morere y sus afluentes. Se trata de depósitos arcillo-limosos (hasta 70% arcilla) depositados en un ambiente subacuático de cubetas de bloqueo producto del represamiento del referido río, originado por las rampas de explayamiento referidas. Esta unidad ocupa el sector noroccidental del área de estudio.

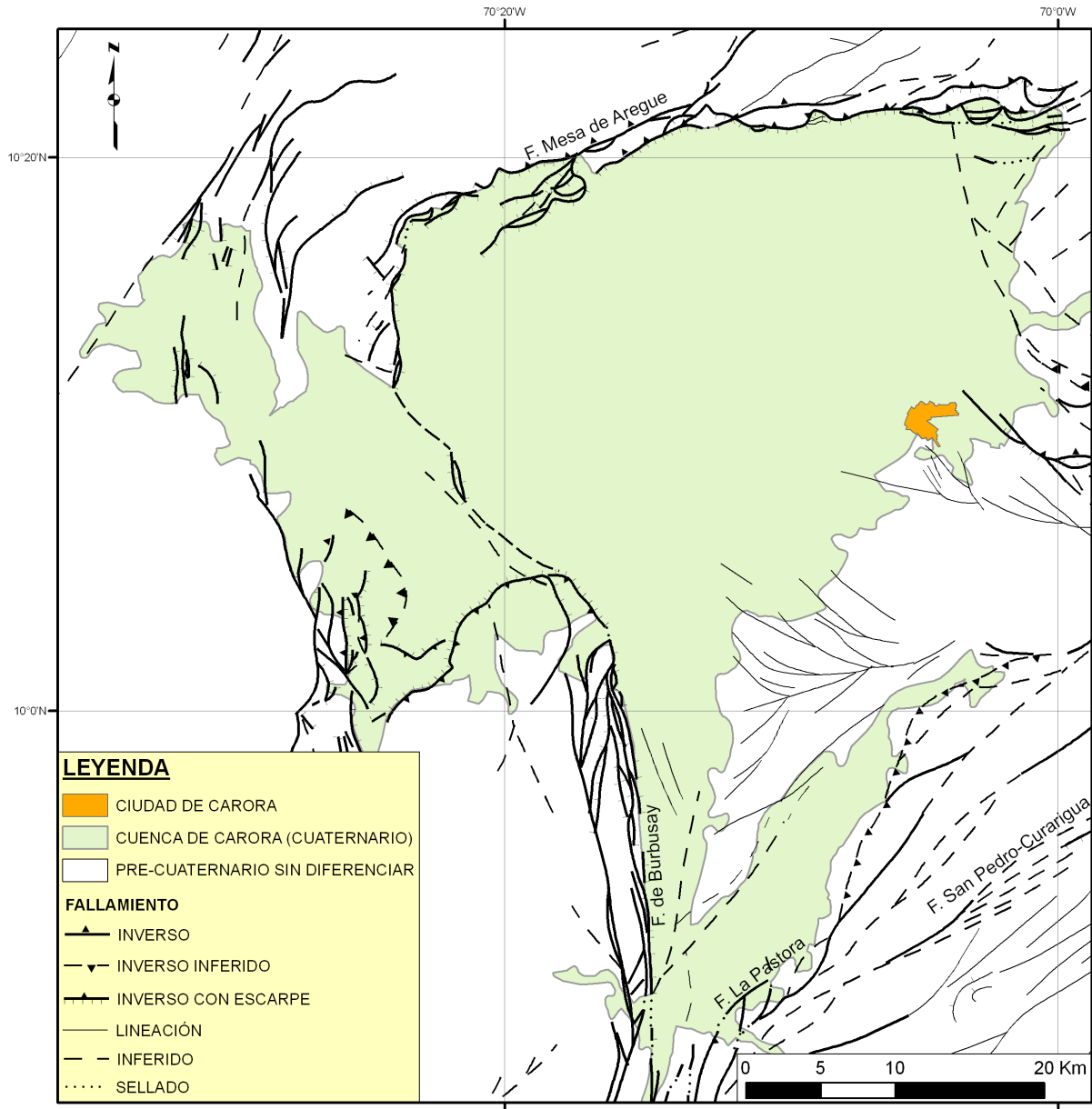


Fig. 4. Marco estructural de la cuenca de Carora. Modificado del mapa estructural de AUDEMARD *et al.* (1998)

- Los depósitos policrónicos (Q3,4; Q2,3; Q1,2 y Q0,1), corresponden por lo general a valles coluvio- aluviales de las quebradas locales. Se trata de depósitos heterométricos producto de la erosión local de las unidades geológicas cuaternarias descritas en los párrafos anteriores. Por otro lado, las unidades que conforman el basamento de los depósitos cuaternarios son: la Formación Matatere, del Eoceno Medio, una unidad turbidítica monótona alternancia de arenisca y lutita, la cual aflora como pequeñas colinas al norte, (ej. Cerro Oscuro y Cardonalito), y al este de la ciudad (ej. Cerro Las Vacas y Cerro el Orégano) (GÓMEZ 2012) (Fig. 5). Por otra parte, en los cerros hacia el sur encontramos aflorando las formaciones Aguardiente (Cretácico Temprano) y Barquisimeto (Cretácico Tardío), las cuales se caracterizan por grandes espesores de arenisca

carbonática en el caso de Aguardiente y de secuencias muy deformadas de lutita carbonática, fanita y caliza nodular para el caso de Barquisimeto (GÓMEZ 2012) (Fig. 5).

METODOLOGÍA

Datos geológicos

Para definir el contacto roca-sedimento y las unidades cuaternarias presentes en la ciudad de Carora, se realizó la revisión e interpretación de fotografías aéreas del área de estudio (misión 0202128, 1981, esc. 1:50.000), donde se interpretaron 6 unidades geológicas cuaternarias que se plasmaron sobre los mapas topográficos a 1:25.000 (Hojas: 6146-I-SE - Carora y 6146-II-NE - Las Palmitas), mientras

que las formaciones pre-cuaternarias son producto de las interpretaciones de GÓMEZ (2012).

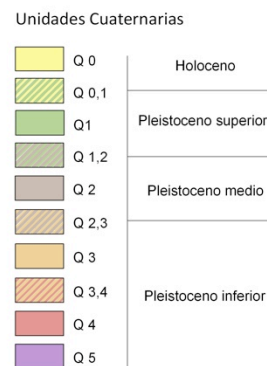
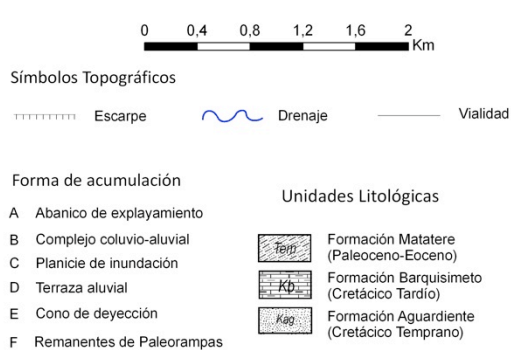
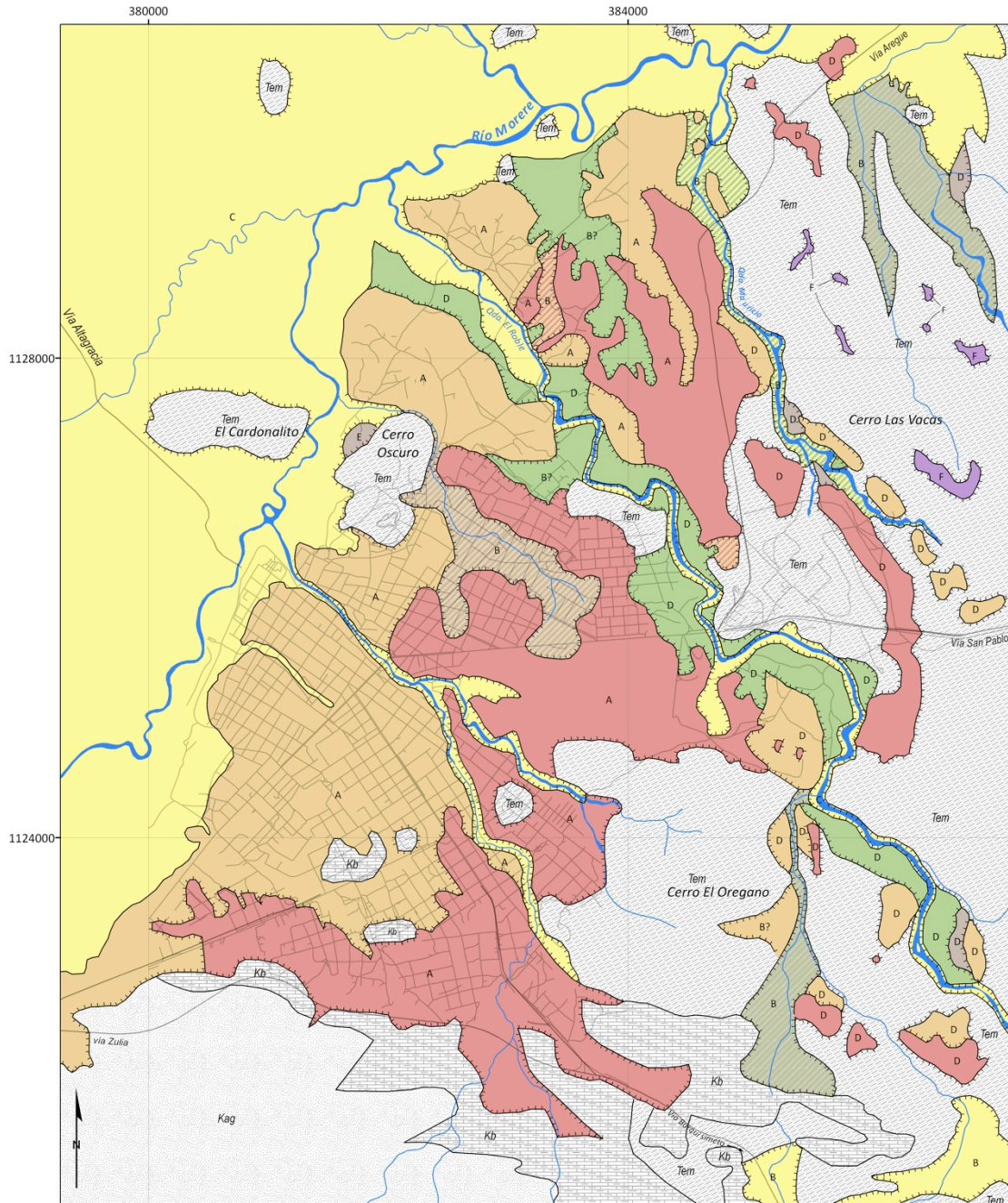


Fig. 5. Mapa geológico de la ciudad de Carora y alrededores.

La metodología para la elaboración del mapa de espesores de sedimentos se basa en el modelado gravimétrico a lo largo de perfiles 2D seleccionados según la disposición de las anomalías residuales obtenidas después de reprocesar 86 estaciones gravimétricas ordinarias gravimétricos adquiridos por MARTÍNEZ (2007) en el área urbana de Carora en la segunda fase de su estudio. Para la definición de la base de los sedimentos de edad Holoceno se utilizaron los resultados de las mediciones de ruido sísmico ambiental a partir de los periodos de vibración y de espesor sedimentario procesados e interpretados por PAOLINI (2006) así como de ReMi (espesores de sedimentos holocenos), de tal manera que en los perfiles se toman los respectivos valores de profundidad, y fuera de los perfiles se integran en la malla. La información de la figura 5 se utilizó para la re-interpretación de los perfiles ReMi y la definición de los sedimentos Holocenos así como para la interpretación de las diferentes unidades en los modelos gravimétricos.

Datos Gravimétricos

Para el momento de la realización de este trabajo solo existían modelos 2D y 3D, así como también mapas de espesor sedimentario regionales de la Cuenca de Carora

obtenidos a partir de dichos modelos (MARTÍNEZ 2007) (Figs. 3 y 4), por ello en este trabajo se reprocesaron las 86 estaciones gravimétricas adquiridas en el casco urbano de la ciudad de Carora durante el 2007, usando como nivel de referencia 464 m y una densidad de Bouguer del entorno de 2400 kg/m^3 , de donde se obtuvo el valor de la anomalía residual para cada una de ellas. A partir del valor de cada estación se realizó una interpolación por el método de vecinos naturales y se obtuvo un mapa de anomalía residual para la ciudad de Carora (Fig. 6).

Determinando y analizando los valores máximos y mínimos reflejados en el mapa, se definieron los perfiles gravimétricos a modelar. A partir de este mapa se obtuvieron las curvas de anomalía residual que serían modeladas con el software GM-SYS (Geosoft) en cada uno de los perfiles seleccionados anteriormente.

Una vez que en cada modelo gravimétrico se ajustó la curva de anomalía residual observada (provenientes del mapa generado a partir de las estaciones gravimétricas adquiridas) con la curva calculada por el modelo, se obtiene la interfase que separa a los sedimentos cuaternarios del basamento pre-cuaternario.

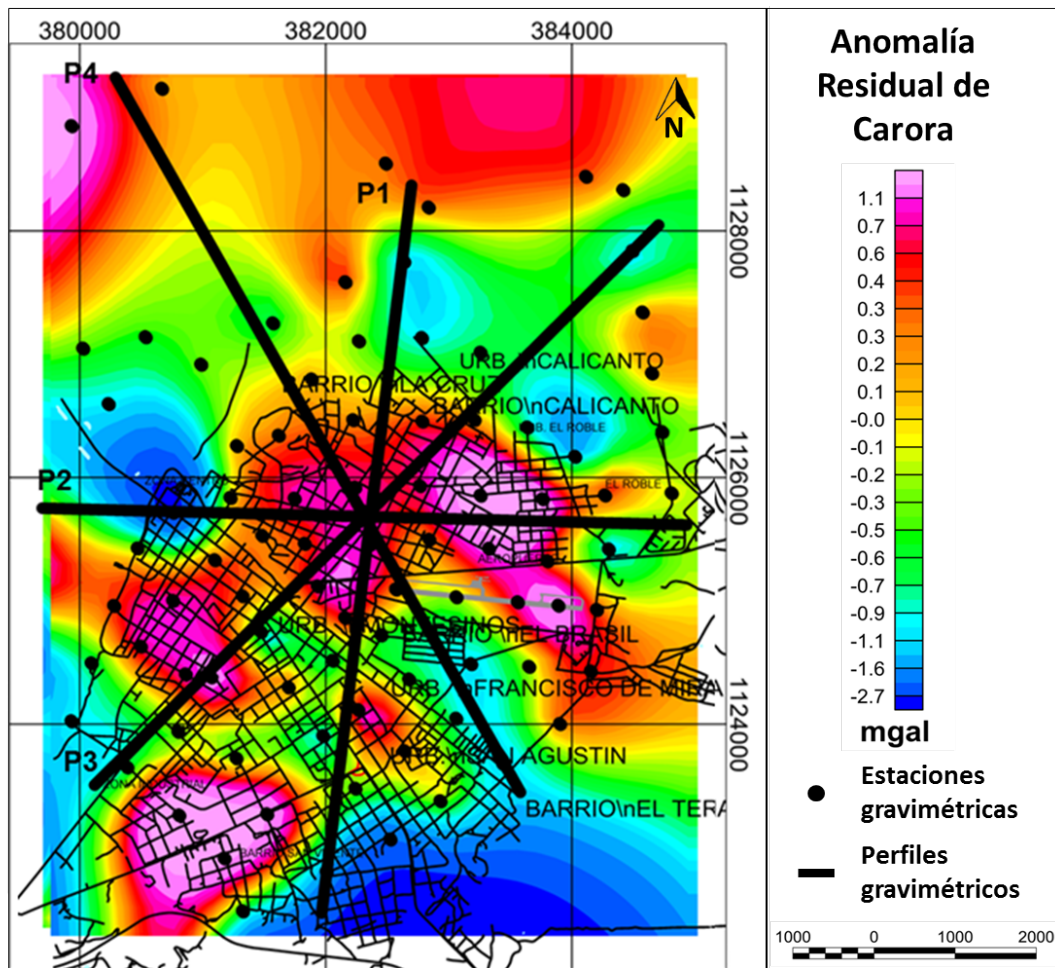


Fig. 6. Mapa de anomalía Residual del casco urbano de Carora. Ubicación de estaciones gravimétricas y ubicación de los perfiles de modelos gravimétricos P1-P4.

En esa interfase de cada uno de los perfiles gravimétricos modelados, se toman los valores de espesor sedimentario cada 250 m de longitud sobre dicho perfil, y se proyectan en superficie en donde se les asigna una coordenada geográfica (en este caso, proyección UTM WGS84 Zona 19 Norte), para que los mismos sean coherentes con la estructura de los otros conjuntos de datos geofísicos y de esa forma puedan ser integrados para generar el mapa final de espesores sedimentarios (Puntos rojos sobre líneas negras en la Fig. 7).

Integración de datos de ruido sísmico ambiental

Los datos de espesor sedimentario obtenidos de las estaciones de ruido sísmico ambiental que se encontraban más cercanos a los perfiles gravimétricos, o inclusive sobre ellos, fueron integrados directamente a los modelos gravimétricos generados en este trabajo, ajustando la profundidad de la interfase sedimento-roca sin perder el ajuste de la curva gravimétrica observada y la calculada. Mientras que los valores de espesor sedimentario obtenidos con ruido sísmico ambiental que se encontraban más alejados de los perfiles gravimétricos, se integraron de forma tal que formaron parte de la malla final de datos que sería interpolada, para finalmente obtener el mapa final de espesores sedimentario de Carora (círculos azules de la Fig. 7).

Integración de los datos de ReMi

Se integraron los resultados de la interpretación de 4 perfiles de ReMi obtenidos por DUQUE (2011), donde a partir del análisis de espectros de frecuencias, se obtienen valores de espesor sedimentario en cada uno de los perfiles adquiridos en la zona de estudio. Se asume que dichos valores representan los espesores sedimentarios en cada perfil de ReMi y por lo tanto cada valor se coloca en el punto central de cada uno de ellos (estrellas verdes sobre líneas verdes en figura 7). Los valores de espesores sedimentarios obtenidos a mediante esta técnica fueron integrados usando la misma metodología que se utilizó para integrar los valores de espesor sedimentario obtenidos con ruido sísmico ambiental, es decir, cuando los perfiles gravimétricos intersectaban algún perfil de ReMi, los datos de espesor eran integrados directamente sobre los modelos gravimétricos, mientras que cuando estaban lejos de los perfiles gravimétricos los valores de espesor sedimentario obtenidos a partir de ReMi fueron integrados a la malla final para generar el mapa de espesores sedimentarios de la ciudad Carora (Fig. 7).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modelado Gravimétrico

A partir de los datos finales de cada método geofísico (gravimetría, ReMi y ruido sísmico ambiental) se obtuvo una malla de estaciones con valores de espesor sedimentario con una separación aproximada de 250 m de longitud entre ellas. Con estos valores de espesor sedimentario se realizó

una interpolación por el método de “*Natural Neighbor*” que consiste en un mallado de regiones circundantes construida a partir de los datos originales (Fig. 7).

Como su nombre lo indica, está basado en la interpolación por vecinos naturales, haciendo uso de la “*triangulación de Delaunay*” y de su estructura dual o “*diagrama de Voronoi*” (CUETO *et al.* 2001). Una vez que los perfiles de datos gravimétricos fueron generados, se construyeron los cuerpos geológicos usando los valores de densidades utilizados por MARTÍNEZ (2007). Se manipularon las interfaces (aumentando o disminuyendo tanto espesores como densidades) entre los cuerpos para simular las estructuras geológicas observadas en el área de estudio y de esta forma lograr el mejor ajuste posible entre las curvas de anomalía calculada y anomalía observada.

De esta manera, a los modelos del subsuelo iniciales generados solamente a partir de los datos gravimétricos para la ciudad de Carora, se integraron los resultados de espesores sedimentarios obtenidos por DUQUE (2011), quien interpretó espesores sedimentarios a través del uso de ReMi, así como también valores de velocidad de ondas de corte. Las figuras 8 y 9 muestran los modelos gravimétricos del subsuelo generados para la ciudad de Carora integrando datos de ruido sísmico ambiental y datos de ReMi. Debido a la ubicación geográfica de la ciudad de Carora se observan afloramientos de formaciones pre-cuaternarias tanto hacia el este como hacia el sur de la misma.

En los modelos generados se observa la presencia de cuatro cuerpos geológicos identificados como: sedimentos cuaternarios con una densidad de 2000 kg/m^3 , la Formación Matatere con una densidad de 2325 kg/m^3 , la Formación Barquisimeto con 2500 kg/m^3 y la Formación Aguardiente de 2525 kg/m^3 .

Perfil 1

Hacia el norte del perfil se observa una acumulación de sedimentos interpretados como terrazas aluviales de edad Pleistoceno Superior (Q1) y abanicos de explayamiento de edad Pleistoceno Inferior (Q3). En la zona central del modelo, estos depósitos de edad Pleistoceno Medio a Inferior (Q2-3 y Q4) alcanzan un valor máximo de espesor sedimentario de 85 m (Figs. 6 y 8A). Estos espesores disminuyen hacia el sur hasta desaparecer aproximadamente en las cercanías de la urbanización San Agustín (Fig. 8A).

Se observa un afloramiento de la Formación Matatere aproximadamente a los 4770 m (en la zona de la urbanización San Agustín) en contacto con pequeños depósitos de sedimentos de abanicos de explayamiento del Pleistoceno Inferior (Q3) así como también un pequeño afloramiento de la Formación Barquisimeto un poco más hacia el sur del modelo. Hacia el sur del perfil también se observan dos depósitos de abanicos de explayamiento del Pleistoceno inferior (Q3 y Q4) que alcanzan un espesor máximo de 30 m.

Perfil 2

En este modelo se observa la presencia de solo 3 de los 4 cuerpos geológicos modelados en el área urbana de

Carora, esto se debe a que la Formación Aguardiente en este perfil se encuentra a una mayor profundidad (Fig. 8B).

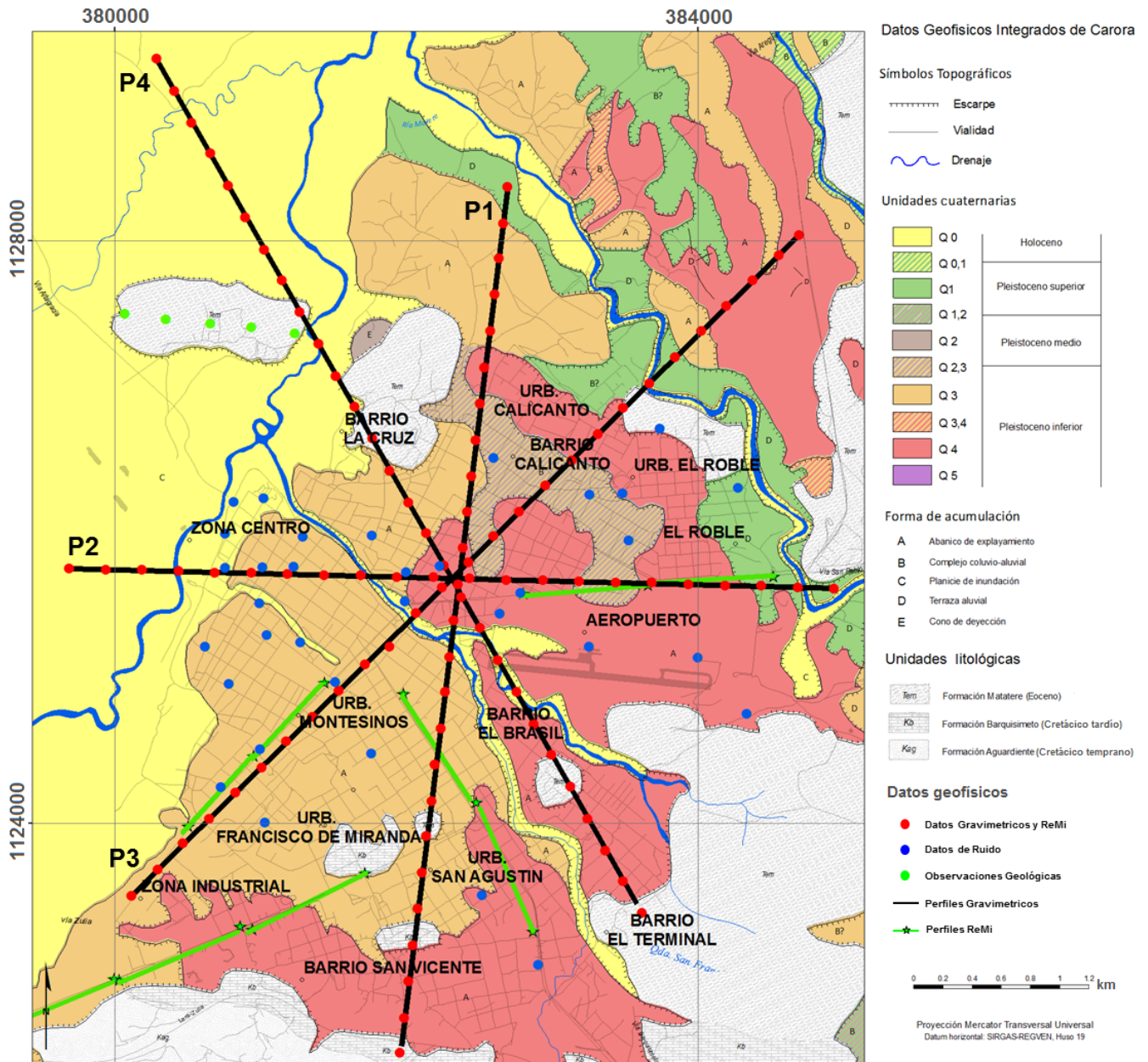


Fig. 7. Distribución de datos geofísicos y geológicos para la obtención de valores de espesor sedimentario en el casco urbano de la ciudad de Carora.

Hacia el oeste se observan depósitos de sedimentos en la planicie de inundación del río Morere de edad Holoceno (Q0), mientras que hacia la zona central del perfil se observan los mayores espesores de sedimentos interpretados como abanicos de explayamiento de edad Pleistoceno Inferior (Q2-3, Q3 y Q4) alcanzando un máximo de 75 m. Hacia el extremo este del modelo encontramos nuevamente espesores sedimentarios que alcanzan los 70 m y que se interpretan como la planicie de inundación de la quebrada El Roble de edad Holoceno (Q0) en la zona cercana al Fuerte Manaure sobre terrazas aluviales del Pleistoceno

superior (Q1). Un poco más hacia el este del perfil se observa el afloramiento de la Formación Matatere, hacia el este de la urbanización El Roble en contacto con terrazas aluviales del Pleistoceno Superior (Q1) (Fig. 8B).

Perfil 3

Al igual que en el Perfil 2, en este se observan solo 3 cuerpos geológicos: los sedimentos Cuaternarios, la Formación Matatere y la Formación Barquisimeto (Fig. 9A).

A lo largo de casi todo el perfil se observa una acumulación de sedimentos poco consolidados. Estos

sedimentos interpretados como abanicos de explayamiento del Pleistoceno Inferior (Q3) alcanzan su máximo espesor al suroeste del perfil con 120 m en la zona cercana a la

urbanización Montesinos (Fig. 9A). Este valor de espesor de sedimentos cuaternarios representa el máximo interpretado mediante datos geofísicos en la ciudad de Carora.

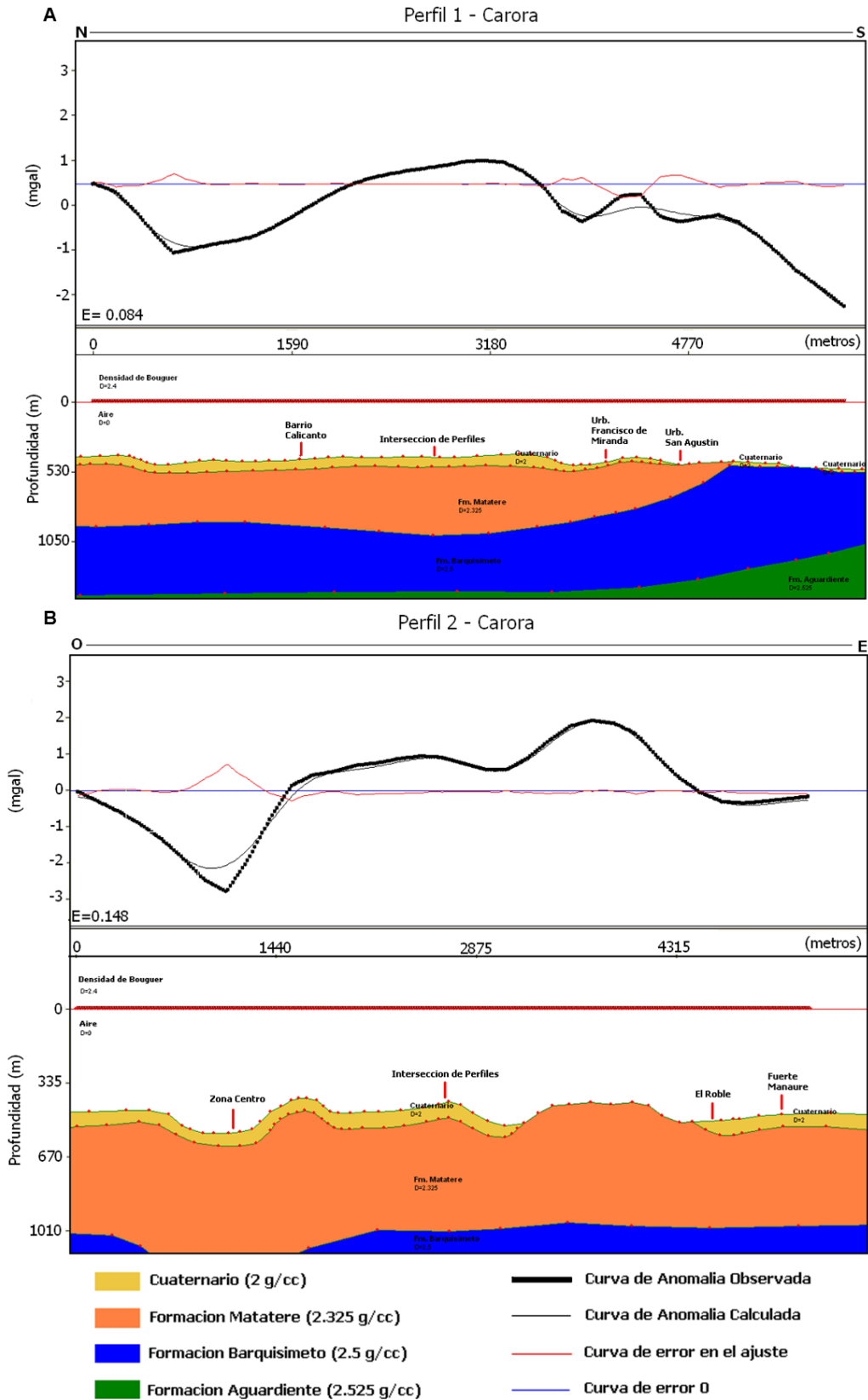


Fig. 8. Modelos gravimétricos del subsuelo de Carora generado con la integración de datos ReMi y ruido sísmico ambiental. A) Perfil 1 y B) Perfil 2.

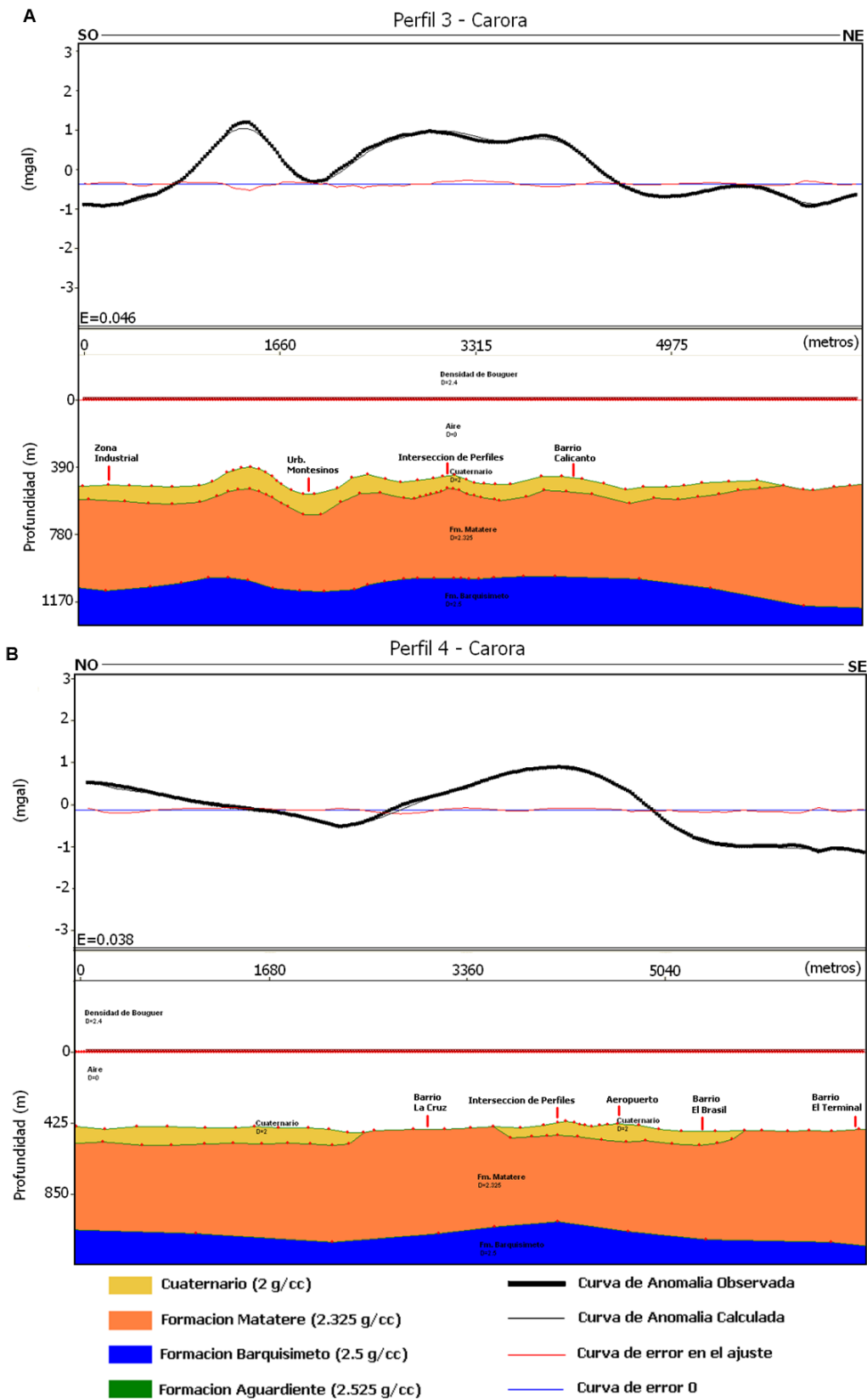


Fig. 9. Modelos del subsuelo de Carora generado con la integración de datos gravimétricos, ReMi y ruido sísmico ambiental. A) Perfil 3 y B) Perfil 4.

Hacia la zona central del modelo, en las zonas cercanas al barrio Calicanto, se observan espesores de sedimentos de complejos coluvio-aluviales de edad Pleistoceno Medio a Inferior (Q2-3) (Figs. 6 y 9A).

Hacia el noreste del perfil se observa la disminución del espesor sedimentario debido a la proximidad de afloramientos de la Formación Matetere al este de Carora. En esta zona del perfil se interpreta poco espesor de sedimentos de abanicos de explayamiento de edad Pleistoceno Inferior (Q3 y Q4) que se encuentran en contacto con los afloramientos rocosos antes mencionados.

Perfil 4

En este perfil se observan acumulaciones sedimentarias separadas entre sí por un afloramiento de la Formación Matetere, este afloramiento se conoce como Cerro La Cruz, y es una de las zonas de mayor elevación dentro de la ciudad de Carora (Fig. 9B).

Los mayores espesores sedimentarios relacionados con la planicie de inundación del río Morere de edad Holoceno (Q0) se encuentran hacia el noroeste de este perfil, y alcanzan un valor máximo de 100 m de profundidad, que corresponde al extremo sureste de la cuenca de Carora. Estos valores van disminuyendo hacia el sureste del perfil hasta las zonas cercanas a Cerro la Cruz. Luego, en dirección sureste, se observan espesores de sedimentos interpretados como abanicos de explayamiento de edad Pleistoceno inferior en zonas cercanas al aeropuerto de Carora y el barrio El Brasil (Q3 y Q4), que alcanzan los 100 m (Figs. 6 y 9B)

Hacia el sureste del perfil se observa nuevamente un afloramiento de la Formación Matetere que corresponde al inicio de la cadena de afloramientos pre-cuaternarios que se encuentran al sur y al este de la ciudad de Carora en donde está el barrio El Terminal.

El error calculado entre las curvas de anomalía observada y anomalía calculada para los 4 modelos del subsuelo tiene un promedio de 8%, esto sugiere que las estructuras geológicas propuestas en dichos modelos, se ajustan de manera satisfactoria a las anomalías gravimétricas observadas a lo largo de toda la ciudad de Carora (Figs. 8A, 8B, 9A y 9B)

Mapa de espesores sedimentarios

Para la estimación de espesores sedimentarios se toman en cuenta solamente los sedimentos cuaternarios, debido a que los estratos terciarios y cretácicos, a pesar de ser igualmente sedimentarios, se considera que por su mayor compactación no generan un aporte significativo en la modificación de las ondas sísmicas (amplificación de las bajas frecuencias y atenuación de las altas frecuencias) en lo que se conoce como efecto de cuenca (ROCABADO *et al.* 2006, SCHMITZ *et al.* 2009a y 2009b).

A partir de los modelos del subsuelo integrados (modelos gravimétricos integrados con datos de ruido sísmico ambiental y de ReMi), se midieron valores de espesor de sedimentos cada 250 m a lo largo de dichos modelos y se le asignó la coordenada correspondiente en

superficie, obteniendo así valores puntuales distribuidos en todos los perfiles. Además, la malla generada fue densificada con los valores de espesores obtenidos a través de las estaciones de ruido sísmico ambiental adquiridas, procesadas e interpretadas por PAOLINI (2006) que se encontraban más alejadas de los perfiles mencionados anteriormente (Figura 6, círculos azules). A partir de esta malla de datos espaciados aproximadamente cada 250 m se realizó una interpolación a través del método de "Natural Neighbor" (CUETO *et al.* 2001), para de esta forma obtener el mapa de espesor de sedimentos para la ciudad de Carora (Fig. 10).

La Fig. 10 muestra los puntos con valores de espesor sedimentario que fueron obtenidos a partir de las diferentes técnicas geofísicas, además de observaciones geológicas directas en campo. Los mayores espesores sedimentarios se tienen hacia el norte y noroeste de la ciudad relacionados con la cuenca sedimentaria del río Morere. Los menores espesores están relacionados con los afloramientos pre-cuaternarios presentes en los alrededores, e inclusive dentro del casco urbano de Carora como por ejemplo en la zona de barrio La Cruz, urbanización El Roble y barrio El Terminal.

Estos cambios de espesor sedimentario son relativamente suaves, ya que Carora se encuentra ubicada en el borde suroriental de la cuenca de Carora. El casco urbano de la ciudad está asentado sobre los sedimentos que se encuentran en contacto con los afloramientos terciarios y cretácicos que rodean a la cuenca hacia el sur y hacia el este (Fig. 5).

Mapa Vs30

El concepto de Vs30 se refiere a la velocidad de las ondas de corte en los primeros 30 m de profundidad en el subsuelo (COVENIN 2001). Generalmente el valor de Vs es un parámetro utilizado para el diseño de construcción de estructuras sismo-resistentes. Para generar el mapa Vs30 de la zona de estudio se utilizó el modelo de elevación digital SRTM cada 90 m/pixel (CGIAR-CSI 2004). Luego, se cambió la resolución de dicho mapa a una resolución de 300 m/pixel, la cual es requerida por la rutina del programa ArcGIS que genera las pendientes de la topografía, y finalmente obtener el mapa Vs30 cuyos valores son calculados a partir de las elevaciones topográficas usando aproximaciones polinomiales (ALLEN & WALD 2009, MORALES *et al.* 2011). A partir de esta malla de datos, se realizó una interpolación a través del método de "Natural Neighbor" (CUETO *et al.* 2001). Las mayores velocidades de corte en los primeros 30 m del subsuelo (Vs30) se observan hacia el sur y hacia el este del casco urbano de la ciudad de Carora, es decir hacia las zonas de Santa Lucía y Cerro Verde que coinciden con afloramientos de las formaciones Barquisimeto y Aguardiente de edad Cretácico, así como también hacia las zonas cercanas al barrio El Terminal y el Hospital en donde se observan afloramientos de la Formación Matetere de edad Terciaria. Hacia el norte del aeropuerto, la zona que se encuentra entre la urbanizaciones San Agustín y Francisco de Miranda en dirección hacia el centro de la ciudad y las zonas cercanas a Cerro La Cruz, se

observan pequeños afloramientos de la Formación Matatere de poco relieve cuyos valores V_{s30} están entre 330 – 350 m/s (Fig. 11).

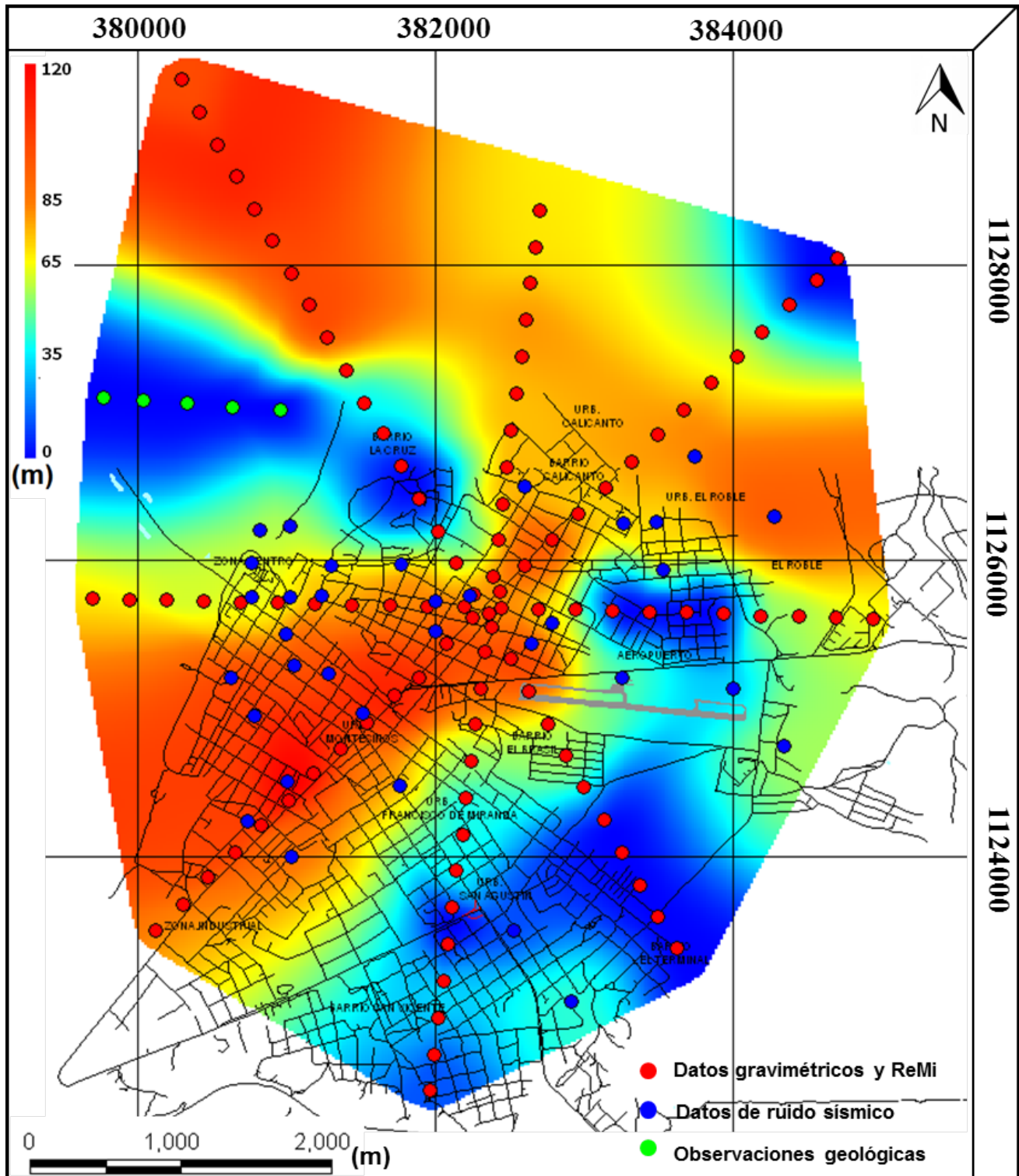


Fig. 10. Mapa de espesor de sedimentos generado a partir de datos geofísicos y geológicos adquiridos en la ciudad de Carora. (Proyección UTM WGS84 Zona 19 norte).

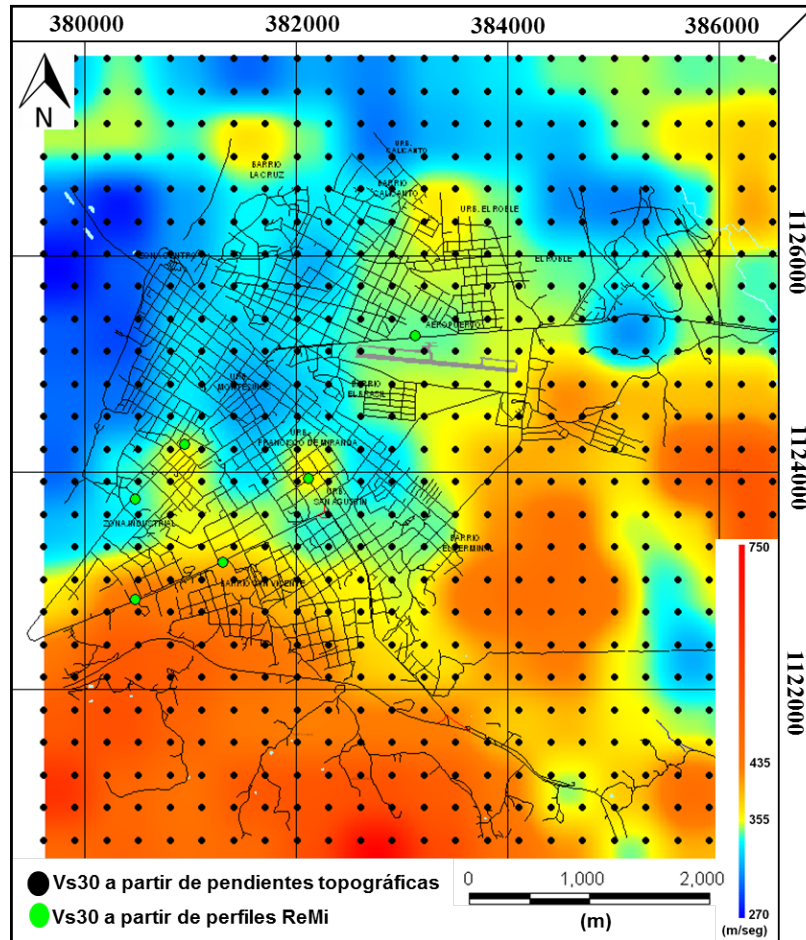


Fig. 11. Mapa Vs30 generado a través del modelo digital de elevación de la ciudad de Carora. (Proyección UTM WGS84 Zona 19 norte).

Los menores valores de Vs30 (<300 m/s) son observados hacia el norte y límite noroeste de la ciudad de Carora, más específicamente, proximo a la urbanización Montesinos, la urbanización Calicanto y la zona colonial de Carora, lo que indica que a partir de allí y hacia el noroeste, los sedimentos son menos consolidados y coincide con la profundización de la cuenca de Carora (Fig. 11).

Mapa de Microzonas sísmicas de Carora

Para generar el mapa de microzonas sísmicas utilizando como parámetros el espesor sedimentario y los valores de Vs30 de la zona, se tomaron como valores límites los usados para la definición de las microzonas en las ciudades de Caracas, Barquisimeto y Cabudare (Tabla 1). Los valores mínimos y máximos de ambos parámetros de la ciudad de Carora son 0 m - 120 m de espesor sedimentario y 270 - 500 m/s de Vs30. El máximo valor de Vs30 se observa al sur y sureste de Carora en donde afloramientos pre-cuaternarios están presentes (Figs. 5 y 11). Usando la tabla 1 (SCHMITZ *et al.* 2009a), se obtienen 4 microzonas diferentes descritas a continuación (Fig. 12).

Zona uno: Es la zona que ocupa la mayor superficie en la ciudad de Carora. En ella se encuentra la parte sureste del barrio La Cruz, sur del barrio El Brasil y este de la urbanización San Agustín. Está definida por espesores de sedimentos menores a 60 m y Vs30 mayores a 325 m/s. Estas zonas generalmente coinciden con los lugares donde se observan los afloramientos de formaciones pre-cuaternarias de la ciudad o muy cercanos a ellos (Fig. 12).

Tabla 1. Rangos de Profundidades y Vs30 establecidos para las microzonas sísmicas de las ciudades de Caracas y Barquisimeto (SCHMITZ *et al.* 2009a, SCHMITZ *et al.* 2009b). A partir de allí se definieron los rangos para las microzonas de Carora.

Profundidad (m)	Vs30 (m/s)
< 185	< 60
185 - 325	60 - 120
325 - 650	120 - 220
> 650	> 220

diferentes unidades del Cuaternario que se observan en la ciudad. Para la definición de las microzonas se utilizaron los mismos valores límites usados en la definición de las microzonas sísmicas para las ciudades de Caracas, Barquisimeto y Cabudare (SCHMITZ *et al.* 2009a, SCHMITZ *et al.* 2009b).

Los datos geológicos recopilados fueron de gran importancia para definir las estructuras geológicas propuestas en los modelos gravimétricos, así como también, para la definición de los límites de la microzona sísmica 1 al noroeste de la ciudad de Carora, debido a que con los datos geofísicos no se logró la cobertura necesaria en dicha zona.

El Mapa de valores Vs30 generado para el casco urbano de la ciudad de Carora se obtuvo a través de las pendientes observadas en el modelo digital de elevación y usando aproximaciones polinomiales tal como se realizó en el área metropolitana de Caracas (MORALES *et al.* 2011). Estos datos fueron integrados con los valores Vs30 obtenidos en los perfiles ReMi interpretados por DUQUE (2011). El mapa resultante guarda una buena coherencia con las observaciones geológicas realizadas en el casco urbano de la ciudad de Carora, en donde los valores de mayor velocidad se encuentran en las zonas cercanas a los afloramientos pre-cuaternarios, y las zonas de menor velocidad en las zonas de sedimentos poco consolidados del Cuaternario.

Para la ciudad de Carora el espesor de sedimentos tiene valores que varían entre 0 m y 120 m y velocidades de propagación de ondas sísmicas Vs en los primeros 30 m de profundidad entre 270 m/s y 600 m/s. Como es de esperarse, los espesores sedimentarios de esta ciudad son relativamente menores en comparación con las ciudades de Caracas, Barquisimeto y Cabudare (SCHMITZ *et al.* 2009a; 2009b). Esto se debe principalmente a la ubicación geográfica de Carora, la cual se encuentra en el extremo suroriental de la cuenca homónima.

Por la configuración de los sedimentos de la ciudad, los cuales no superan los 120 m de espesor, no se esperan efectos de cuenca, tales como han sido observados en la ciudad de Caracas (PAPAGEORGIOU & KIM 1991, DELAUAUD 2007, ROCABADO *et al.* 2006).

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Gobernación del Estado Lara por su aporte en el convenio firmado con FUNVISIS “Microzonificación Sísmica municipios Morán (Tocuyo) y Torres (Carora)”. A la Alcaldía del Municipio Pedro León Torres por la colaboración prestada durante el reconocimiento geológico de la ciudad de Carora, especialmente al Geógrafo Luis Riera en el marco del convenio FUNVISIS - Alcaldía de Torres. A otros integrantes del proyecto: los ingenieros Cecilio Morales, Mónica Paolini y Jélimé Aray por su colaboración en la administración y aporte de datos esenciales en esta investigación. Al ingeniero Jesús Alberto Moncada por su asesoría en lo referente al procesamiento e interpretación de los datos gravimétricos. Al Dr. André Singer por su asesoría en el estudio de unidades cuaternarias de la Cuenca de

Carora. Al Dr. Franco Urbani por su asesoría en lo referente a los contactos pre-cuaternarios existentes en la zona de estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- ABEKI N., T. ENOMOTO, T. GUEVARA & Z. VILLEGAS. 1995. Fundamental concept for Seismic microzonation and preliminary surveys of microtremor observations in Caracas and Cumaná City, Venezuela. *II Coloquio Internacional sobre “Microzonificación Sísmica” y V Reunión de Cooperación Iberoamericana*. Cumana, Venezuela, 12 al 16 de junio.
- ALLEN T. I. & D. J. WALD. 2009. On the Use of High-Resolution Topographic Data as a Proxy for Seismic Site Conditions (Vs30). *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 99, No. 2A, pp. 935–943
- AUDEMARD F. A., A. SINGER & J. A. RODRIGUEZ. 1998. *Estudio de neotectónica y geología de fallas activas del triángulo de fallas de Boconó-Oca-Ancón y Valera*. FUNVISIS, informe inédito para INTEVEP, 138 p. + mapa 1:250.000.
- AUDEMARD F. A., A. SINGER, L. ACOSTA & R. GONZÁLEZ 2007. La falla de Burbusay (bloque de Maracaibo, Venezuela occidental): accidente activo sinistral submeridiano. Departamento de Ciencias de la Tierra, FUNVISIS. Caracas. En: *IX Congreso Geológico Venezolano, 2007*, CD-ROM. Caracas-Venezuela.
- BAQUERO M., J. KASSABJI, J. ZAMORA, J. SOUSA, J. RODRÍGUEZ, J. GROBAS, L. MELO & F. SCHNEIDER. 2009. Polyphase development of the Falcón basin in northwestern Venezuela: Implications for oil generation. En: K. H. James, M. A. Lorente, & J. L. Pindell (eds). *The Origin and Evolution of the Caribbean Plate*, *Geological Society*, London, Special Publications 328: 587-612.
- BELLIZZIA A. & D. RODRÍGUEZ. 1966. Guía de la excursión a la región de Duaca-Barquisimeto-Bobare. *Asoc. Venez. Geol., Min. y Petról.*, Guía N° 4, 23 pp.
- CGIAR-CSI - Consortium for Spatial Information 2004. SRTM 90m Digital Elevation Data. Global Consortium <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>. Consulta 3 de Mayo de 2012.
- COPLANARH - Comisión Del Plan Nacional De Aprovechamiento De Los Recursos Hidráulicos. 1975. *Estudio geomorfológico de las regiones costa noroccidental, centro occidental y central (Sistema Montañoso Noroccidental)*. Publicación N° 44 (informe + mapas).
- COVENIN 2001. Edificaciones Sismorresistentes. Norma COVENIN 1756:2001, Venezuela.
- CUETO E., M. MARTÍNEZ & M. DOBLARE. 2001. El método de los elementos naturales basado en formas f en elasticidad compresible y cuasi incompresible. *IMME*.

- [online]. nov. 2001, vol.39, no.3 [citado 04 Septiembre 2006], p.56-76. Disponible en la World Wide Web: <http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0376-723X2001000300004&lng=es&nrm=iso>. ISSN 0376-723X.
- DELAUVAUD É. 2007. *Simulation numérique de la propagation d'ondes en milieux géologiques complexes: application à l'évaluation de la réponse sismique du bassin de Caracas*. Thèse de Doctorat, IPGP, France, 155 pp.
- DUQUE M. E. 2011. *Caracterización de los sedimentos en Duaca, Tamaca, Carora, Quibor y El Tocuyo, Estado Lara, aplicando el método ReMi*. Tesis (Ingeniero Geofísico). Caracas, Venezuela. Universidad Simón Bolívar. 135 p.
- DUVAL A., J. MENDOZA, J. MÉNEROUD, F. PRIDA, F. DE SANTIS, A. SINGER & S. VIDAL. 1995. Experimental Microzonation in Venezuela. *Fifth International Conference on Seismic Zonation (Vol. III)*. Nice, Francia. Octubre 17 al 19 de 1995. EERI. pp. 2227-2234.
- GÓMEZ A. 2012. *Integración geológica de la región Carora-Padre Diego, edo. Lara, con énfasis en la Formación Matatere y sus contactos*. TEG (Escuela de Geología, Minas y Geofísica). Universidad Central de Venezuela, Caracas. 142 p. + anexos.
- MARTÍNEZ C. 2007. *Análisis espectral y modelado 3d de datos Gravimétricos de la cuenca de Carora, estado Lara-Venezuela*. TEG (Escuela de Geología, Minas y Geofísica). Caracas, Venezuela. Universidad Central de Venezuela. 185 p.
- MONCADA J., J. ÁVILA, E. AMARIS, C. REINOZA, M. SCHMITZ. 2006. *Mediciones gravimétricas en un área ubicada entre las poblaciones de Carora, Estado Lara y Tupure, Estado Falcón*. Informe Técnico Confidencial, FUNVISIS-PDVSA Intevep, 94p.
- MORALES C., J. HERNÁNDEZ, M. SCHMITZ, V. CANO & M. TAGLIAFERRO. 2011. Velocidades promedios de ondas de corte en los primeros 30 m de profundidad (Vs30) inferidas a partir del relieve en el área metropolitana de Caracas. *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, Vol. 26, N° 2, pp. 5-6.
- OROPEZA J. 2012. Estudio de amenazas naturales en la cuenca de Carora, edo. Lara, con fines de microzonificación sísmica. Informe Interno FUN-067/2012. FUNVISIS. 68 p + 5 anexos.
- PAOLINI M. 2006. *Análisis de los Periodos Fundamentales del Suelo en la Ciudad de Carora, Municipio Torres, Estado Lara*. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Geofísica. Universidad Simón Bolívar. Caracas-Venezuela. 97 p.
- PAPAGEORGIOU A. & J. KIM. 1991. Study of the propagation and amplification of seismic waves in Caracas valley with reference to the 29 July 1967 earthquake: SH waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 81, No. 6, pp. 2214-2233.
- ROCABADO V. 2000. *Periodos fundamentales del suelo de la ciudad de Caracas a partir de mediciones de ruido ambiental*. TEG (Escuela de Geología, Minas y Geofísica). Caracas, Venezuela. Universidad Central de Venezuela. 82 p.
- ROCABADO V., M. SCHMITZ, J. GONZÁLEZ, F. AUDEMARD, L. ANDRADE, A. VILORIA, R. ROJAS, T. ENOMOTO, N. ABEKI & J. DELGADO. 2002. Seismic microzoning study in Barquisimeto, Venezuela. *12th European Conference on Earthquake Engineering*. Londres. Septiembre 9-13. 7 P.
- ROCABADO V., M. SCHMITZ, H. RENDÓN, J. P. VILOTTE, F. AUDEMARD, M. SOBIESIAK, J. P. AMPUERO & L. ALVARADO. 2006. Modelado numérico de la respuesta sísmica 2D del Valle de Caracas. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V.*, 21 (4): 81-93.
- SCHMITZ, M., J. HERNÁNDEZ, C. MORALES, M. TAGLIAFERRO, M. VALLÉ, V. LEAL & el GRUPO DE TRABAJO DEL PROYECTO DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE CARACAS, 2009a. *Informe Técnico Final, Volumen 1 Caracas, proyecto de Microzonificación Sísmica en las ciudades de Caracas y Barquisimeto*. (FONACIT 200400738), FUNVISIS – FUN 035a-2007, Inédito, 978 pp.
- SCHMITZ M., J. HERNÁNDEZ, K. GARCÍA, V. LEAL, V. ROCABADO, C. REINOZA, & el GRUPO DE TRABAJO DEL PROYECTO DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE BARQUISIMETO. 2009b. *Informe Técnico Final, Volumen 2 Barquisimeto - Cabudare, proyecto de Microzonificación Sísmica en las ciudades de Caracas y Barquisimeto*. (FONACIT 200400738), FUNVISIS – FUN 035a-2007, Inédito, 978 pp.
- STEPHAN J. 1977. El contacto cadena Caribe – Andes Merideños entre Carora y El Tocuyo (Edo. Lara): Observaciones sobre el estilo y la edad de las deformaciones cenozoicas en el occidente Venezolano. *V Congreso Geológico Venezolano*, Caracas, p. 789-816.
- STEPHAN J. 1982. *Evolution Géodynamique du domaine Caraïbe Andes et Chaîne Caraïbe sur la Transversale de Barquisimeto (Venezuela)*. Tesis PhD, Universidad Pierre et Marie Curie, 512 p.
- URBANI F. & D. MENDI. 2011. Notas sobre la discordancia del margen sur de la cuenca oligo-miocena de Falcón, estados Lara, Falcón y Yaracuy, Venezuela. *Bol. Acad. C. Fis., Mat. Y Nat.* 60(4): 9-25.