

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN DE SUELOS
UTILIZANDO INFORMACION GEOFISICA Y GEOCTENICA EN
MARACAY, ESTADO ARAGUA**

Trabajo Especial de Grado

Presentado ante la Ilustre

Universidad Central de Venezuela para

Optar al título de Ingeniero Geofísico

Por el Br Freyder Ali Castillo

Caracas, agosto 2021.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN DE SUELOS UTILIZANDO INFORMACION GEOFISICA Y GEOCTENICA EN MARACAY, ESTADO ARAGUA

Tutor académico: Dr. Michael Schmitz

Trabajo Especial de Grado

Presentado ante la Ilustre

Universidad Central de Venezuela para

Optar al título de Ingeniero Geofísico

Por el Br. Freyder

Caracas, agosto 2021

Caracas, 02 de agosto de 2021

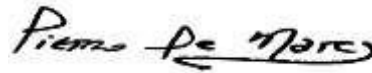
Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el **Br. Freyder Ali**, titulado:

“EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN DE SUELOS UTILIZANDO INFORMACION GEOFISICA Y GEOCTENICA EN MARACAY, ESTADO ARAGUA”

consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducentes al título de Ingeniero Geofísico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas del autor, lo declaran **APROBADO**.



Prof. Michael Schmitz
Tutor Académico



Prof. Pietro De Marco
Jurado



Prof. Víctor León
Jurado

DEDICATORIA

A todas aquellas personas que influyeron de alguna manera u otra en la culminación de mi carrera universitaria: familia, amigos, profesores, lugares, momentos...

AGRADECIMIENTO

A dios

A mi familia

A mis compañeros

A la ilustre Universidad Central de Venezuela

“Evaluación del potencial de licuación de suelos utilizando información geofísica y geotécnica en Maracay, estado Aragua”

Autor: Freyder Ali

Tutor académico: Dr. Michael Schmitz

Palabras claves: Fenómeno de Licuación, Método Simplificado de Seed e Idriss, Lago de Valencia, SPT, Vs30, Vs30 Topográfico, Periodo, Espesor de Sedimentos, Nivel Freático.

RESUMEN

La ciudad de Maracay estado Aragua ubicada en la cuenca del Lago de Valencia entre la Cordillera de la Costa al norte y la Serranía del Interior al sur ha sido objeto de varios estudios de efectos de sitio en las últimas décadas a través de diversas metodologías, obteniendo parámetros como el Vs 30, periodo, profundidad de basamento, entre otros, sin embargo, el fenómeno de licuación, un importante efecto de sitio, no ha sido estudiado completamente en la ciudad, por lo que el principal objetivo de este proyecto de investigación es proponer la localización de suelos con potencial de licuación en la ciudad de Maracay. Para calcular el factor de seguridad de licuación se aplicó el método simplificado de Seed e Idriss (1982) con el que se puede calcular el potencial de licuación del suelo a través de variables geotécnicas como: número de golpes de SPT, profundidad del nivel freático, porcentaje de partículas finas, peso unitario, etc. Integrando los resultados de perforaciones geotécnicas y su análisis con la información geofísica se aprecia que las perforaciones con alto potencial de licuación coinciden con las zonas de menores Vs30 y cuando se relaciona con la geología se observa que coincide con suelos con presencia de caracolillo. Integrando esta información se generó un mapa de potencial de licuación de la ciudad de Maracay en donde las zonas con alto y moderado potencial de licuación se encuentran hacia el sur de Maracay cerca de la costa del Lago de Valencia y las zonas con bajo potencial y sin licuación se encuentran hacia el centro y norte de la ciudad.

INDICE GENERAL

| | |
|-------------------------------------|------|
| DEDICATORIA..... | iii |
| AGRADECIMIENTO | v |
| RESUMEN..... | vi |
| INDICE GENERAL | vii |
| INDICE DE FIGURAS | xiii |
| INDICE DE TABLA | xvi |
| CAPITULO I..... | 17 |
| INTRODUCCION..... | 17 |
| 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 19 |
| 1.2 OBJETIVOS..... | 20 |
| 1.2.1 Objetivo general: | 20 |
| 1.2.2 Objetivos específicos..... | 20 |
| 1.3 JUSTIFICACIÓN..... | 21 |
| 1.4 UBICACIÓN..... | 22 |
| 1.5 ANTECEDENTES | 23 |
| CAPÍTULO II..... | 30 |
| MARCO GEOLÓGICO | 30 |

| | |
|--|----|
| 2.1 Geología regional | 32 |
| 2.2 Litología regional | 33 |
| 2.3 Geología estructural..... | 36 |
| 2.3.1 Sistema de Fallas La Victoria..... | 36 |
| 2.4 El Lago de Valencia | 38 |
| 2.5 Cambios en el nivel del Lago de Valencia según Peeters (1968)..... | 39 |
| 2.6 Geología local (Suelos de Maracay)..... | 40 |
| 2.7 El fenómeno de licuación en Venezuela | 41 |
| CAPÍTULO III | 42 |
| MARCO TEÓRICO | 42 |
| 3.1 Ondas mecánicas | 42 |
| 3.2 Ondas sísmicas | 42 |
| 3.2.1 Ondas corpóreas | 43 |
| 3.2.2 Ondas superficiales:..... | 44 |
| 3.2.2.1 Ondas Love (L): | 44 |

| | |
|---|----|
| 3.2.2.2 Ondas Rayleigh (R): | 44 |
| 3.3 Dispersión de ondas..... | 45 |
| 3.4 Método de ondas superficiales | 46 |
| 3.5 VS 30 | 46 |
| 3.6 Determinación de Vs30 a partir de datos topográficos..... | 46 |
| 3.7 Efectos de sitio | 47 |
| 3.8 Microtremores | 47 |
| 3.9 Interferometría sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales..... | 47 |
| 3.10 Refracción por Microtremores, ReMi | 48 |
| 3.11 Ensayo de Penetración Estándar (SPT) | 48 |
| 3.12 Clasificación de suelos según norma COVENIN 1756 (2001) | 50 |
| 3.13 Fenómeno de licuación del suelo..... | 51 |
| 3.13.1 Factores que inciden en la ocurrencia del fenómeno de licuación del suelo..... | 52 |
| 3.13.2 Evaluación de riesgo de licuación | 55 |

| | |
|--|----|
| 3.13.3 Métodos para evaluar el riesgo de Licuación: | 55 |
| 3.13.4 Métodos basados en el número de golpes SPT para evaluar el potencial de licuación de un suelo | 56 |
| Corrección por escala de magnitud de sismo | 63 |
| Correcciones por altos esfuerzos de sobrecarga y esfuerzos de corte estático | 64 |
| Corrección por Esfuerzos de Confinamiento Elevados ($K\sigma$) | 65 |
| Corrección para condiciones del terreno en pendiente ($K\alpha$) | 66 |
| CAPÍTULO IV | 67 |
| MARCO METODOLÓGICO | 67 |
| 4.1 Información previa | 67 |
| 4.1.1 Datos de ruido sísmico | 67 |
| 4.1.1.1 Datos de ReMi e IMASW | 67 |
| 4.1.1.2 Datos de relación espectral H/V | 69 |
| 4.1.2 Perforaciones geotécnicas..... | 69 |
| 4.2 Procesamiento..... | 73 |

| | | |
|---|--|-----|
| 4.2.1 | Calculo de Vs a partir de SPT | 73 |
| 4.2.2 | Calculo del parámetro Vs30 | 74 |
| 4.2.3 | Mapa de Vs30 basado en el análisis de la topografía | 76 |
| 4.3 | Potencial de licuación de suelo..... | 78 |
| CAPITULO V | | 85 |
| RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS | | 85 |
| 5.1 | Características geofísicas y geotécnicas de la ciudad de Maracay | 86 |
| 5.1.1 | Mapa de espesor de sedimentos..... | 86 |
| 5.1.2 | Mapa de Isoperiodos..... | 87 |
| 5.1.5 | Mapa de Vs30 basado en metodologías N-SPT-VS | 95 |
| 5.1.6 | Comparación Vs30 por metodologías geofísicas y geotécnicas..... | 97 |
| 5.1.7 | Mapa de Vs30 Integrado | 97 |
| 5.2 | Licuación de suelos en Maracay..... | 100 |
| CONCLUSIONES..... | | 117 |
| RECOMENDACIONES | | 118 |

| | |
|----------------------------------|-----|
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 119 |
| APÉNDICE | 128 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1. Ubicación de la zona de estudio. Tomada de Arcgis 10.4. | 22 |
| Figura 1.5.1 Mapa de distribución por rango de períodos de la ciudad de Maracay, Estado Aragua. (Rojas 2008)..... | 24 |
| Figura 1.5.2. Mapa datos Vs30 ReMi y Vs30 por topografía. (Casalena, 2011). | 26 |
| Figura 1.5.3 Mapa de espesor sedimentario en la ciudad de Maracay Estado Aragua (Ornelas, 2018)..... | 27 |
| Figura 1.5.4. Mapa de VS30 obtenido a través de la metodología IMASW en la ciudad de Maracay Estado Aragua (Escobar, 2019). | 28 |
| Figura 1.5.5. Mapas de potencial de licuación para las parroquias estudiadas por (Hidalgo y Paredes, 2015). | 29 |
| Figura 2.1. Mapa geológico de la zona de estudio modificado de Hackley et al (2006)..... | 31 |
| Figura 2.2: Ubicación y extensión de las Fajas Tectónicas. (Tomado y modificado de Menéndez (1966))..... | 33 |
| Figura 2.3 Fallas activas de la región central del país (Schmitz <i>et al</i> 2015). | 37 |
| Figura 2.4. Mapa de las extensiones que ha tenido el Lago de Valencia de acuerdo a Peeters 1968. Tomado de Hernández 2006..... | 40 |
| Figura 3.1. Movimiento de las partículas asociado a las ondas sísmicas. (a) Compresivas (b) Cizalla. (Grotzinger y Jordan 2010). | 43 |
| Figura 3.2. Ondas superficiales: ondas Rayleigh (R) y ondas Love (L). Tomado de (FUNVISIS, 2002) | 44 |
| Figura 3.3 Dispersión de ondas (Granda et al, 2005). | 45 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.12.1 Clasificación de suelos empleada por la norma COVENIN (2001). | 50 |
| Figura 3.12.2 Clasificación de suelos basada en Vs30 según las recomendaciones de NEHRP (2003). | 50 |
| Figura 3.13.1. Curva r_d versus profundidad desarrollada por Seed & Idriss (1971). Fuente: Youd & Idriss (2001), citado por Kramer y Stewart (2004) | 59 |
| Figura 3.13.2. Relación de esfuerzo cíclico versus números de golpes Fuente: Kramer y Stewart (2004) | 60 |
| Figura 3.13.3 Factores de escala de magnitud derivados de varios investigadores Fuente: Youd & Idriss. (2001) | 64 |
| Figura 3.13.4. Curva recomendada para determinar $K\sigma$ Fuente: Youd & Idriss (2001)..... | 65 |
| Figura 3.13.5. Relación del factor de pendiente ($k\alpha$) contra alfa (α) Fuente: Brandes (2003).. | 66 |
| Figura 4.1 Distribución de los tendidos de ruido sísmico. El punto amarillo representa el centro de cada tendido. (Tomada de Arcgis 10.4)..... | 68 |
| Figura 4.2 Distribución de las estaciones de ruido sísmico usadas en el método H/V. El punto verde representa la ubicación de cada estación. (Tomada de Arcgis 10.4)..... | 70 |
| Figura 4.3 Distribución de las perforaciones geotécnicas otorgadas por la empresa OT Heredia. (Tomado de Arcgis 10.4)..... | 71 |
| Figura 4.4. Planilla de perforación otorgada por la empresa OT Heredia..... | 72 |
| Figura 5.1 Mapa de espesor sedimentario basado en los resultados obtenidos por Ornelas (2018) de la ciudad de Maracay Estado Aragua..... | 88 |
| Figura 5.2 Mapa de Isoperíodos basado en los resultados obtenidos por Ornelas (2018) de la ciudad de Maracay Estado Aragua. | 89 |
| Figura 5.3 Mapa de Vs30 topográfico de la ciudad de Maracay Estado Aragua. | 91 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.4 Mapa de Vs30 (ReMi) basado en los datos obtenidos por Escobar (2019) de la ciudad de Maracay Estado Aragua. | 93 |
| Figura 5.5 Mapa de Vs30 (IMASW) basado en los datos obtenidos por Escobar (2019) de la ciudad de Maracay Estado Aragua. | 94 |
| Figura 5.6 Mapa de Vs30 por SPT basado en el promedio de 3 metodologías N-SPT-VS para los datos otorgados por la empresa OT Heredia de la ciudad de Maracay Estado Aragua. | 96 |
| Figura 5.7 Mapa de Vs30 basado en información geofísica, topográfica y geotécnica de la ciudad de Maracay Estado Aragua. | 99 |
| Figura 5.8. Mapa de potencial de licuación del suelo en Maracay para un sismo de Magnitud Mw 6.5..... | 101 |
| Figura 5.9 Mapa de potencial de licuación del suelo en Maracay para un sismo de Magnitud Mw 7,0..... | 103 |
| Figura 5.10 Mapa de potencial de licuación del suelo en Maracay para un sismo de Magnitud Mw 7,5..... | 105 |
| Figura 5.11. Tipo de suelo de la capa con menor factor de seguridad de cada perforación. ... | 106 |
| Figura 5.12. Distribución de perforaciones con presencia de caracolillo en la ciudad de Maracay, Estado Aragua..... | 108 |
| Figura 5.13. Mapa de profundidad del nivel freático en la ciudad de Maracay | 110 |
| Figura 5.14. Mapa del factor de seguridad (sin intervalos), del potencial de licuación del suelo en Maracay para un sismo de Magnitud 7.0..... | 113 |
| Figura 5.15. Mapa de potencial de licuación para la ciudad de Maracay estado Aragua..... | 116 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 2.1 Litología de las Formaciones de mayor importancia en la zona de estudio. | 34 |
| Tabla 3.13.1. Valores de los coeficientes en función del contenido de finos (FC) Fuente: Seed & Idriss (1971)..... | 61 |
| Tabla 3.13.2 Valores de los factores de corrección para SPT. Fuente: Amundaray (2006). | 62 |
| (Tabla 4.1) Hoja de cálculo de Vs30 a partir de información geotécnica. | 75 |
| Tabla 4.2 Relación entre la pendiente topográfica y las categorías de Vs30 según NEHRP (BSSC, 2003). Se muestran los respectivos rangos de topografía (Allen & Wald, 2009). | 76 |
| Tabla 4.3. Factor de magnitud de escala para diferentes magnitudes de sismo | 80 |
| Tabla 4.4. Resumen Factores de Corrección por Forma y Ejecución de Ensayo..... | 81 |
| Tabla 4.5 Resultados cálculo del factor de seguridad perforación (E-964394-P2). | 83 |
| Tabla A.1. Información sobre el estrato con menor factor de seguridad de las perforaciones procesadas con la metodología Seed e Idriss (1982) para obtención del potencial de licuación para sismos de Mw 7.5, 7 y 6.5 | 128 |
| Tabla A.2. Modelo de hoja de cálculo de Vs30 por metodologías NSPT-VS. | 133 |

CAPITULO I

INTRODUCCION

La ciudad de Maracay, capital y principal centro urbano del estado Aragua, es una de las principales ciudades de Venezuela de acuerdo a su población e importancia industrial, económica y demográfica. El área de Maracay, así como la mayoría de los centros urbanos asentados en la región centro-norte del país, posee una situación geográfica que lo coloca en una posición de elevada amenaza sísmica y constante sismicidad enmarcada por la compleja interacción tectónica Caribe-Sur América, de gran potencial sísmológico en la región sur-caribeña y en la costa septentrional de Venezuela (Audemard, 2014; Pérez y Mendoza, 1998).

Aunado al contexto tectónico de la ciudad, están los efectos de sitio los cuales pueden amplificar la energía y duración de un sismo por aspectos como el espesor de sedimentos. En la ciudad de Maracay el espesor de sedimentos aumenta de norte a sur obteniendo un máximo de 321m al sur de la ciudad según (Ornelas 2018). Además, el riesgo sísmico está vinculado también a la calidad de los suelos, en Maracay los suelos en su mayoría son sedimentos aluviales y lacustres formados durante el Pleistoceno hasta la actualidad y cuya fuente es la cercana Cordillera de la Costa (Hernández 2006). Asimismo, el mapa de zonificación sísmica con fines de ingeniería de la norma COVENIN1756:2001 clasifica a la zona de estudio como una zona 5 de peligro sísmico elevado, con una aceleración pico en roca de 0,3g (COVENIN, 2001).

También hay que tener en cuenta que la ciudad de Maracay se ubica en la cuenca del Lago de Valencia la cual presenta inestabilidad geológica asociada al fenómeno de licuación de la zona. Un ejemplo de este fenómeno son las grietas generadas por el sismo de 1967 al sur del Lago de Valencia en Güigüe, específicamente a 650 m de distancia respecto a la orilla del lago, en donde se observan suelos lacustres de nivel intermedio. Este fenómeno, característico

de zonas con sedimentación aluvial fina adyacentes a cuerpos de agua, influye en la respuesta dinámica del suelo ante eventos sísmicos (González de Juana *et al.*, 1980, Audemard *et al.*, 1990).

Los diferentes sismos generados en esta zona muestran una clara relación con el sistema de fallas La Victoria, la cual representa el segundo accidente estructural de mayor importancia sismogénica del país, luego de la falla de San Sebastián, la cual es considerada el límite principal entre las placas del Caribe y Suramericana (Audemard *et al.*, 1995).

Con base a lo antes expuesto este trabajo busca evaluar el peligro de licuación en los suelos de la ciudad de Maracay a través del estudio de datos geofísicos y geotécnicos lo que permitirá elaborar un mapa que servirá de apoyo a ingenieros civiles, antes de iniciar cualquier proyecto constructivo y aportará datos e información a instituciones con competencia en planes de desarrollo regional, urbanismo, prevención de riesgos y protección civil.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Venezuela es un país con alta amenaza de ocurrencia de sismos, ya que se encuentra ubicado en el límite de las placas tectónicas del Caribe y Sudamericana, dando lugar a grandes sistemas de fallas como lo son los de Boconó, San Sebastián y El Pilar, los cuales a lo largo del tiempo han ocasionado en el país frecuentes movimientos sísmicos, que en algunos casos han sido de gran magnitud, poniendo en riesgo la estabilidad de las construcciones y la vida de las personas que en éstas se encuentran (Schmitz et al., 2015).

Uno de los efectos que puede inducir la ocurrencia de un sismo es el fenómeno denominado licuación de suelos, el cual ocurre cuando en un suelo arenoso saturado de agua la resistencia al esfuerzo cortante entre sus partículas disminuye a tal grado, que la mezcla agua- suelo se comporta como un semilíquido o líquido. Tal fenómeno está condicionado por la generación de presión en el agua (presión de poros) dentro de la masa de suelo, lo que determina la reducción de los esfuerzos efectivos y con ello la disminución y pérdida temporal de la resistencia al esfuerzo cortante. Crespo, (2004).

Maracay es una ciudad que no se escapa del riesgo sismológico en Venezuela, incluso está situada entre dos fallas de gran importancia sismogénica como lo son las fallas de La Victoria al sur y la falla de San Sebastián al norte, como lo establece Audemard (2000). Además está ubicada en la fosa tectónica del Lago de Valencia, la cual está cubierta de sedimentos aluviales, fluviales y lacustres, materiales que propician el fenómeno de la licuación.

En la ciudad de Maracay se han realizado múltiples investigaciones a partir de datos geofísicos o geotécnicos que han caracterizado los suelos, sin embargo, el fenómeno de licuación no ha sido estudiado a fondo. Por tanto, el presente trabajo plantea realizar los estudios antes mencionados con el propósito de obtener mapas del peligro de licuación del suelo para localizar las zonas con mayor probabilidad real de licuación ante la ocurrencia de un sismo.

Es importante destacar que esta investigación se realizó en coordinación con Nixon López quien se enfoca en la determinación de las microzonas sísmicas con igual respuesta en superficie en Maracay, basado en la integración de los mapas de Vs30 y de espesores de sedimentos. La información de ambas investigaciones se complementa entre sí para de esta manera obtener resultados más completos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general:

Proponer localización de suelos con potencial de licuación en la ciudad de Maracay a partir del uso de ensayos geotécnicos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Conformar una base de datos con información adquirida de ruido sísmico y datos geotécnicos.
- Determinar el factor de seguridad de licuación y Vs30 a partir de ensayos geotécnicos de la zona de estudio.
- Elaborar mapas de información geofísica previa y potencial de licuación de la ciudad de Maracay.
- Complementar el mapa del potencial de licuación con la información geofísica existente.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La necesidad e importancia de realizar estudios que permitan determinar las condiciones de los suelos en las principales ciudades del país ha quedado evidenciada luego de varios terremotos ocurridos que han causado daños a edificaciones y desarrollos urbanos a lo largo de la historia.

Existen distintos métodos geofísicos y geotécnicos que permiten estimar las condiciones geológicas de una zona en específico; algunas de estas técnicas son: el análisis multicanal de ondas superficiales interferométrico (IMASW) o la refracción de microtemores (ReMi) que permiten obtener información acerca de la velocidad de cizalla del subsuelo de manera sencilla. Por otro lado el cálculo del potencial de licuación de suelos se determina a través de cálculos que involucran información obtenida en ensayos geotécnicos, como por ejemplo: ensayo de penetración estándar (“standard penetration test”, SPT), análisis granulométrico etc. Generalmente, el costo de perforaciones geotécnicas con ensayos SPT resulta alto; sin embargo, la utilización sísmica pasiva como el método (IMASW) o (ReMi) plantea una alternativa de bajo costo para la caracterización del subsuelo.

Es por esto que la realización de este trabajo significa un aporte relevante al conocimiento teórico de los estudios de los suelos en Venezuela especialmente en la zona de Maracay. Además permitirá establecer las zonas de mayor peligro de licuación para, de esta manera, constituir un aporte social en el desarrollo de procesos progresivos de ordenamiento territorial.

1.4 UBICACIÓN

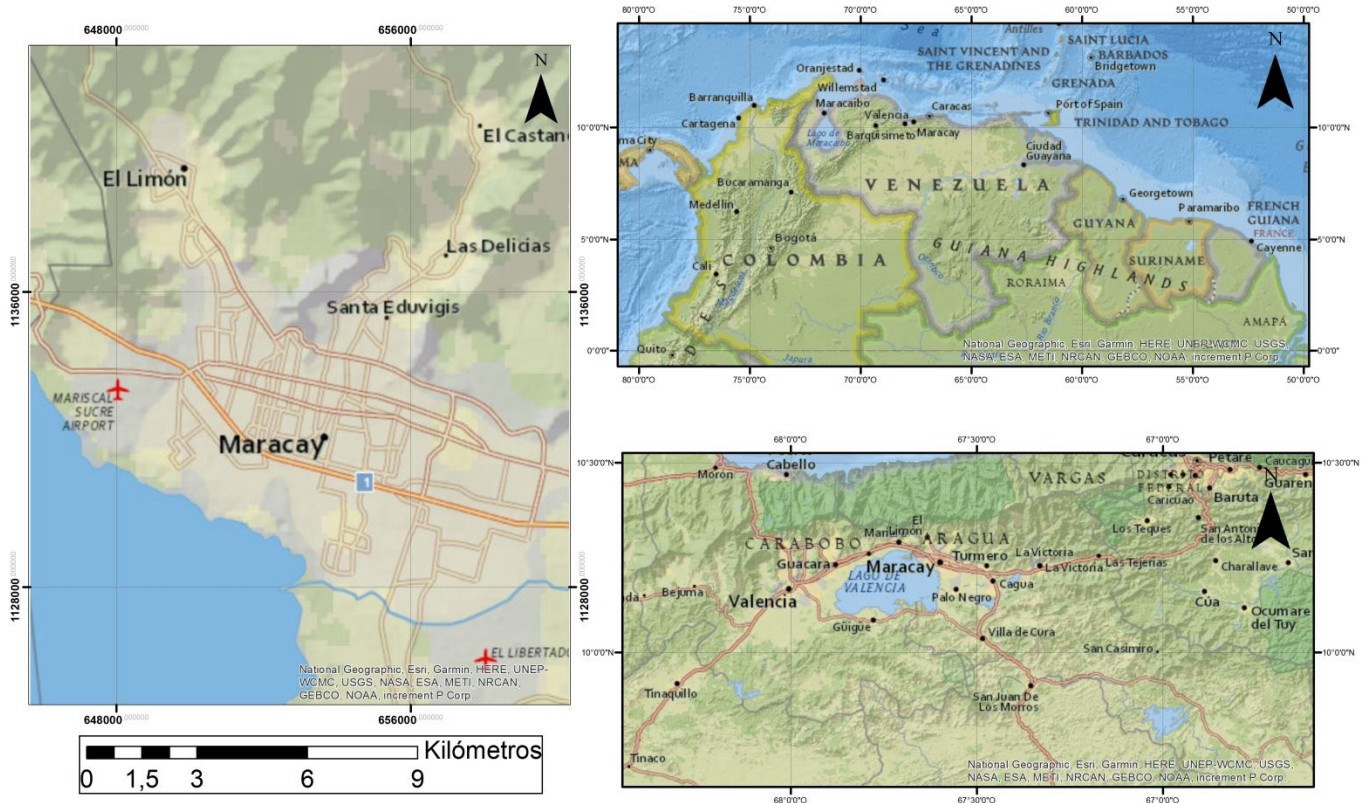


Figura 1.1. Ubicación de la zona de estudio. Tomada de Arcgis 10.4.

En la figura 1.1 se muestra la ubicación geográfica de la Ciudad de Maracay, la cual se encuentra ubicada al sur de la Cordillera de La Costa en la depresión del Lago de Valencia ubicada en la parte centro-norte del país entre las latitudes $10,32^{\circ}$ y $10,19^{\circ}$ N y las longitudes $67,645^{\circ}$ y $67,55^{\circ}$ O.

1.5 ANTECEDENTES

Durante las últimas décadas en la ciudad de Maracay se han realizado varios estudios geofísicos y geotécnicos con el objetivo de caracterizar los suelos de la zona, a continuación se citan los resultados y conclusiones más importantes de estos estudios a fin de contextualizar y proveer una orientación adecuada para la selección de algunos parámetros en el procesamiento de los datos.

Hernández (2006) realizó un estudio geológico y reconocimiento de arcillas expansivas en suelos de una zona al sur de Maracay, estado Aragua. Determino que la zona de estudio está formada por sedimentos aluviales y lacustres formados durante el Pleistoceno hasta la actualidad y cuya fuente es la cercana Cordillera de la Costa.

También concluyo que las perforaciones realizadas a lo largo de los años muestran que los primeros metros de suelo están conformados por limos y arenas finas con altos contenidos de materia orgánica y moluscos, descritos en forma general como “caracolillo”.

Hernández (2006) acotó que las subidas del nivel de las aguas del Lago de Valencia repercuten en el ascenso del nivel freático de la zona de estudio el cual afecta la presión de poros de los estratos superficiales (característica que influye en el fenómeno de licuación) y además generan hinchamiento en las capas de arcilla. Hernández (2006) alerta que este hinchamiento aunado al grado de saturación y la carga aplicada puede generar el fenómeno del colapso en los suelos que posean estas características.

Rojas (2008) realizó la adquisición de 315 estaciones de ruido ambiental en la ciudad de Maracay con el objetivo de ser analizadas a partir del método de Nakamura o relación espectral H/V para obtener los periodos fundamentales de la cuenca.

Los valores de periodo obtenidos por Rojas (2008) varían entre 0,13 s a 2,88 s. Los periodos más altos se ubican hacia el sur, donde se encuentra el Lago de Valencia mientras que hacia el norte disminuyen.

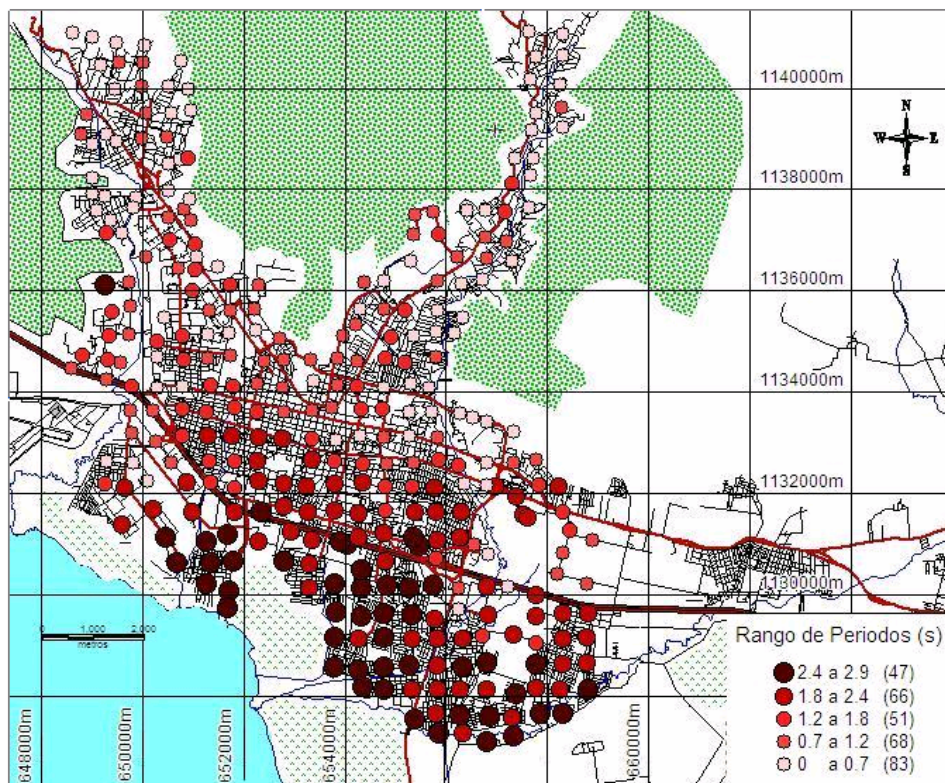


Figura 1.5.1 Mapa de distribución por rango de períodos de la ciudad de Maracay, Estado Aragua. (Rojas 2008).

Meza (2010) realizó un modelado bidimensional de la ciudades de Maracay y Valencia a través de datos de sísmica de refracción somera con 4 tendidos de longitudes entre 1500m y 2000m logrando identificar tres 3 fases en los modelos de ondas P, en los 4 perfiles, lo que le permitió caracterizar la cuenca del Lago de Valencia en sus primeros 400 m de profundidad por una primera fase con un promedio de $V_p= 600$ m/s, una segunda fase $V_p= 1800$ m/s y una tercera fase con una $V_p = 3800$ ms. Interpretando la primera fase como sedimentos pocos consolidados, la segunda fase como sedimentos saturados y la tercera fase como está basamento perteneciente a los Esquistos de Las Mercedes.

De igual manera Meza (2010) construyó un modelo bidimensional de ondas S, basado en la estructura del modelo de velocidad de onda p y ajustando los valores de velocidad de S observadas en las secciones sísmicas, lo que le permitió establecer una velocidad promedio de onda S para cada ciudad, ya que las observaciones de onda S en la mayoría de los perfiles no poseen la densidad suficiente para la determinación de la profundidad de la cuenca.

El promedio de V_s obtenido por Meza en el 2010 para la ciudad de Maracay fue de 200 m/s para los sedimentos con un espesor (135 m a 270 m) y para el basamento rocoso es de 1100 m/s.

Casalena (2011) realizó la adquisición de 98 grabaciones de ruido antrópico para caracterizar geofísicamente los suelos someros de la ciudad de Maracay a través de la refracción de microtemores ReMi. Obteniendo que los valores V_{s30} de la zona sur del área de estudio varían en un rango que oscila entre 192 y 200 m/s, mientras que en la parte norte se tienen valores de V_{s30} que van de 250 m/s hasta 354 m/s. En la figura 1.5.2 mostrada a continuación se muestra el mapa de V_{s30} elaborado por Casalena en el 2011.

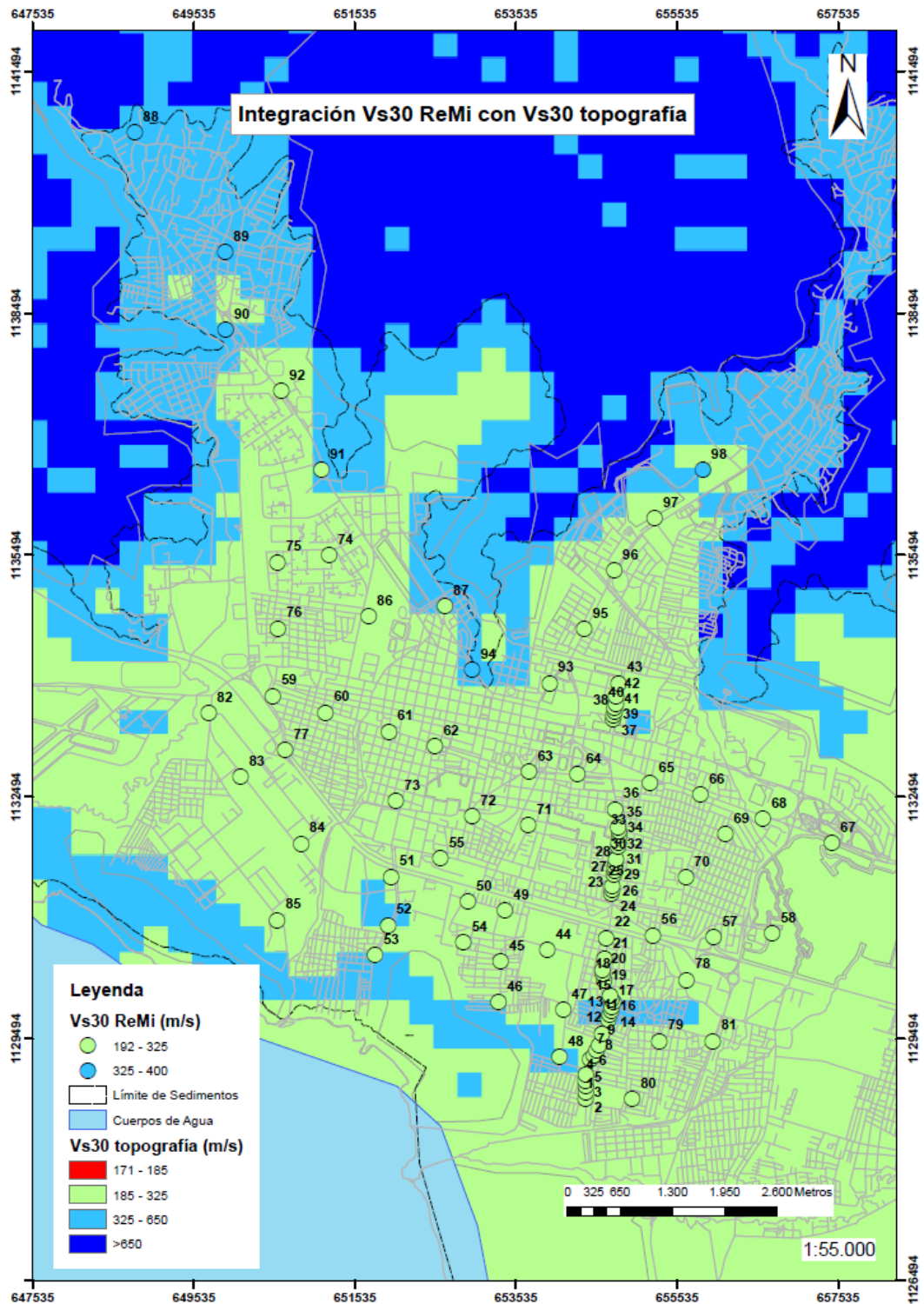


Figura 1.5.2. Mapa datos Vs30 ReMi y Vs30 por topografía. (Casalena, 2011).

Ornelas (2018) realizó una inversión 1D de la onda Rayleigh a los datos de ruido adquiridos por Rojas (2008) con el objetivo de determinar el espesor de sedimentos de la cuenca del Lago de Valencia, específicamente en la zona correspondiente a la ciudad de Maracay. Obtuvo que el estrato sedimentario presenta valores de 0 a 40 m de espesor sobre la Cordillera de la Costa, al norte de la ciudad. Y posee un espesor máximo de 310 m al sur de la ciudad hacia donde se encuentra el Lago de Valencia. Determinó que la velocidad de propagación de onda S en la cuenca es de 137 m/s a 657 m/s, y de onda P que varía 333 m/s a 1170 m/s.

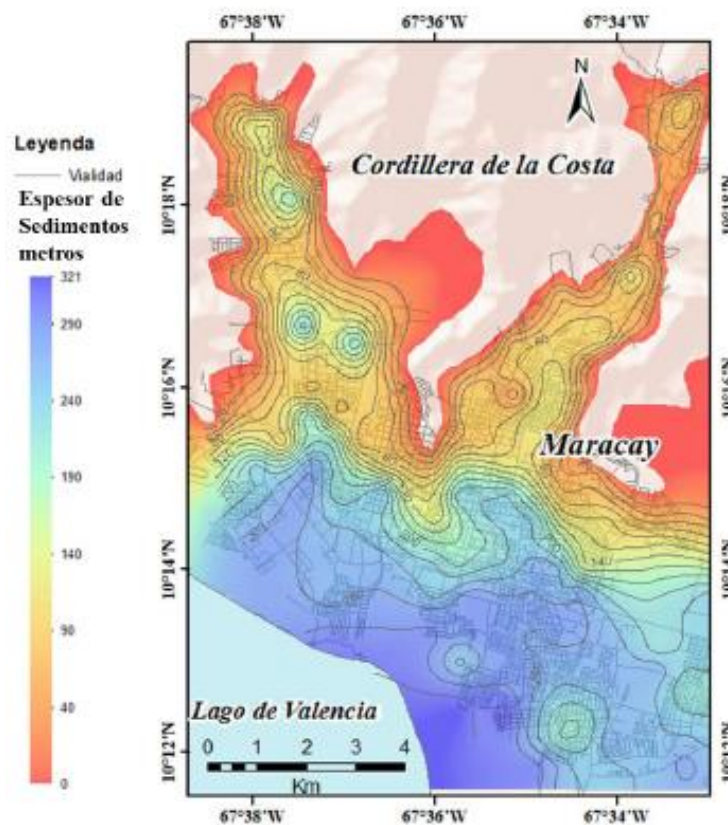


Figura 1.5.3 Mapa de espesor sedimentario en la ciudad de Maracay Estado Aragua (Ornelas, 2018)

Escobar (2019) procesó nuevamente los datos de Casalena (2011) con el método de IMASW y ReMi con el objetivo de comparar y determinar cuál es más apropiado en entornos con ruido urbano. Sus estudios condujeron a resultados muy similares a los de Casalena (2011) en cuanto a las velocidades obtenidas mientras la comparación entre ambos métodos no dio

diferencias significativas lo que indica que ambos son confiables para la obtención de velocidades de corte.

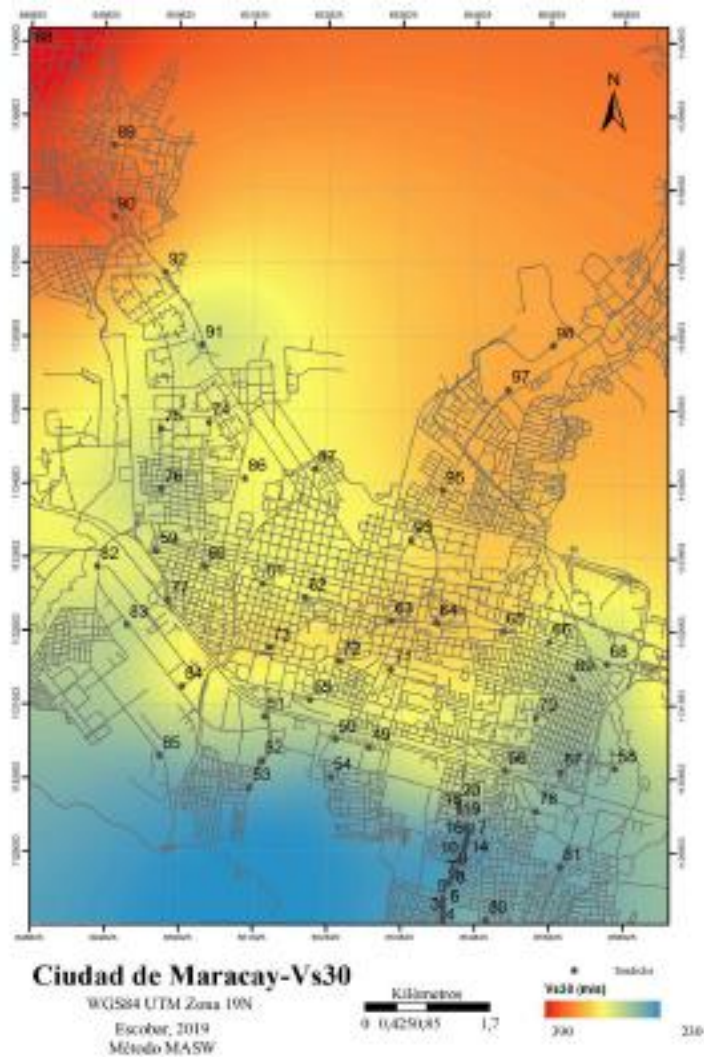


Figura 1.5.4. Mapa de VS30 obtenido a través de la metodología IMASW en la ciudad de Maracay Estado Aragua (Escobar, 2019).

Hidalgo y Paredes (2015) elaboraron mapas de microzonificación del potencial de licuación de suelos en las parroquias Los Tacarigua, Andres Eloy Blanco, Jose Casanova Godoy y Pedro Jose Ovalles de la ciudad de Maracay llegando a la conclusión que en las parroquias estudiadas existe la presencia de suelos propicios para el fenómeno de licuación, sin embargo, el riesgo de licuación fue prácticamente nulo pues en el 95% de los casos los factores de

seguridad superan el máximo establecido para ese trabajo por lo que se recomendó realizar nuevos estudios hacia la zona sur donde el nivel freático es mas somero y además la profundidad de sedimentos es mayor.

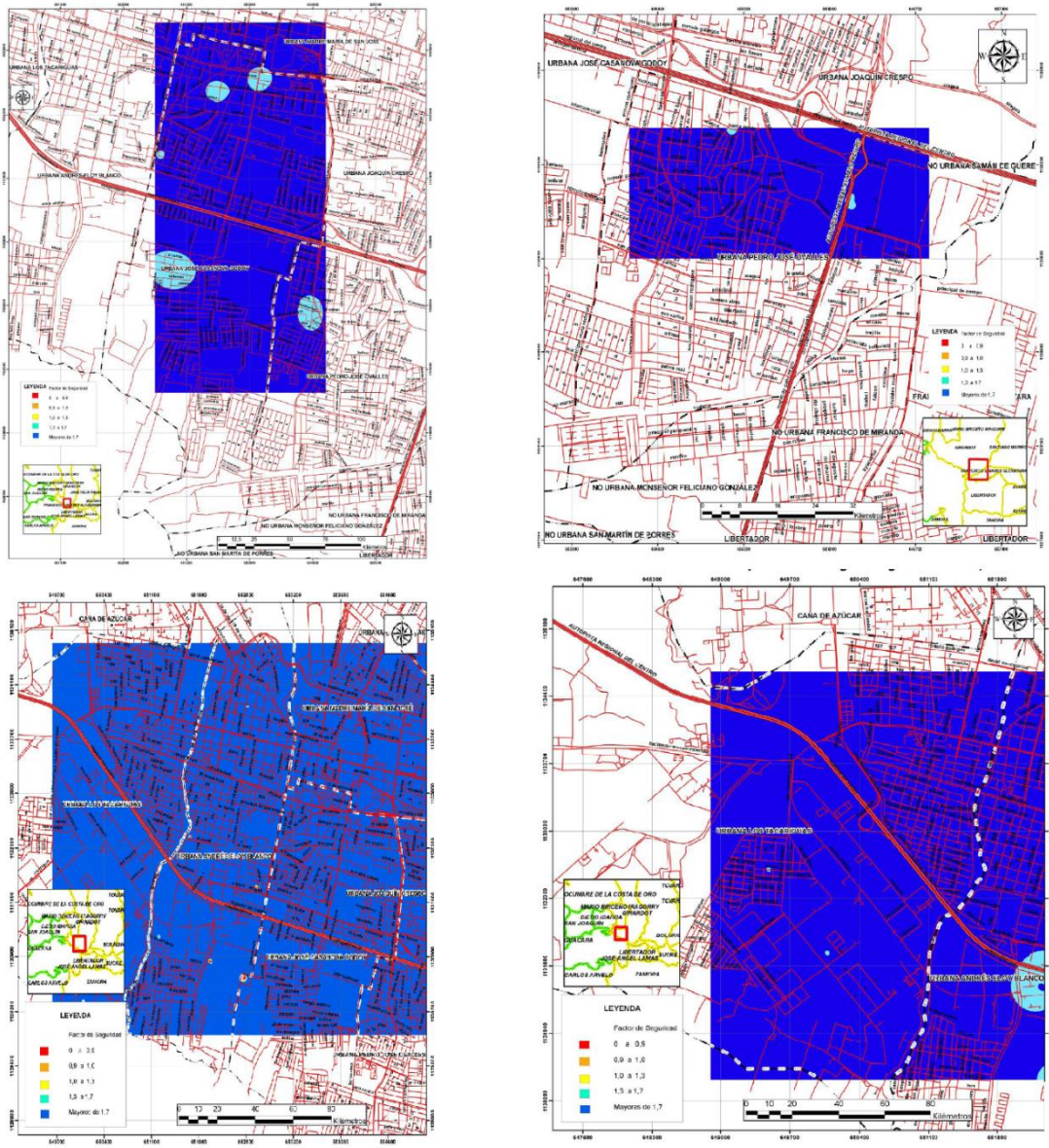


Figura 1.5.5. Mapas de potencial de licuación para las parroquias estudiadas por (Hidalgo y Paredes, 2015).

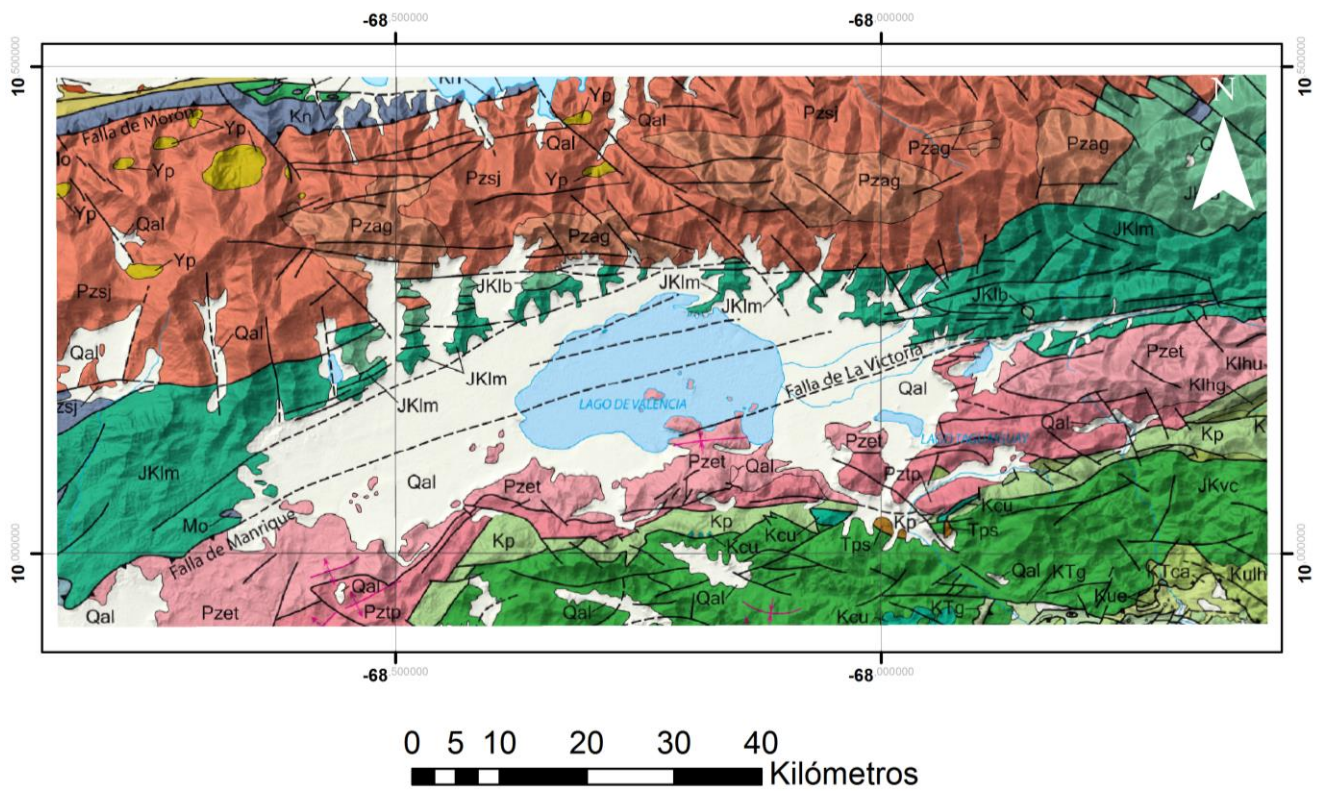
CAPÍTULO II

MARCO GEOLÓGICO

La zona de estudio se encuentra en el Estado Aragua cuya litología en general está conformada por rocas que tienen diversos grados de metamorfismo, y por depósitos sedimentarios. Se presentan diversas fallas y pliegues, que evidencian la geodinámica de la zona.

La ciudad de Maracay se encuentra en la Depresión del Lago de Valencia entre dos importantes unidades tectónicas: la Cordillera de la Costa al norte y la Serranía del Interior al sur. En esta depresión predomina el material sedimentario, el cual ha sido depositado en épocas recientes.

A continuación se muestra en la figura 2.1 la situación geológica de la Depresión del Lago de Valencia destacando las formaciones más importantes así como las principales fallas que atraviesan la zona.



Leyenda

| | | | |
|------|--------------------------|------|----------------------|
| Kp | Filita de Paracotos | Pzet | Complejo el Tinaco |
| Klhu | Complejo Loma de Hierro | Pzsj | Complejo San Julian |
| JKvc | Asociacion Villa de Cura | Pzag | Asociacion Avila |
| JKlm | Esquisto Las Mercedes | Pztp | Filita de Tucutunemo |
| JKlb | Esquisto Las Brisas | Qal | Aluvion |

Figura 2.1. Mapa geológico de la zona de estudio modificado de Hackley et al (2006).

2.1 Geología regional

La Cordillera de la Costa representa de manera general un complejo integrado por formaciones montañosas, colinas, valles longitudinales y depresiones interiores; la cual limita al norte con el mar Caribe.

El sistema montañoso fue subdividido por Menéndez (1966) en ocho fajas tectónicas: (figura 2.1.1)

- 1) *Faja Tectónica de la Cordillera de la Costa*, limitada al norte por el sistema de fallas del Caribe y al sur por la falla de La Victoria;
- 2) *Faja Tectónica de Caucagua -El Tinaco*, entre la zona de fallas de Santa Rosa al sur y la falla de La Victoria al norte;
- 3) *Faja de Paracotos*, entre la falla de Santa Rosa al norte y la de Agua Fría al sur;
- 4) *Cinturón Volcánico-Tectónico del Grupo Villa de Cura*, limitado por las fallas de Agua Fría y Cantagallo al norte y sur respectivamente;
- 5) *Faja Piemontina*, la más extensa, forma el cinturón sur que bordea al Grupo Villa de Cura, limitada al norte por la falla de Cantagallo y al sur por el Corrimiento Frontal;
- 6) *Cinturón de Fallas de Corrimiento*; se ha denominado así a un sistema discontinuo de fallas que repiten secciones de formaciones expuestas al norte del mismo;
- 7) *Faja Volcada*, un cinturón angosto de rocas terciarias jóvenes volcadas hacia el sur;

8) *Faja de Buzamientos Suaves*, constituida por rocas sedimentarias del Eoceno; forman un homoclinal regional hacia el sur y constituyen la parte septentrional de Los Llanos a medida que el buzamiento se suaviza progresivamente hacia el sur.



Figura 2.2: Ubicación y extensión de las Fajas Tectónicas. (Tomado y modificado de Menéndez (1966)).

2.2 Litología regional

En esta parte se hace una revisión de las distintas unidades aflorantes en las inmediaciones de la zona de estudio, tomando como base las distintas ideas y características propuestas por distintos autores.

A continuación se presentan en la tabla 2.1 las características más relevantes de las distintas unidades presentes.

Tabla 2.1 Litología de las Formaciones de mayor importancia en la zona de estudio.

| Era | Edad | Formación | Descripción Litológica | Espesor | Referencia |
|------------|--------------------|----------------------|--|------------------------------|----------------|
| Paleozoico | Cámbrico | Complejo El Ávila | Gneises graníticos (Augengneis de Peña de Mora), los cuales están rodeados de esquistos (Esquisto de San Julián). | No se ha medido ni estimado. | Urbani (1972) |
| Paleozoico | Pérmico | Formación Tucutunemo | Filitas carbonáceas arenosas que varían a meta areniscas y limolitas cuarzo feldespáticas, encontrándose también cantidades menores de areniscas de grano grueso (asperones) y conglomerados cuarzo-calcáreos. | 350 m | Shagam, (1960) |
| Paleozoico | Pérmico | Complejo San Julián | Esquisto cuarzo feldespático micáceo y cuarzo micáceo con intercalaciones de esquisto actinolítico y clorítico. | No se ha medido ni estimado. | Urbani (1972) |
| Mesozoico | Jurásico Cretácico | Grupo Villa de Cura | Está compuesto de rocas metavolcánicas y metasedimentarias de granulometría variable. | 10 km | Piburn (1968) |

| Era | Edad | Formación | Descripción Litológica | Espesor | Referencia |
|-----------|--------------------|------------------------|---|------------------------------|----------------------------------|
| Mesozoico | Jurasico Cretácico | Formación Las Mercedes | Consiste en esquistos cuarzo - muscovítico - calcítico - grafitoso con intercalaciones de mármol grafitoso en forma de lentes, que cuando alcanza gruesos espesores se ha denominado. | Aproximadamente 1800 metros | Aguerrevere y Zuloaga (1937). |
| Mesozoico | Jurasico Cretácico | Formación Las Brisas | Conglomerado basal arkósico, con cantos rodados derivados de la roca basal de Sebastopol, redondeados a subangulares, hasta de 30 cm de diámetro, cantos de cuarzo y cemento, principalmente silíceo. | No se ha medido ni estimado. | Aguerrevere y Zuloaga (op. cit.) |
| Mesozoico | Cretácico | Complejo El Tinaco | Variedad de rocas sedimentarias metamorfizadas y muy plegadas "gneises hornabléndicos y rocas asociadas". | No se ha medido ni estimado. | O. Renz y K. C. Short (1960) |

| Era | Edad | Formación | Descripción Litológica | Espesor | Referencia |
|-----------|-----------|---------------------|---|---------|--------------------|
| Mesozoico | Cretácico | Filita de Paracotos | Asociación de filita, mármol, metaconglomerado, con metalimolita y metaarenisca en menor proporción. La filita constituye el 60% de la Formación, siendo limosa y carbonosa | 130 m | R. J. Smith (1952) |
| Mesozoico | Cretácico | Loma de Hierro | Se compone de peridotita serpentizada, troctolita y gabro asociado a basalto. La serpentización es más intensa hacia los bordes del bloque | 800 m | M. Graterol (1972) |

2.3 Geología estructural

2.3.1 Sistema de Fallas La Victoria

El Estado Aragua presenta alta actividad sísmica producto del movimiento transcurrente dextral del sistema de fallas que representan el límite entre las placas tectónicas Caribe y Suramérica (González de Juana *et al.*, 1980, Omaña, 2002).

La placa del Caribe ubicada en el norte experimenta un movimiento de 12.7 mm anuales hacia el este con respecto a la placa Suramericana, mientras que la placa Suramericana efectúa un movimiento hacia el oeste, a razón de 12,2 mm anuales (Audemard, 2002).

Este movimiento genera múltiples estructuras geológicas, entre las cuales se puede citar por su importancia la falla de la Victoria y San Sebastián de orientación casi E-W y movimiento

transcurrente dextral a consecuencia del movimiento antes nombrado de las placas Caribe y Suramericana que a su vez genera fallas secundarias transversales a la dirección E-W que desarrolla entre otros, entallamiento y alineamiento del drenaje, zonas de escarpe de fallas en la topografía y cambios bruscos de rumbo y buzamiento de las estructuras.

En la figura 2.3 mostrada a continuación se observan las trazas que conforman el sistema de fallas La Victoria. La falla de Guacamaya es la traza noroccidental del sistema, la cual abarca el oeste de Valencia, y tiene un movimiento dextral con componente normal. La falla La Cabrera y de El Horno atraviesan el Lago de Valencia, extendiéndose desde el margen occidental de la planicie, hasta el margen oriental de la planicie, en la ciudad de Maracay. La falla La Cabrera se ubica desde las penínsulas Chambergo y La Cabrera, y la falla El Horno se ubica al sur de las islas Bruja-Brujitas y El Horno. La falla La Victoria se ubica entre La Victoria, Estado Aragua al oeste, y Ocampo, Estado Miranda al este. Y la falla de Pichao se encuentra entre Ocampo y Pichao (Audemard *et al.*, 1995).

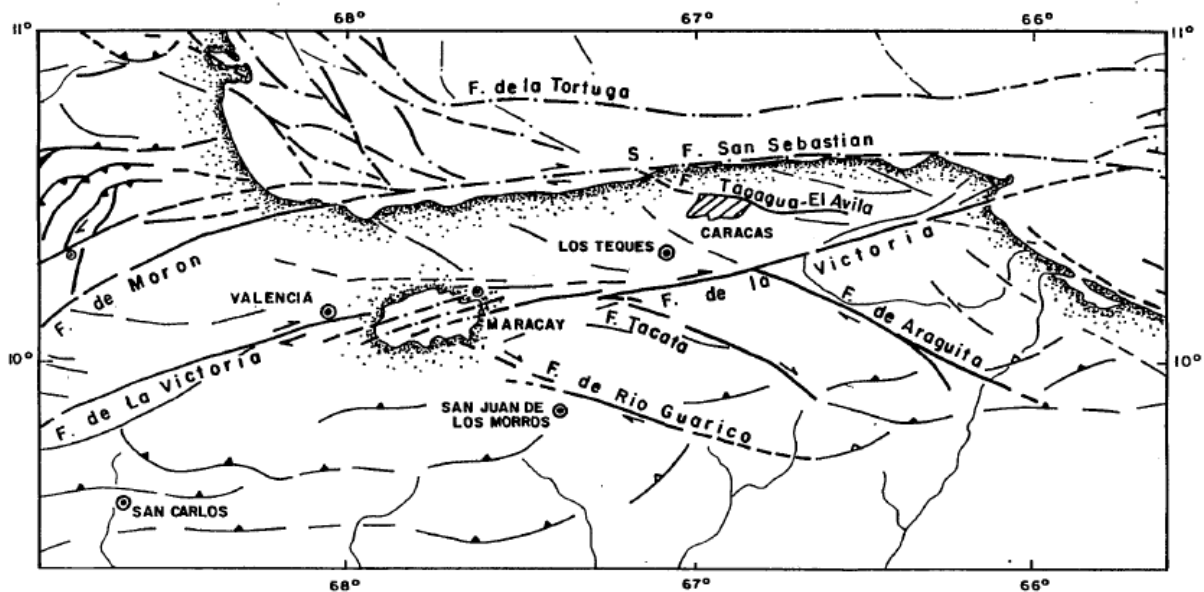


Figura 2.3 Fallas activas de la región central del país (Schmitz *et al* 2015).

2.4 El Lago de Valencia

El Lago de Valencia se encuentra emplazado en una fosa tectónica conocida como Graben de Valencia, la cual está ubicada entre la Cordillera de la Costa y la Serranía del Interior. Esta depresión anteriormente mencionada, se encuentra asociada a un gran número de fallas que presentan una orientación O–E, destacándose la falla de la Victoria y la prolongación del corrimiento de Manrique. En general la cuenca del Lago de Valencia es también conocida popularmente como los Valles de Aragua. La extensión total de las aguas del Lago es de 370 km² y tiene una profundidad máxima de 39 metros. Llegan las aguas de 17 ríos, entre ellos el Caño Central (río Cabriales), Los Guayos, Aragua, Turmero, Güigüe, Maracay, Limón, Tocorón, Ereigüe y el Güey, permitiendo su existencia, aun cuando han disminuido considerablemente estos caudales. (Peeters, 1968).

Se estima que el lago se originó durante el Cuaternario, pero su edad puede ser tan antigua como el Terciario Tardío. El subsuelo del lago consiste estratigráficamente de tres unidades (Unidades I, II y III) separadas por reflectores prominentes. Se hallaron lentes clásticas, sedimentos gruesos desorientados lenticulares, cerca de la base de la Unidad I que son interpretados como sedimentos fluvio-lacustres (deltas o antiguos canales fluviales) del Holoceno Temprano, los cuales fueron depositados durante una etapa de desecación del lago, y posteriormente estos sedimentos clásticos fueron soterrados por sedimentos lacustres en la última etapa más alta de crecida del lago (Schubert, 1980). Además, a partir del estudio sedimentológico realizado por Suárez *et al.* (2013), los sedimentos del Lago de Valencia son de granulometría predominantemente arcillosa con 82% de arcillas, 12% de limos y 6,1% de arenas.

2.5 Cambios en el nivel del Lago de Valencia según Peeters (1968)

Un aspecto importante son los cambios de nivel del Lago de Valencia, ya que en una de las extensiones que llegó a tener en el pasado ocupó parte de lo que es hoy el sur de la Ciudad de Maracay. Según Peeters (1968), la fosa tectónica del Lago de Valencia desarrolló un sistema hidrográfico que drenaba toda el área entre los valles de Aragua y la cuenca que sería ocupada por el lago, provocando conos aluviales y sedimentos fluviales, originando el represamiento de aguas y con éste el origen del lago Valencia I, cuyo nivel máximo de aguas probablemente no sobrepasó los 440 m y se ramificaba entre los conos de deyección como se muestra en la figura 2.3.

Posteriormente, el clima evolucionó a condiciones sub-áridas desecando el lago Valencia I, reduciéndolo y originando el Lago de Valencia II que Peeters (1968) estima de edad Pleistocena.

Seguidamente, una vez más, cambian las condiciones a un clima pluvial y el nivel del lago sube considerablemente generando el Lago Valencia III, alcanzando la máxima cobertura de aguas: 427 m a fines del período III, hace unos 1300 a 700 años. Peeters (1968) también encuentra la existencia de tres niveles de arcilla con *Planorbis* intercalados con niveles de sedimentos fluviales, lo que sugiere períodos de transgresión-regresión lacustre.

Finalmente, el Lago Valencia IV se estima de edad Holoceno-presente, con variabilidad y tendencia al descenso en el nivel del lago (González de Juana *et al.*, 1980; Peeters, 1968).

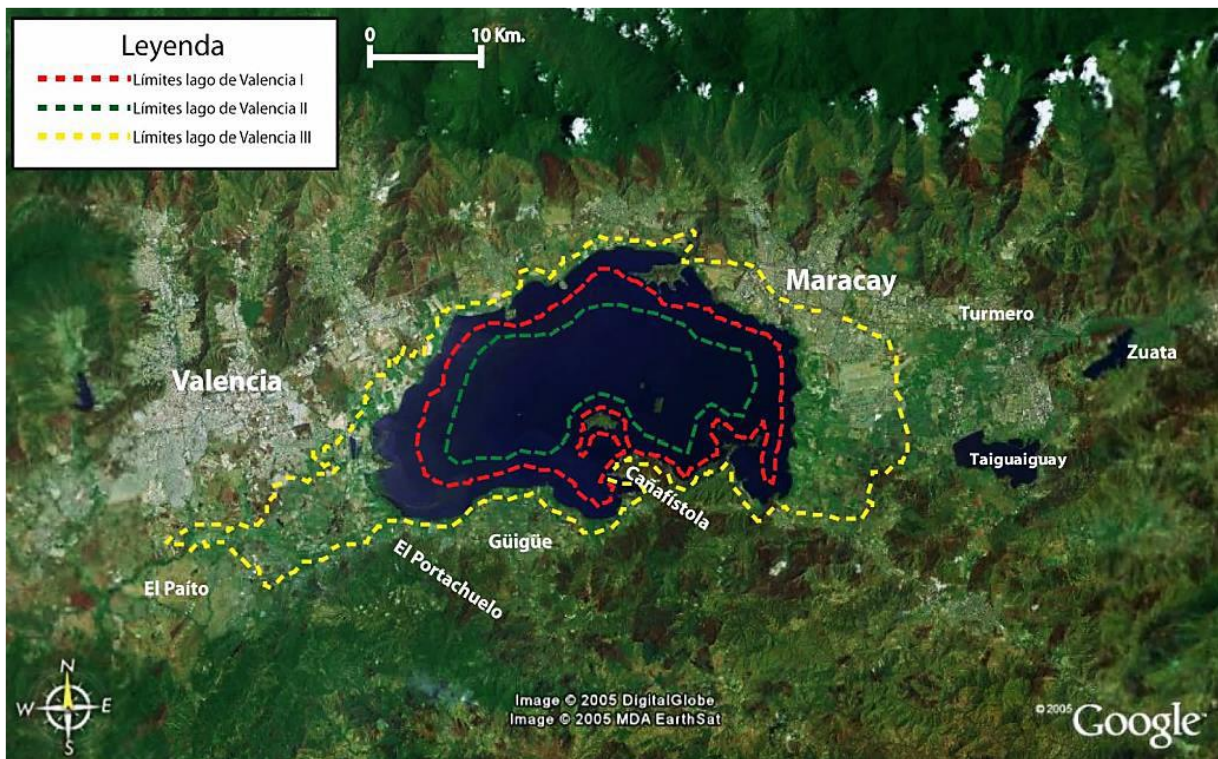


Figura 2.4. Mapa de las extensiones que ha tenido el Lago de Valencia de acuerdo a Peeters 1968. Tomado de Hernández 2006.

2.6 Geología local (Suelos de Maracay)

La litología de la zona de estudio está conformada principalmente por dos tipos de depósitos: lacustres y aluviales. Los depósitos lacustres están formados principalmente por un suelo de material muy fino, de color gris claro, que se identifica como tierra de diatomeas. Este suelo diatomáceo es de baja densidad en estado seco (0,7 a 0,9 Ton/m³), alto porcentaje de porosidad, baja conductividad térmica. En campo no se observa la base de esta capa, pero si se observa su continuidad lateral y la presencia de cárcavas en algunos sectores. Este suelo es muy homogéneo en su composición y no presenta estructuras sedimentarias visibles.

Los depósitos aluviales se encuentran sobre los depósitos de tierra de diatomeas, y están principalmente formados por arenas finas y limos, altamente porosos y ricos en materia orgánica y conchas de Planorbis, siendo en general referidos como “Caracolillo” en los estudios previos de la zona. Estos suelos no presentan continuidad lateral, y son bastante

heterogéneos. En algunos puntos se encuentran intercalados con lentes de arena y las únicas estructuras sedimentarias observadas son varvas y en algunas calicatas se observa cierta gradación de fina a gruesa.

Autores como Peeters (1968) y Bockh (1956) consideran que estos sedimentos fluvio-lacustres alcanzan un espesor máximo de unos 400 metros en la parte central de la cuenca del Lago de Valencia.

2.7 El fenómeno de licuación en Venezuela

En Venezuela, se han presentado diversos eventos sísmicos en los cuales se ha evidenciado el fenómeno de licuación de suelos (Rodríguez et al., 2005), (De Santis et al., 1989) y (Garcés, 2009) han logrado investigar y describir algunos con bastante detalle:

- **Región Central:** Terremoto de Caracas en julio de 1967, en donde ocurrieron desplazamientos laterales en la parte sur del Lago de Valencia, en la zona de Güigüe, ubicada a 85 km del epicentro del sismo, el cual fue de una magnitud de 6.5 en la escala Richter. Esto trajo como consecuencia el desplazamiento de un bloque de 750 m de largo y entre 120 m y 180 m de ancho, a unos 30 m dentro del lago.
- **Región Occidental:** Terremoto al Noreste de Boca de Tocuyo, entre abril y mayo de 1989. Dos sismos, ocurridos en abril y mayo de 1989, con magnitudes de 5.8 y 5.0 que generaron líneas de eyección, fracturas de terreno, conos de eyección aislados y desplazamientos laterales en poblados del Estado Falcón. Cabe destacar que el epicentro del sismo se ubicó a 20 km al noreste de Boca de Tocuyo, una de las poblaciones afectadas por el fenómeno de licuación, luego de los terremotos mencionados.
- **Región Oriental:** Terremoto ocurrido en Cariaco en julio de 1997, en el Estado Sucre, que generó licuación y desplazamientos laterales, principalmente en las riberas de los ríos Manzanares y Cariaco, así como a lo largo de la línea costera de la zona afectada. La magnitud del sismo fue de magnitud 6.9 en la escala Richter.

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3.1 Ondas mecánicas

Una onda es una perturbación que se propaga en el tiempo y el espacio transportando energía. Entre los diferentes tipos de ondas se encuentran las ondas mecánicas. Las ondas mecánicas son aquellas que necesitan de un medio para propagarse. En estas, la energía se transfiere de una partícula a la siguiente provocando que la perturbación se transporte sin haber desplazamiento del medio. La velocidad de propagación de este tipo de ondas depende de las propiedades del medio (Young y Freedman, 2009).

3.2 Ondas sísmicas

La onda sísmica es aquella oscilación normalmente generada por un terremoto o una explosión. Las mismas se propagan desde la fuente a través de un medio material elástico, en estado sólido o líquido, transportando energía mecánica. Este tipo de ondas son utilizadas en sísmica para interpretar la composición y geometría del subsuelo (Schlumberger, 2017). Se clasifican como ondas corpóreas y ondas superficiales.

3.2.1 Ondas corpóreas

Ondas cuyo medio de transmisión es el interior de la Tierra, se clasifican a su vez en ondas compresivas (ondas P) y ondas de cizalla (ondas S). La dirección de movimiento de las partículas de las ondas compresivas es paralela a la dirección de movimiento, mientras que para las ondas de cizalla es perpendicular a la dirección de movimiento (Everett, 2013). La velocidad de ondas S de los materiales cercanos a superficie es de interés fundamental en estudios de ingeniería y geo ambientales (Xia et al., 2002).

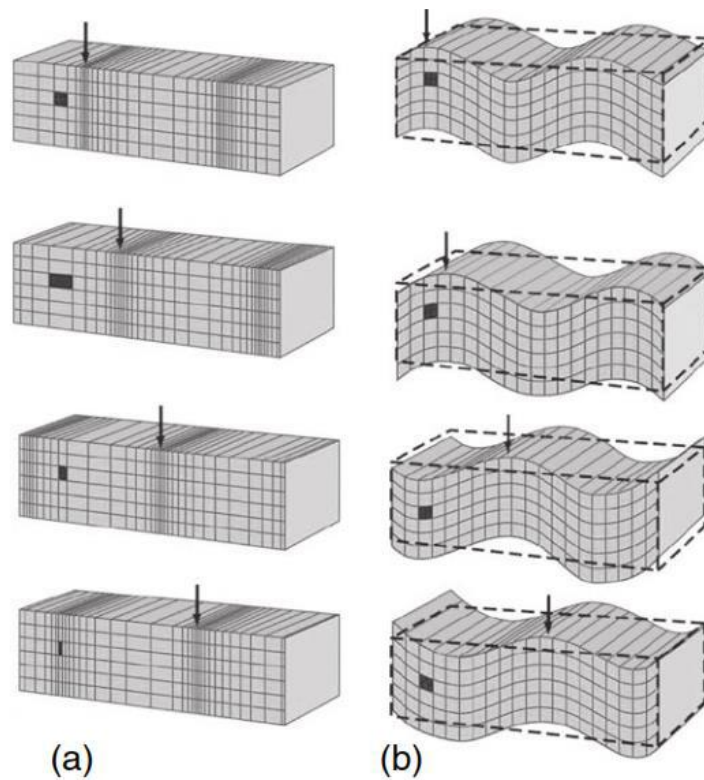


Figura 3.1. Movimiento de las partículas asociado a las ondas sísmicas. (a) Compresivas (b) Cizalla. (Grotzinger y Jordan 2010).

3.2.2 Ondas superficiales: Son ondas que viajan sobre la superficie y las interfaces de la tierra, desplazándose a menor velocidad que las ondas de corte V_s . De estas ondas hay dos tipos: ondas Rayleigh y ondas Love. Las ondas superficiales tienen la característica de que cambian de forma mientras viajan, debido a que las diferentes componentes de las frecuencias que las constituyen se propagan a diferentes velocidades, lo cual se conoce como dispersión de onda. Los patrones de dispersión son indicativos de la estructura de velocidad a través del cual viaja la onda. (FUNVISIS, 2002).

3.2.2.1 Ondas Love (L): su movimiento es similar al de las ondas S, con la diferencia que se encuentran restringidas a los intervalos de interacción entre los diferentes estratos de la superficie terrestre.

3.2.2.2 Ondas Rayleigh (R): ellas se caracterizan por tener una trayectoria elíptica en el plano vertical orientado en la dirección en que éstas se desplazan.

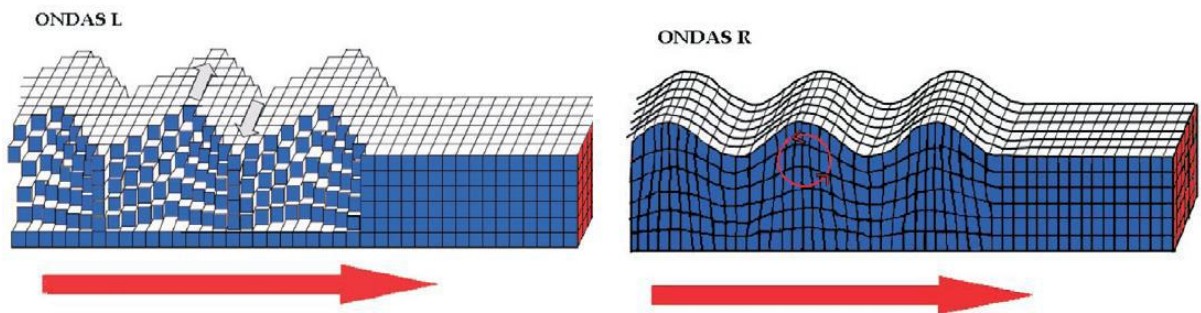


Figura 3.2. Ondas superficiales: ondas Rayleigh (R) y ondas Love (L). Tomado de (FUNVISIS, 2002)

3.3 Dispersión de ondas

Se define como dispersión el cambio de velocidad de propagación de las ondas Rayleigh en función de la longitud de onda (λ) o de la frecuencia (f). Este fenómeno solamente se manifiesta cuando el medio no es homogéneo en términos de la distribución de los valores de V_s según la vertical. En un medio con valores de V_s crecientes con la profundidad las componentes de alta frecuencia (menor longitud de onda) se transmiten a menor velocidad de fase (CR) que las de baja frecuencia (mayor longitud de onda) que además profundizan más en el terreno (Granda et al., 2005). Es importante destacar que más de una velocidad de fase puede estar asociada con una frecuencia de onda Rayleigh simplemente porque estas ondas pueden viajar a diferentes velocidades para una frecuencia dada. La velocidad más baja es llamada velocidad del modo fundamental (o primer modo) (Xia et al., 1999). La velocidad de onda S puede ser obtenida invirtiendo la velocidad de fase dispersiva de la onda superficial (Rayleigh y/o Love). Mediante la inversión de los datos de dispersión de las ondas Rayleigh de altas frecuencias, se pueden obtener velocidades confiables de onda S cercanas a la superficie (Xia et al., 1999).

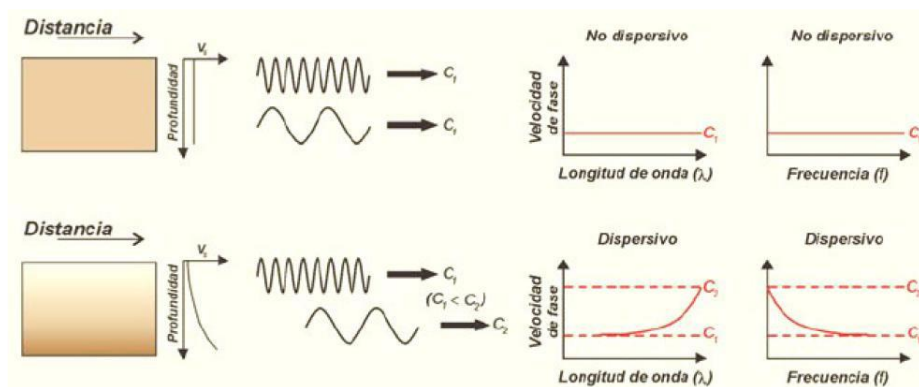


Figura 3.3 Dispersión de ondas (Granda et al, 2005).

3.4 Método de ondas superficiales

Prácticamente todas las señales que perjudican y limitan la adquisición de la sismica de refracción representan la fuente de la señal útil en las técnicas de ondas superficiales. En sus formas activa, pasiva y mixta estos métodos, con el procesamiento de la señal espectral (la evaluación del espectro lentitud-frecuencia de ondas Rayleigh a través el análisis de su modo fundamental), permiten la extracción de una curva de dispersión cuya inversión permite calcular un modelo 1D de ondas de corte. Entre estas técnicas se mencionan el Spectral Analysis of Surface Wave (SASW), su versión multicanal MASW (Multichannel Analysis of Surface Wave) y el método de Refracción por Microtremores (ReMi) (Rojas, 2008)

3.5 VS 30

Una simple manera de caracterizar las condiciones dinámicas de sitio para estudios geotécnicos y de riesgo sísmico, es mediante una clasificación del tipo de suelo o depósito de suelo, a través de las velocidades de ondas de corte del subsuelo. La velocidad equivalente para los primeros 30 m del subsuelo (V_{s30}) es un parámetro ampliamente usado en códigos recientes de construcción para evaluar los efectos de sitio (Bard, 1999).

3.6 Determinación de V_{s30} a partir de datos topográficos

El V_{s30} topográfico es un parámetro introducido por Wald y Allen (2007), quienes promueven el uso de la pendiente topográfica como una aproximación rápida para reconocer las condiciones sísmicas y amplificaciones del sitio alrededor de todo el mundo. Este parámetro se basa en la correlación entre la pendiente topográfica y el valor de V_{s30} medido en puntos donde se conoce la tectónica involucrada, pudiendo ser estas de carácter tectónico activo o continental estables. Dichas correlaciones fueron realizadas utilizando DEMs de 30 arcossegundos (Wald y Allen, 2007), y fueron posteriormente recalculadas basadas en DEMs de 9 arcossegundos (Allen y Wald, 2009).

3.7 Efectos de sitio

Los movimientos sísmicos de la tierra, están influenciados de una forma importante por las características geotécnicas y la geología de superficie de los depósitos de suelo. Los llamados “efectos de sitios” corresponden a las variaciones de los movimientos sísmicos en espacio, amplitud, frecuencia y duración. Éstos incluyen principalmente los efectos de contraste de influencia sobre los depósitos de suelos ubicados sobre el basamento (Bard, 1999).

En general, los efectos de sitios pueden ser definidos como las perturbaciones de las características originales de las ondas (la amplitud, contenido de frecuencia y la duración), debido a los rasgos geométricos de los depósitos de suelo y la topografía.

3.8 Microtremores

Yauri (2006) afirma que los microtremores, también llamados ruido ambiental, microtrepidaciones, microtemblores, oscilaciones omnipresentes y ruido de fondo, son vibraciones aleatorias inducidas en las masas de suelo y roca por fuentes naturales y artificiales. Este tipo de información es principalmente utilizada para el estudio de las propiedades y formas de las capas superficiales.

Los microtremores contienen básicamente ondas superficiales del tipo Rayleigh y Love de ahí que permiten caracterizar las estructuras geológicas de los suelos, dado que las fuentes están distribuidas al azar. Yauri (2006).

3.9 Interferometría sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales

La interferometría sísmica puede ser aplicada mediante dos pasos simples (Curtis et al., 2006): Los registros de cada fuente son correlacionados y los correlogramas resultantes son sumados (apilados). Se obtiene, para tiempos positivos, el sismograma que habría sido obtenido en cada

receptor si en la posición del otro se ubicara una fuente, mientras que para tiempos negativos se obtiene el reverso del anterior sismograma. Se ha construido una traza sísmica a partir de una fuente virtual, la cual está ubicada en la posición de uno de los receptores. Para los efectos de este manuscrito se referirá al método como IMASW (*Interferometric Multichannel Analysis of Surface Waves*).

3.10 Refracción por Microtremores, ReMi

Es un método de sísmica pasiva, empleado para modelar la estructura de la velocidad de la onda S y está basado en dos ideas fundamentales. La primera es: que los equipos utilizados para la sísmica de refracción, dispuestos de una manera casi idéntica a la usada para registrar refracción de onda P someras, pueden efectivamente grabar ondas superficiales a frecuencias tan bajas como 2 Hz. La segunda idea es que, una simple transformada en dos dimensiones, lentitud y frecuencia ($p-f$), de un registro de microtremores puede separar la llegada de las ondas Rayleigh de la llegada de otras ondas sísmicas, permitiendo reconocer su verdadera velocidad de fase y no su velocidad aparente (Pullammanappallil *et al.*, 2003).

3.11 Ensayo de Penetración Estándar (SPT)

El ensayo de penetración estándar, comúnmente llamado SPT por sus siglas en inglés, es utilizado para obtener muestras perturbadas no drenadas de suelo, a través de un muestreador denominado cuchara partida. Adicionalmente, permite medir la resistencia al corte que ofrece el suelo a la penetración del muestreador (ASTMD 1586, 1999).

Desde el siglo pasado, gran cantidad de países aplican el método a nivel geotécnico para conocer básicamente el tipo de suelo que se encuentra a distintas profundidades a lo largo de una perforación en un sitio de interés; ya sea con fines geológicos, para reconocimiento de los estratos, para diseño de fundaciones, para localización del nivel freático y para correlacionar y validar la litología del sitio con otros parámetros importantes como por ejemplo velocidades de onda de corte. Uno de los principales usos del SPT (Alviar y Penela, 1985) además de la

evaluación de la densidad relativa, lo constituye la determinación del potencial de licuación en arenas bajo la acción de efectos sísmicos.

El SPT consiste esencialmente en hacer hincar verticalmente el recuperador de muestras dentro del suelo mediante un sistema de barras enroscadas que se golpean por el extremo superior mediante un yunque que a su vez es impactado por un martillo de 63,5 kilogramos, el cual se deja caer desde una altura cercana a 76 cm.

Este ensayo es de fácil ejecución, aunque complejo por la naturaleza dinámica de la carga; ya que no toda la energía aplicada al sistema es transferida al saca muestra, sino que parte de ésta es absorbida por el terreno (impedancia del material), por la longitud de las barras, por el contacto martillo – yunque, por el manejo del perforador, por la fricción del forro y por el tipo de muestreador. Alviar y Penela (1986), desarrollaron un método simplificado para evaluar la eficiencia energética, n , del ensayo expresada como la relación entre la energía incidente en el sistema de barras y la energía potencial teórica (475 Joules) que suministra el martillo cuando se deja caer a la altura normalizada. Es normal a nivel mundial que este valor varíe en función del equipo de perforación y de sus características, razón por la que diversos investigadores han establecidos factores para su corrección.

3.12 Clasificación de suelos según norma COVENIN 1756 (2001)

| Material | VsP (m/s) | H (m) | Zonas sísmicas 1 a 4 | | Zonas sísmicas 5 a 7 | |
|--|-----------|---------|----------------------|--------|----------------------|--------|
| | | | Forma espectral | ϕ | Forma espectral | ϕ |
| Roca sana/fracturada | >500 | *** | S1 | 0,85 | S1 | 1,00 |
| Roca blanda o meteorizada y suelos muy duros o muy densos | >400 | <30 | S1 | 0,85 | S1 | 1,00 |
| | | 30 - 50 | S2 | 0,80 | S2 | 0,90 |
| | | > 50 | S3 | 0,70 | S2 | 0,90 |
| Suelos duros o muy densos | 250 - 400 | <15 | S1 | 0,80 | S1 | 1,00 |
| | | 15 - 50 | S2 | 0,80 | S2 | 0,90 |
| | | > 50 | S3 | 0,75 | S2 | 0,90 |
| Suelos firmes/medio densos | 170 - 250 | ≤50 | S3 | 0,70 | S2 | 0,95 |
| | | >50 | S3 | 0,70 | S3 | 0,75 |
| Suelos blandos/sueltos | <170 | ≤15 | S3 | 0,70 | S2 | 0,90 |
| | | >15 | S3 | 0,70 | S3 | 0,80 |
| Suelos blandos o sueltos intercalados con suelos más rígidos | *** | H1 | S3 | 0,65 | S2 | 0,70 |

Figura 3.12.1 Clasificación de suelos empleada por la norma COVENIN (2001).

| Clase | Descripción | Vs30 (m/s) |
|-------|---|------------|
| A | Roca dura | > 1500 |
| B | Roca | 760-1500 |
| C | Suelo denso - Roca suave | 360-760 |
| D | Suelo suave | 180-360 |
| E | Perfil del suelo | <180 |
| F | Suelos que requieren evaluaciones específicas | |

Figura 3.12.2 Clasificación de suelos basada en Vs30 según las recomendaciones de NEHRP (2003).

3.13 Fenómeno de licuación del suelo

La licuación del suelo es un fenómeno en el que la resistencia y rigidez de un suelo se ve reducida considerablemente debido a un sismo o una carga rápida y repetitiva. Éste y otros fenómenos relacionados con ésta son responsables de enormes daños en históricos terremotos del mundo.

En la norma COVENIN 1756 (2001) lo definen como la pérdida temporal de la capacidad de soporte de un suelo suelto durante un sismo, comportándose como un líquido.

Kramer S. (1996) describe a la licuación de suelo como la facilidad con que un suelo puede perder toda su resistencia cortante y comportarse como un líquido. Esta susceptibilidad es propia de los limos o arenas no cementados saturados que se encuentran a poca profundidad.

Según (Crespo, 2004) licuacion es la disminucion sustancial y temporal de la resistencia al corte del terreno principalmente como consecuencia de la accion de las ondas de corte sismicas sobre él. Este fenomeno se considera un proceso no drenado, es decir, se presenta generalmente entre capas lutiticas que evitan que el agua salga del estrato licuado y mayormente ocurre en suelos de comportamiento granular que tengan una distribucion de particulas uniforme y con cierta cantidad de contenido de materiales finos como limos o arcillas, es decir, gravas y arenas bien gradadas, arenas finas y arenas limosas.

Finalmente según Amundaray J. (2006), refiere que la licuación es el proceso mediante el cual, un sedimento que se encuentra sumergido, experimenta una pérdida de resistencia y deja de comportarse como un sólido para comportarse como un líquido viscoso. Los tipos de sedimentos más susceptibles a licuar, son arenas y limos libres de partículas de arcilla.

3.13.1 Factores que inciden en la ocurrencia del fenómeno de licuación del suelo

Pardon y Porcelet (1994), establecen que la experiencia ha demostrado, que existen siete factores importantes para determinar el potencial de un suelo para licuarse:

Magnitud y duración del Movimiento Sísmico

Normalmente la duración de un movimiento sísmico es corto (entre 5 a 40 segundos), pero si este es intenso, predominará la condición no drenada, es decir la disipación de la presión de poros se verá restringida, y por el contrario se evidenciará el aumento de la misma produciendo en algún momento condiciones de esfuerzo efectivo nulo, y por lo tanto, licuación.

La capacidad del suelo para resistir una vibración provocada por un sismo sin causar fallas depende de la magnitud del movimiento sísmico, incluida tanto su amplitud como su duración. Los movimientos más fuertes tienen mayor probabilidad de causar fallas. La licuación de suelos bajo condiciones de tensión provocadas por un terremoto puede ocurrir ya sea cerca del epicentro durante terremotos pequeños o moderados, o a cierta distancia en caso de terremotos moderados a severos.

Tipo de Suelo

Los suelos más susceptibles a sufrir licuación son aquellos que poseen una granulometría uniforme, siendo las arenas finas uniformes las que son más propensas a licuar que las arenas gruesas uniformes. Además, según algunos autores las arenas limosas poseen mayor resistencia a sufrir licuación con respecto a las arenas limpias o con escaso contenido de finos.

Densidad Relativa - Relación de Vacíos

La licuación ocurre principalmente en suelos sueltos, saturados y no cohesivos. Ese suelo puede densificarse cuando está sujeto a una carga cíclica. La tendencia a densificarse reduce el volumen de suelo y agua e incrementa la presión intersticial si los poros intergranulares se llenan de agua. Cuando esta presión se vuelve igual a la tensión media total, el suelo pierde su resistencia y se licua. Si el suelo es denso, habrá menos posibilidad de que se produzca la licuación.

Una arena con un valor de resistencia a la penetración estándar de 40 golpes/pie (densidad relativa de 70 a 80%) puede mostrar evidencias de licuación en la forma de volcanes de arena, pero no es probable que experimente más del 10% de deformación por corte bajo la influencia de la vibración sísmica, aún después de que se hayan desarrollado altas presiones de poros. En contraste con ello, arenas con valor de 20 golpes/pie (densidad relativa de 30 a 60%), pueden desarrollar relaciones de presiones de poro de 100% y experimentar deformaciones por corte muy grandes del orden del 25-30%, bajo la acción de los esfuerzos de corte aplicados.

Presencia de Agua

Es una condición necesaria para que ocurra licuación. La presión de poros, producida por el agua que ocupa los vacíos existentes entre las partículas del material debido a la posición de nivel freático, se incrementa por efecto de la vibración producida en el movimiento sísmico. Por consiguiente, la ubicación del nivel freático cuando se produzca un sismo en un depósito arenoso, será de mucha importancia porque regirá la condición de saturación y por lo tanto, influirá también en el esfuerzo efectivo. El agua se puede presentar de las siguientes maneras:

- **Aguas Freáticas:** Las aguas freáticas, son entonces las aguas que encontramos cuando el suelo está saturado, y están por debajo de este nivel freático (punto que el contenido de aire es totalmente ocupado por el agua).

- Aguas Infiltradas: Se refiere al agua que se ha filtrado bajo la tierra por un periodo corto y continúa su camino hacia el acuífero.
- Aguas Emperchadas: ocurre cuando la precipitación que cae sobre la superficie impregna al suelo, y el agua desciende hasta encontrarse con una estratigrafía que no le permita seguir su curso por un largo período de tiempo.

Peso del recubrimiento y profundidad del suelo

Las tensiones entre partículas aumentan a medida que se incrementa la presión del recubrimiento. Mientras mayor sea la tensión entre las partículas, menor será la probabilidad de que ocurra la licuación. Por lo general, la licuación ocurre a profundidades menores de 9 metros; rara vez ocurre a profundidades mayores de 15 metros.

Edad del depósito

Los suelos débiles y no cohesivos por lo general son jóvenes. Con el tiempo, actúan dos factores para incrementar la resistencia de un suelo típico: la compactación (que cambia la relación de vacíos) y varios procesos químicos (que actúan para cementar los granos del suelo). Una regla general es que los depósitos antiguos tienen poca probabilidad de licuarse, mientras que los depósitos recientes tienen mayor probabilidad de licuarse.

Origen del suelo

El suelo depositado por procesos fluviales se sedimenta fácilmente y sus granos tienen poca probabilidad de compactarse. De manera similar, los rellenos artificiales no compactados, generalmente por debajo del nivel del agua, pueden tener deficiencias similares; todos ellos se licuarán con facilidad. Por otro lado, los sedimentos depositados glacialmente, particularmente aquellos sobre los cuales ha pasado un glaciar, ya son bastante densos y tienen menor probabilidad de licuarse.

3.13.2 Evaluación de riesgo de licuación

Criterios de Riesgo

El riesgo de licuación de un suelo puede ser evaluado usando los siguientes criterios, descritos por Kramer y Stewart (2004):

- **Criterios históricos:** La licuación ocurre frecuentemente en los mismos lugares cuando las condiciones del sitio se mantienen constantes.
- **Criterios geológicos:** Los suelos de depósitos fluviales y eólicos, cuando se encuentran saturados, tienen una alta probabilidad de ser susceptibles de presentar licuación. También se ha observado licuación en depósitos de abanicos aluviales, playas y estuarios. Otro criterio geológico es la edad del depósito, en general los depósitos de suelo jóvenes son más susceptibles de licuación que los depósitos más antiguos.
- **Criterios basados en la composición del suelo:** Las arenas uniformemente gradadas y limpias, compuestas principalmente de partículas redondeadas son intrínsecamente más susceptibles, mientras que los suelos bien gradados y los suelos con partículas angulares son menos susceptibles. La presencia de finos, particularmente finos plásticos ($IP > 10$), tiende a disminuir la susceptibilidad de licuación.
- **Criterios basados en el estado del suelo:** El estado del suelo como las tensiones efectivas a las que está sometido y su densidad insitu influyen en el potencial de licuación, ya que la tendencia de un terreno a densificarse, bajo condiciones de carga cíclicas, depende de ellas.

3.13.3 Métodos para evaluar el riesgo de Licuación:

Kramer (1996) establece que los métodos existentes para evaluar el potencial de licuación de los suelos pueden dividirse en dos (02) grupos:

1. Métodos basados en el comportamiento observado en terremotos anteriores: Se apoyan en correlaciones empíricas de algunas características de los suelos, obtenidas mediante pruebas de campo, y/o ensayos simples de laboratorio, con el comportamiento de los mismos observado en sismos previos.

2. Métodos simplificados: Se basan en la comparación de la resistencia obtenida en ensayos cíclicos de laboratorio con los esfuerzos que provocará el sismo, calculados en forma simplificada.

Los métodos del grupo 1 se basan en el hecho de que la resistencia a la licuación y ciertas propiedades determinadas mediante ensayos in situ (resistencia a la penetración, velocidad de propagación de ondas de corte, entre otros), varían de la misma forma en función de las características principales de los suelos. Sin embargo, a la fecha solo se cuentan con una gran cantidad de datos provenientes de pruebas de resistencia a la penetración, especialmente SPT, mientras que la cantidad de datos que se tiene de las otras propiedades resulta, en algunos casos, insuficiente como para obtener buenas correlaciones a partir de ellas.

Debido al hecho que la mayoría de los depósitos naturales de arena son muy poco uniformes y a la extrema dificultad de obtener muestras inalteradas de suelos no cohesivos para ensayos de laboratorio, se desarrollarán básicamente los métodos llamados empíricos o simplificados.

3.13.4 Métodos basados en el número de golpes SPT para evaluar el potencial de licuación de un suelo

Existen diferentes métodos que evalúan el potencial de licuación de un suelo, entre ellos están: Método Simplificado de Iwasaki y Tatsuoka (1978), Método de Seed & Idriss (1982) y el Método de Idriss & Boulanger (2008).

Método de Seed & Idriss: (1982) es un procedimiento semi-empírico, basado en registros del Ensayo de Penetración Estándar (SPT), es bastante práctico y se ha mantenido vigente en el tiempo, porque el ensayo SPT es ampliamente aceptado y se utiliza en la mayoría de las investigaciones geotécnicas cotidianas. Además, evita realizar ensayos dinámicos que son complejos y costosos. El procedimiento ha sido revisado y actualizado en las últimas tres décadas por los expertos en la materia, ratificando la practicidad e importancia de su uso, siendo la última modificación la realizada por Idriss & Boulanger (2008).

En Venezuela, el ensayo SPT está ampliamente generalizado, hasta el punto que se podría decir que es prácticamente el único ensayo de campo del que se puede tener información geotécnica que se utiliza para evaluar el potencial de licuación.

Para evaluar la resistencia a la licuación de un suelo es necesario estimar dos variables:

1 La razón de esfuerzos de corte cíclicos (CSR): es la demanda sísmica en el estrato de suelo. Se puede estimar según la formulación:

$$CSR = \left[\frac{\tau_{\sigma\vartheta}}{\sigma'_{\vartheta o}} \right] = 0.65 * \left[\frac{amax}{g} \right] * \left[\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right] * rd \quad (\text{Ec.1})$$

Dónde:

- *amax*: Aceleración pico horizontal del terreno generado por el sismo.
- *g*: Aceleración de gravedad.
- *σ_{vo}*: Esfuerzo total vertical
- *σ'_{vo}*: Esfuerzo efectivo vertical.
- *rd*: Coeficiente de reducción de esfuerzos.

Para el cálculo de las presiones que afectan el suelo, tanto las totales como las efectivas, utilizamos la teoría de la mecánica de suelos básica.

Esfuerzo vertical total:

$$\sigma_{vo} = \sum z_1 * \gamma_1 + z_2 * \gamma_2 + z_n * \gamma_n \quad (\text{Ec. 2})$$

Presión de poros:

$$u = \gamma_0 * z_0 \quad (\text{Ec. 3})$$

Esfuerzo vertical efectivos:

$$\sigma'_{vo} = \sigma_{vo} - u \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

- z_n : Profundidad a estudiar
- z_0 : Profundidad por presencia de agua
- γ_n : Peso específico del suelo
- γ_0 : Peso específico del agua
- u : Presión de poros

El coeficiente r_d toma en cuenta la flexibilidad de la columna del suelo; cuando el valor es igual a 1 corresponde a un elemento de comportamiento rígido, dicho valor disminuye con la profundidad tal como se muestra en la figura 7. El valor promedio de r_d se puede estimar según las siguientes expresiones:

- $r_d = 1.0 - 0.00765 (z)$ para $z \leq 9.15\text{m}$
- $r_d = 1.174 - 0.0267 (z)$ para $9.15\text{m} \leq z \leq 23\text{m}$
- $r_d = 0.744 - 0.00800 (z)$ para $23\text{m} < z \leq 30\text{m}$

- $r_d = 0.500(z)$ para $z > 30\text{m}$

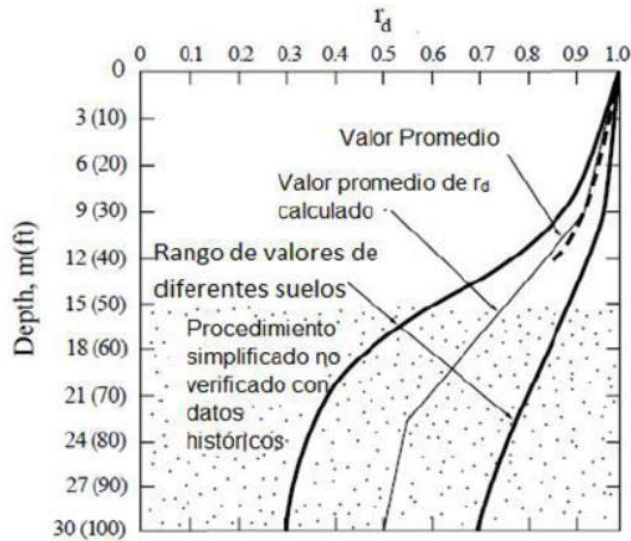


Figura 3.13.1. Curva r_d versus profundidad desarrollada por Seed & Idriss (1971). Fuente: Youd & Idriss (2001), citado por Kramer y Stemart (2004)

Otros autores han coincidido que para obtener r_d , es importante tener una ecuación que permita obtener los valores de reducción y sea consistente con los valores obtenidos en la práctica. Con la siguiente ecuación obtenemos los mismos valores de las ecuaciones anteriores, pero se reduce a una sola ecuación (Youd e Idriss, 1997):

$$r_d = \frac{1 - 0.4113^{0.5} + 0.0452(z) + 0.001753(z^{1.5})}{1 - 0.4113^{0.5} + 0.05729(z) - 0.006205(z) + 0.00121(z^2)} \quad (\text{Ec. 5})$$

2 Relación de resistencia cíclica (CRR)

La relación de resistencia cíclica (CRR), es la capacidad del suelo de resistir a la licuación. En el Workshop de 1997 los autores Youd e Idriss (1997), realizaron una ligera modificación a la curva inicialmente propuesta por Seed & Idriss (1971), con el fin de que las curvas para arenas limpias tengan una mayor consistencia con las curvas desarrolladas a partir del CPT y la velocidad de ondas de corte. La curva así propuesta se ilustra en el siguiente gráfico.

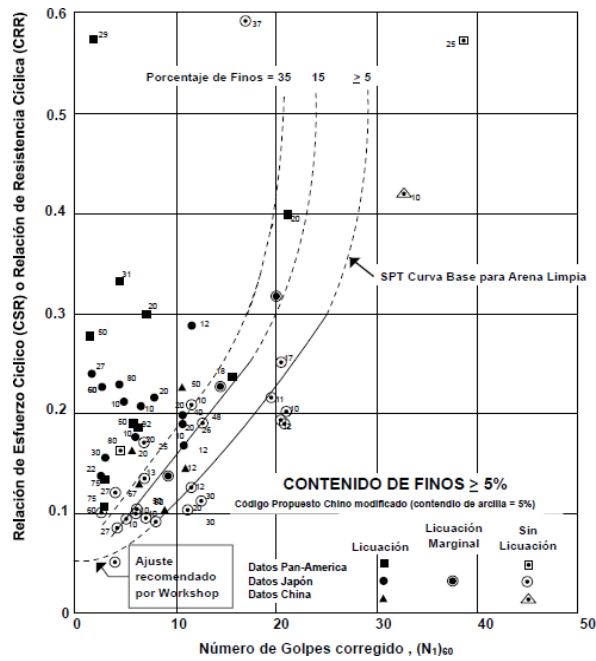


Figura 3.13.2. Relación de esfuerzo cíclico versus números de golpes Fuente: Kramer y Stewart (2004)

Para el caso de arenas limpias, por ejemplo, los autores recomiendan utilizar la ecuación propuesta por Rauch de la Universidad de Texas:

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N1)_{60}} + \frac{(N1)_{60}}{135} + \frac{50}{[10(N1)_{60} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde

- $(N1)_{60}$: es el número de golpes del ensayo SPT normalizados para una energía del 60%.
- $CRR_{7.5}$: es la relación de resistencia cíclica para un sismo de magnitud 7.5. Esta ecuación es válida para $(N1)_{60} < 30$. Para $(N1)_{60} \geq 30$ las arenas limpias son muy densas, y por tanto clasifican como no licuables.

En el workshop de 1997 Youd e Idriss (1997), los autores proponen utilizar la expresión desarrollada por I. M. Idriss con la asistencia de R. B. Seed, para la corrección de $(N1)_{60}$, para el equivalente a una arena limpia $(N1)_{60cs}$:

$$(N1)_{60cs} = \alpha + \beta(N1)_{60} \text{ (Ec. 7)}$$

Donde α y β son coeficientes, que dependen del contenido de finos, y cuyos valores se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 3.13.1. Valores de los coeficientes en función del contenido de finos (FC) Fuente: Seed & Idriss (1971)

| FC | α | B |
|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| $\leq 5\%$ | 0 | 1 |
| $5\% \leq FC \leq 35\%$ | $\exp[1.76 - 190/FC^2]$ | $[0.99 + (FC1.5/ 1000)]$ |
| $FC \geq 35\%$ | 5 | 1,2 |

Tabla 3.13.2 Valores de los factores de corrección para SPT. Fuente: Amundaray (2006).

| Factor | Variable del Equipo | Simbología | Corrección |
|-------------------------|---------------------------|------------|------------------------------|
| Presión confinante | - | CN | $(P\sigma / \sigma_{vo})0.5$ |
| Presión confinante | - | CN | $CN \leq 1.7$ |
| Relación de energía | Martillo tipo Donet | CE | 0,5 - 1 |
| Relación de energía | Martillo de seguridad | CE | 0,7 - 1,2 |
| Relación de energía | Martillo automático | CE | 0,8 - 1,3 |
| Diámetro de perforación | 65 - 115 mm | CB | 1,00 |
| Diámetro de perforación | 150 mm | CB | 1,05 |
| Diámetro de perforación | 200 mm | CB | 1,15 |
| Longitud de tubería | < 3 m | CR | 0,75 |
| Longitud de tubería | 3 - 4 m | CR | 0,80 |
| Longitud de tubería | 4 - 6 m | CR | 0,85 |
| Longitud de tubería | 6 - 10 m | CR | 0,95 |
| Longitud de tubería | 10 - 30 m | CR | 1,00 |
| Método de muestreo | Muestreador estándar | CS | 1,00 |
| Método de muestreo | Muestreador con protector | CS | 1,1 - 1,3 |

Finalmente, los autores recomiendan para el (N1)60, la siguiente expresión:

$$(N1)60 = NmCn + Ce * Cb * Cr * Cs \text{ (Ec. 8)}$$

Dónde:

- Nm: Medida de la resistencia a la penetración estándar.
- Cn: Factor para normalizar Nm a un esfuerzo de sobrecarga común.
- Ce: Factor de corrección por la relación de energía del martillo (ER).
- Cb: Factor de corrección por el diámetro del hueco de perforación.
- Cr: Factor de corrección por la longitud de barras de perforación.
- Cs: Factor de corrección por extracción de muestras sin protector (liner).

Para estimar el factor C_n , los autores recomiendan utilizar la fórmula propuesta por Youd & Idriss (2001), la cual está dada por la siguiente expresión:

$$C_n = \frac{2.2}{1.2 + \sigma_{vo}} \quad (\text{Ec. 9})$$

El resto de los coeficientes se muestran en la tabla 3.13.2.

Corrección por escala de magnitud de sismo

Los datos utilizados para construir las curvas (CRR) se basan en observaciones a sismos de magnitud 7.5. Para ajustar las curvas a magnitudes diferentes a 7.5, es necesario aplicar factores de corrección de escala. El factor de seguridad contra la licuación (FS) se calcula:

$$FS = \frac{CRR_{7.5}}{CSR} * MSF \quad (\text{Ec.10})$$

- $CRR_{7.5}$: relación de resistencia cíclica para sismos de magnitud 7.5.
- CSR: relación de esfuerzos cíclicos inducidos por el sismo de magnitud M_w .
- MSF: factor de corrección para ajustar la curva $CRR_{7.5}$ a un sismo de magnitud M_w .

Existen distintos criterios para estimar los factores MSF los cuales se grafican en la figura 3.13.3, para efectos de la ingeniería práctica Idriss (1995) propone los factores MSF mediante la siguiente ecuación:

$$MSF = \frac{10^{2.24}}{M_w^{2.56}} \quad (\text{Ec.11})$$

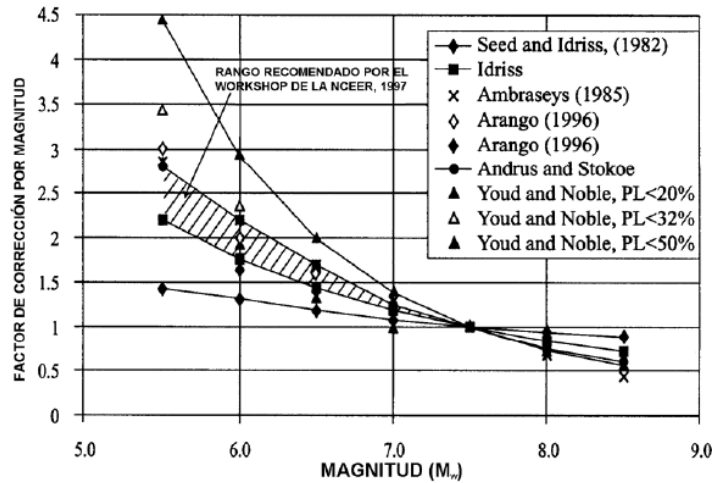


Figura 3.13.3 Factores de escala de magnitud derivados de varios investigadores Fuente: Youd & Idriss. (2001)

Correcciones por altos esfuerzos de sobrecarga y esfuerzos de corte estático

Los factores de corrección K_α y K_σ fueron desarrollados para ajustar la relación de resistencia cíclica a presiones de sobrecarga y tensiones de corte más grandes que las existentes en el desafío del procedimiento simplificado. Como se ha visto anteriormente, el procedimiento simplificado solo es válido en sitios poco inclinados (baja tensiones de corte) y a profundidades menores de 15 metros bajas presiones de sobrecarga). El factor K_σ extiende las relaciones cíclicas para altas presiones de sobrecarga, mientras que el factor K_α extiende el procedimiento simplificado para condiciones de terreno en pendiente, estos factores se usan para corregir la ecuación de FS como se muestra a continuación:

$$FS = \frac{CRR_{7.5}}{CSR} * MSF * K_\alpha * K_\sigma \text{ (Ec. 12)}$$

Corrección por Esfuerzos de Confinamiento Elevados (K_σ)

La resistencia a la licuación de suelos se incrementa de manera no real en la medida que aumentan los esfuerzos de confinamiento; por lo cual para tomar en cuenta estos efectos, es recomendable el uso de un factor de corrección, que se presenta en la fórmula siguiente:

$$K_\sigma = \sigma_v^{f-1} \text{ (Ec. 13)}$$

Nota: La fórmula anterior se expresa en Kgf/cm^2

Donde f es un exponente que es función de la densidad. Los valores recomendados de f son:

$$f=0,7-0,8 \text{ para } Dr=40-60\%$$

$$f=0,6-0,7 \text{ para } Dr=60-80\%$$

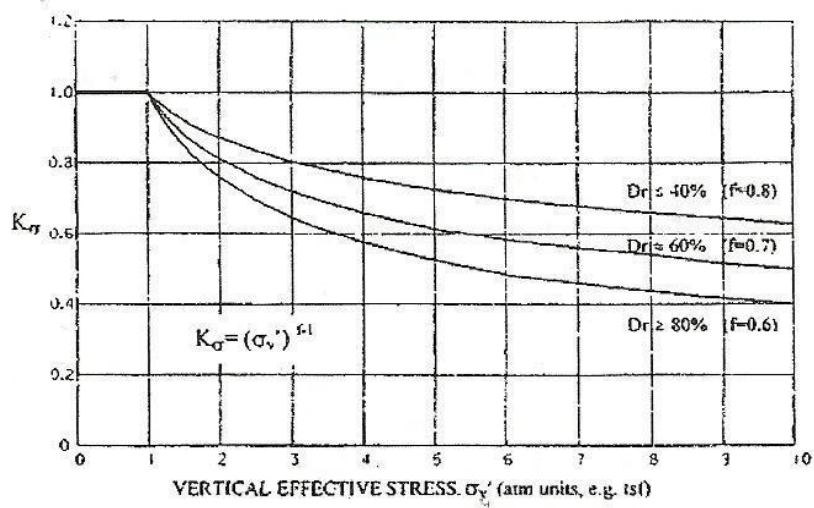


Figura 3.13.4. Curva recomendada para determinar K_σ Fuente: Youd & Idriss (2001)

Corrección para condiciones del terreno en pendiente ($K\alpha$)

Para determinar el factor de pendiente, sabemos que esta induce esfuerzos de corte estáticos en el interior del suelo, aunque no sea afectado por un terremoto. El esfuerzo de corte estático, se puede evaluar normalizando el esfuerzo efectivo vertical inicial. El resultado nos proporciona un valor llamado alfa, el cual se muestra en la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{T_{st}}{\sigma_{vo}} \text{ (Ec. 14)}$$

Dónde:

- α : Relación entre el esfuerzo cortante y el esfuerzo efectivo vertical inicial.
- T_{st} : Esfuerzo cortante estático
- σ_{vo} : Esfuerzo efectivo vertical inicial

Para terrenos totalmente horizontales, el coeficiente alfa es igual a cero como muestra la figura 3.11.5

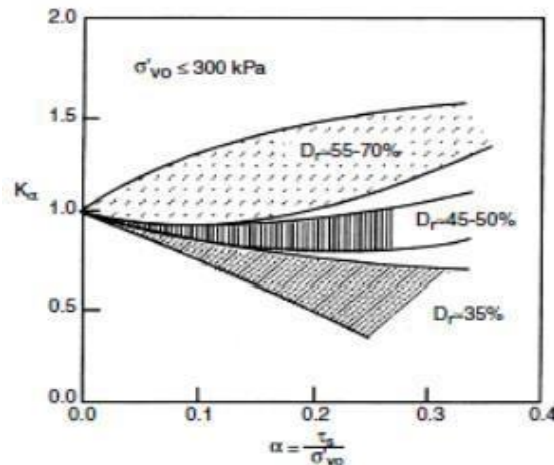


Figura 3.13.5. Relación del factor de pendiente ($K\alpha$) contra alfa (α) Fuente: Brandes (2003)

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

En el presente capítulo se describe el conjunto de procedimientos operacionales y técnicos que se llevaron a cabo con la finalidad de realizar la presente investigación.

4.1 Información previa

Como se explica en los capítulos anteriores, al inicio de esta investigación se llevó a cabo una revisión bibliográfica sobre la información geológica, geofísica y geotécnica existente de la ciudad de Maracay, la información recopilada fue usada para conocer las condiciones de la zona de estudio, para saber que parámetros usar durante el procesamiento de los datos y para darle sentido a los resultados obtenidos.

A continuación se muestra una lista de los datos usados para la realización de este estudio así como la ubicación de las estaciones, tendidos o perforaciones con las cuales se generaron los datos con los que se hizo los mapas de profundidad de sedimentos, Vs30, potencial de licuación etc.

4.1.1 Datos de ruido sísmico

Los datos de ruido antrópico se dividen en dos clases aquellos que sirvieron para procesarse con los métodos de ReMi e IMASW y de esta forma generar mapas de Vs30 y aquellos que se utilizaron para procesarse con el Método de Nakamura o relación espectral H/V.

4.1.1.1 Datos de ReMi e IMASW

Se utilizaron los datos resultantes del trabajo hecho por (Escobar, 2019) quien analizo registros de ruido sísmico de 70 tendidos dispuestos en toda el área de la ciudad de Maracay y que fueron adquiridos por Casalena en el 2011 como parte de los trabajos de investigación

realizados por FUNVISIS. Estos registros tienen un intervalo de muestreo de 0,004 s. Fueron adquiridos mediante arreglos lineales de 48 geófonos de frecuencia fundamental 4,5 Hz. Cada uno de los registros tiene una duración de 30 s, siendo en total 14 registros para cada tendido.

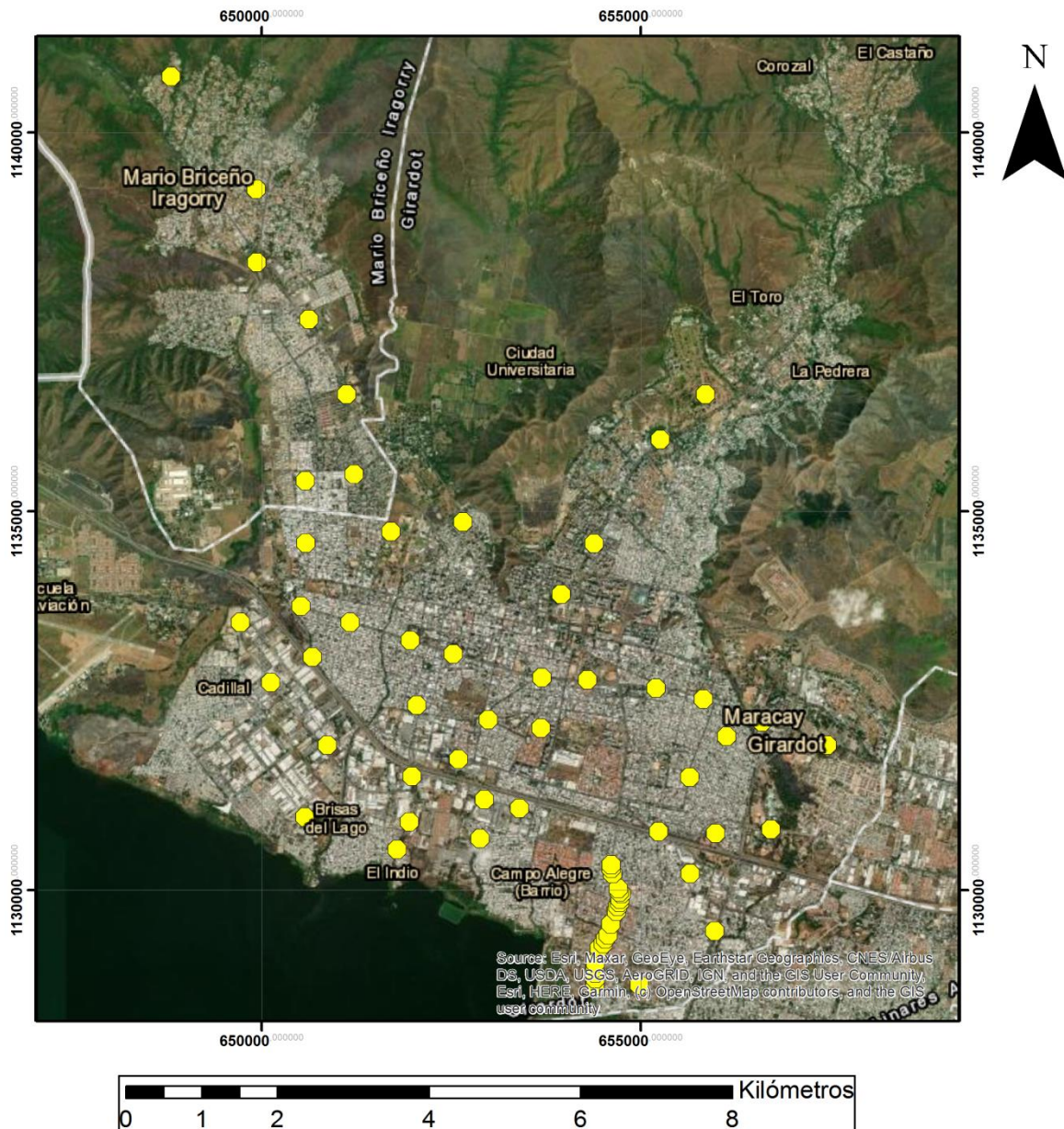


Figura 4.1 Distribución de los tendidos de ruido sísmico. El punto amarillo representa el centro de cada tendido. (Tomada de Arcgis 10.4)

4.1.1.2 Datos de relación espectral H/V

Se usaron los datos adquiridos por Rojas (2008), en total fueron 315 mediciones de ruido sísmico, con un espaciamiento de 500 m entre cada estación, permitiendo cubrir el área de estudio uniformemente, tal como se muestra en la figura 4.2. La longitud de grabación de los registros fue de 20 minutos en este caso.

4.1.2 Perforaciones geotécnicas

Para el procesamiento de datos geotécnicos se utilizaron un total de 465 perforaciones otorgadas por la empresa OT Heredia. Contenían información como el número de golpes de SPT, profundidad, contenido de finos, peso específico y tipo de suelo de cada capa además de la profundidad del nivel freático de cada perforación como se muestra en la figura 4.4 (planilla de perforación de la empresa OT Heredia). Esta información fue sumamente útil en el cálculo del potencial de licuación de la ciudad así como en el cálculo de V_{s30} por SPT. En la figura 4.3 se muestra la ubicación de las perforaciones.

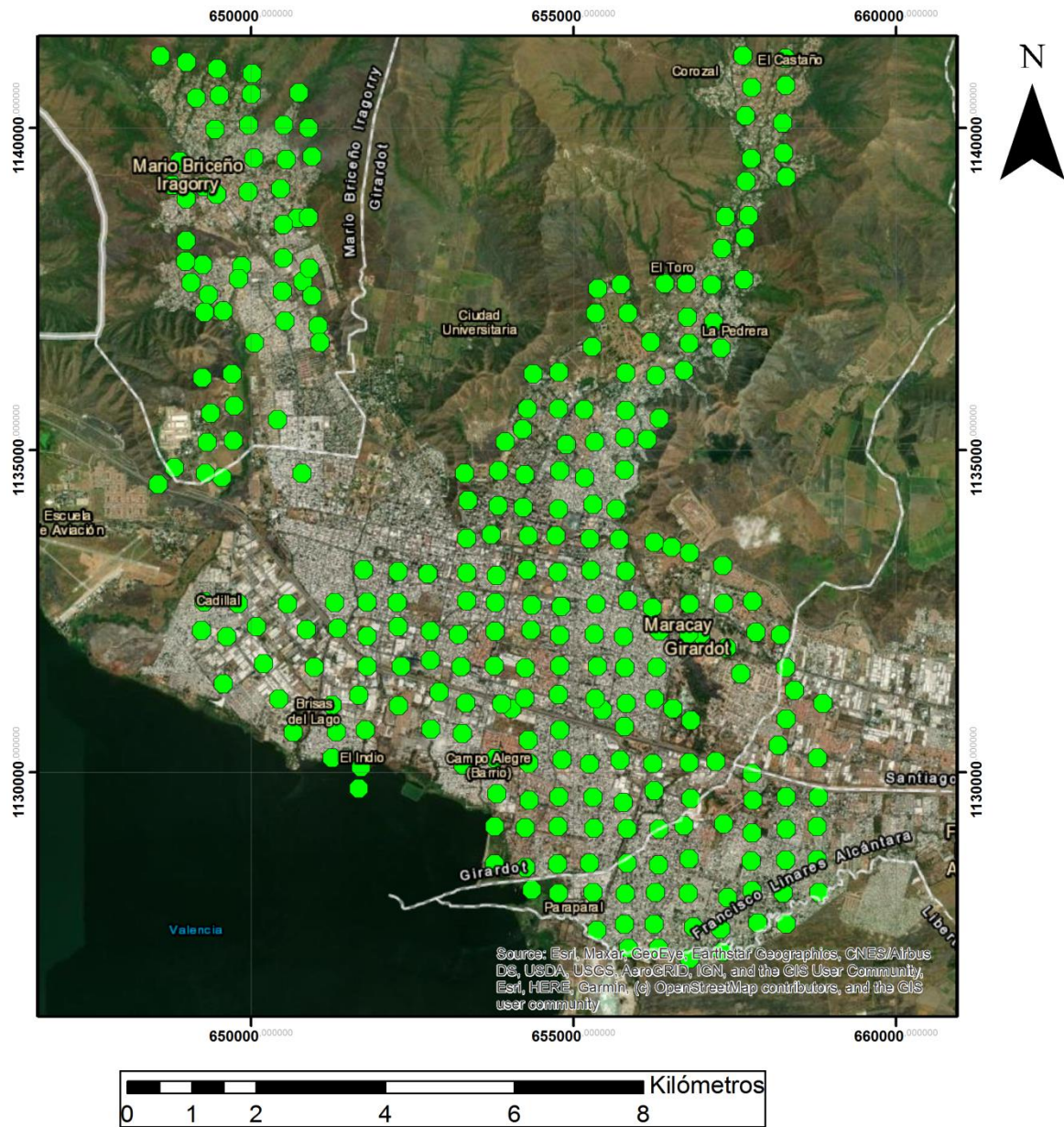


Figura 4.2 Distribución de las estaciones de ruido sísmico usadas en el método H/V. El punto verde representa la ubicación de cada estación. (Tomada de Arcgis 10.4).

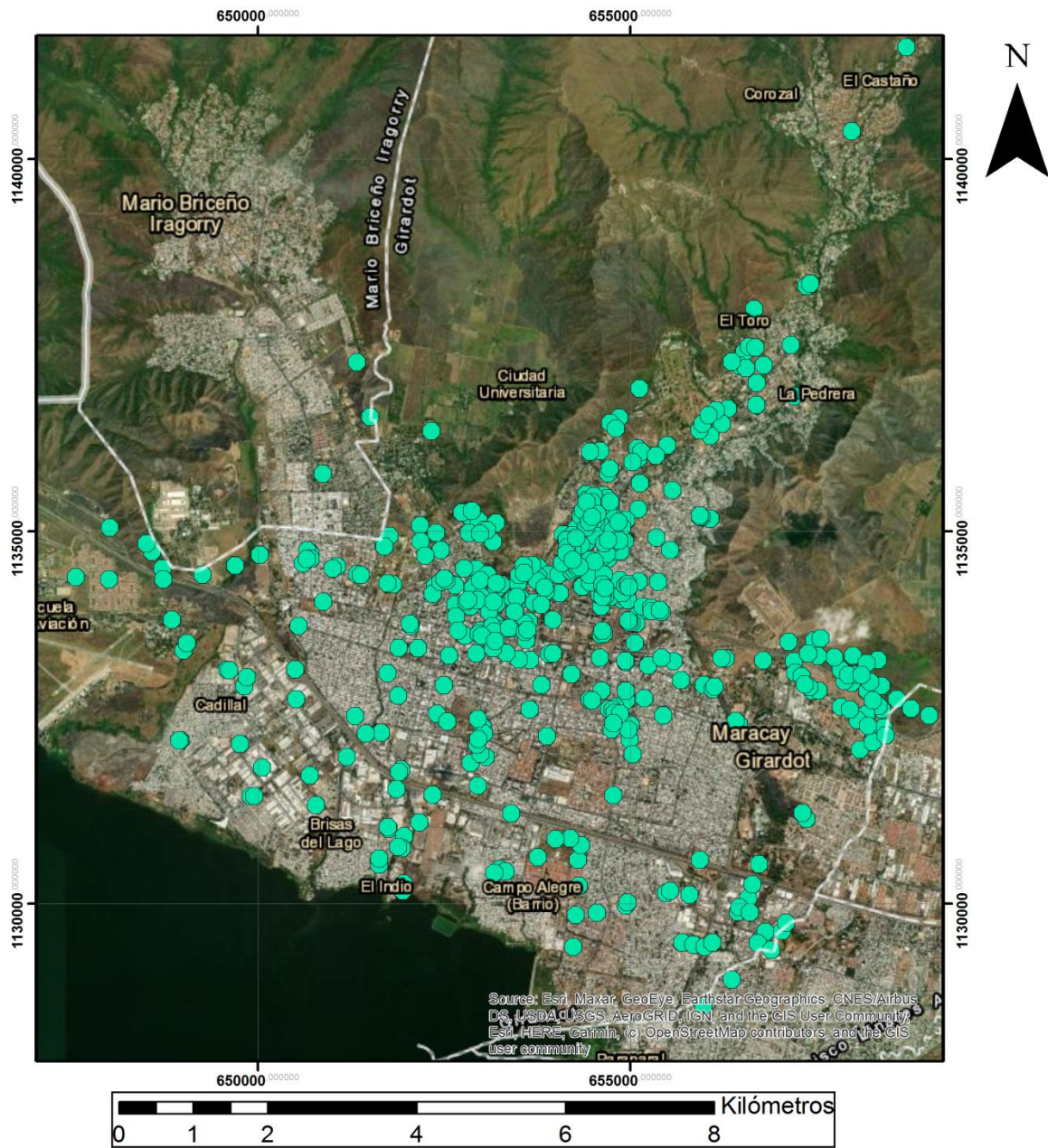
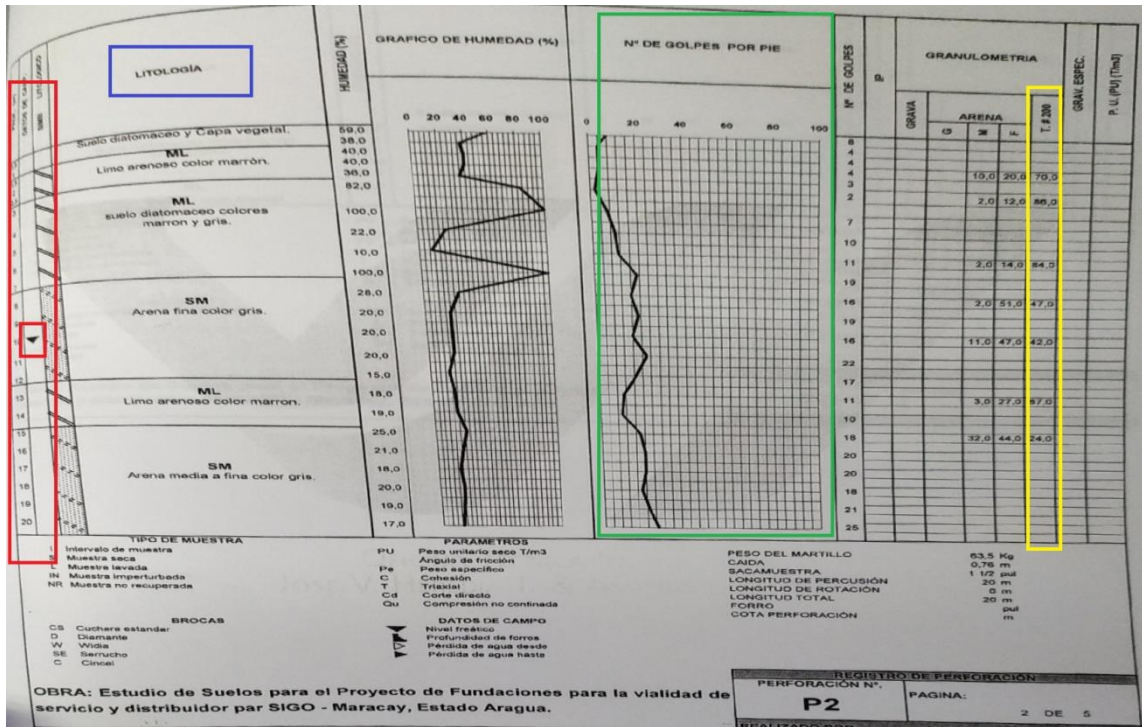


Figura 4.3 Distribución de las perforaciones geotécnicas otorgadas por la empresa OT Heredia.
(Tomado de Arcgis 10.4)



- Profundidad de capas y nivel freático
- Numero de golpes SPT
- Litología
- Porcentaje de finos

Figura 4.4. Planilla de perforación otorgada por la empresa OT Heredia.

4.2 Procesamiento

4.2.1 Calculo de Vs a partir de SPT

En esta investigación se obtuvo un mapa de Vs30 a partir de los Vs obtenidos por el número de golpes del ensayo SPT. Los Vs30 que se presentan en dicho mapa provienen del valor promedio entre 3 relaciones Vs-NSPT. A continuación se presentan a los autores de dichas relaciones, las ecuaciones y el contexto de las mismas.

Campos (2004) realizó mediciones “Downhole”, “Crosshole” y Tomografía Sísmica en las avenidas San Martín y Lecuna del municipio Libertador en pozos perforados para la construcción de la línea 4 del Metro de Caracas. Con datos del ensayo de Penetración Estándar realizados en pozos aledaños y las velocidades de corte obtenidas, logró establecer la primera curva de correlación entre las variables NSPT y VS para Caracas.

$$V_S = 98.808 * N^{0.3902} \text{ (Ec. 15)}$$

Otra relación entre el parámetro NSPT y las velocidades de ondas de corte es la encontrada por Imai y Yoshimura (1970).

$$V_S = 89.8 * N^{0.341} \text{ (Ec.16)}$$

Ohta y Goto (1978) realizaron análisis estadístico entre la relación velocidades de onda de corte y datos geológicos de más de 300 datos. Llegando a la siguiente ecuación:

$$V_S = 61.61 * N^{0.341} * H^{0.22} \text{ (Ec.17)}$$

Donde N es el promedio de golpes de SPT por capa.

H es la profundidad de la capa.

4.2.2 Cálculo del parámetro Vs30

De acuerdo a la norma COVENIN 1756 (2001) la velocidad promedio hasta cierta profundidad se obtiene como el cociente de la altura total del perfil, entre la sumatoria de tiempos parciales de viaje por estrato:

$$Vs30 = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{Vs_i}} \text{ (Ec.18)}$$

El Vs30 será entonces el promedio de las velocidades de ondas de corte hasta los 30 metros de profundidad.

h_i es el espesor de la i-esima capa.

Vs_i la velocidad de onda de corte de la i-esima capa.

El Vs_i se obtuvo del promedio de los Vs obtenidos por las tres metodologías explicadas y con este promedio se calculó el Vs30.

A continuación se muestra un modelo de la hoja de cálculo en la que se procesaron los datos de perforaciones geotécnicas para obtener el Vs30 a partir de SPT. (Tabla 4.1)

(Tabla 4.1) Hoja de cálculo de Vs30 a partir de información geotécnica.

| ID | Perforacion | Norte | Este | SPT promedio | Vs (m/s) Campos | Vs(m/s) Imai & Yoshimura | Vs (m/s) Ohta & Goto | Vs (m/s) medio | Espesor h (m) | Espesor proyectado (30m) | hi/Vsi (s) | Sumatoria (hi/Vsi) | Vs30 (m/s) |
|----------------------------|-------------|--------------|------------|--------------|--------------------|--------------------------------|-------------------------|-------------------|------------------|--------------------------------|------------|-----------------------|---------------|
| LES-117/84 | P2 | 1.133.791,70 | 653.567,00 | 5 | 185 | 155 | 107 | 149 | 1 | 1 | 0,0067115 | 0,089312 | 336 |
| | | | | 13 | 274 | 220 | 215 | 236 | 4 | 4 | 0,0169454 | | |
| | | | | 26 | 355 | 275 | 299 | 310 | 3 | 3 | 0,0096868 | | |
| | | | | 19 | 314 | 247 | 282 | 281 | 2 | 2 | 0,0071189 | | |
| | | | | 17 | 298 | 236 | 280 | 271 | 2 | 2 | 0,0073771 | | |
| | | | | 17 | 298 | 236 | 285 | 273 | 1 | 1 | 0,0036662 | | |
| | | | | 37 | 403 | 308 | 377 | 363 | 1 | 1 | 0,0027581 | | |
| | | | | 55 | 471 | 353 | 452 | 425 | 3 | 3 | 0,0070553 | | |
| | | | | 53 | 463 | 348 | 451 | 421 | 1 | 1 | 0,0023777 | | |
| | | | | 65 | 502 | 373 | 489 | 454 | 1 | 1 | 0,0022004 | | |
| | | | | 70 | 518 | 383 | 508 | 470 | 1 | 11 | 0,0234146 | | |
| LES-116/84 | P1 | 1.134.740,00 | 654.370,00 | 2 | 129 | 114 | 78 | 107 | 1 | 1 | 0,00934 | 0,095523 | 314 |
| | | | | 13 | 271 | 217 | 221 | 236 | 5 | 5 | 0,0211568 | | |
| | | | | 54 | 469 | 351 | 391 | 404 | 3 | 3 | 0,0074294 | | |
| | | | | 39 | 411 | 313 | 371 | 365 | 3 | 3 | 0,0082142 | | |
| | | | | 37 | 403 | 308 | 383 | 364 | 3 | 18 | 0,049383 | | |
| LES-114/84 | P1 | 1.133.787,60 | 653.640,80 | 4 | 169 | 144 | 99 | 137 | 1 | 1 | 0,0072743 | 0,107119 | 280 |
| | | | | 5 | 190 | 159 | 139 | 162 | 2 | 2 | 0,0123144 | | |
| | | | | 20 | 320 | 252 | 246 | 273 | 2 | 2 | 0,0073387 | | |
| | | | | 17 | 301 | 238 | 251 | 263 | 2 | 2 | 0,0075927 | | |
| | | | | 27 | 358 | 277 | 316 | 317 | 3 | 23 | 0,0725988 | | |

4.2.3 Mapa de Vs30 basado en el análisis de la topografía

Para la realización del mapa de Vs30 Topográfico se tuvo que hacer inicialmente una revisión bibliográfica de la zona para de esa forma poder obtener los ajustes funcionales.

Se siguió la metodología aplicada por Morales et al (2011) se hizo un ajuste funcional a la relación Vs30 por pendiente topográfica (p) en regímenes activos propuesta por Allen & Wald (2009) para 9" de arco, y definida en una tabla de valores numéricos (tabla 4.2). Obteniendo la siguiente expresión válida para $p \leq 0,2$

$$Vs30 = \frac{2043p^3 + 1612p^2 + 377.4p + 1259}{p + 0.007324} \text{ (m/s)} \text{ (Ec 4.1)}$$

Donde p es el valor de la pendiente en unidades naturales (m/m).

Se debe tomar en cuenta que el resultado crece indefinidamente con p y debe ser acotado. En el programa para realizar este mapa (Arcgis 10.4) se limitó el valor máximo de Vs30 a 800 m/s (obtenido para $p = 0,216 = 12,2^\circ$).

Tabla 4.2 Relación entre la pendiente topográfica y las categorías de Vs30 según NEHRP (BSSC, 2003). Se muestran los respectivos rangos de topografía (Allen & Wald, 2009).

| Clasificación de sitios NEHRP | Rango Vs30 (m/s) | Rango de gradiente (m/m) para 9 arcsec en regímenes activos |
|-------------------------------|------------------|---|
| <i>E</i> | < 180 | < 3×10^{-4} |
| | 180 - 240 | $3,5 \times 10^{-4}$ - $3,5 \times 10^{-3}$ |
| | 240 - 300 | $3,5 \times 10^{-3}$ - 0,010 |
| <i>D</i> | 300 - 360 | 0,010 - 0,024 |
| | 360 - 490 | 0,024 - 0,08 |
| <i>C</i> | 490 - 620 | 0,018 - 0,14 |
| | 620 - 760 | 0,14 - 0,20 |
| <i>B</i> | > 760 | > 0,20 |

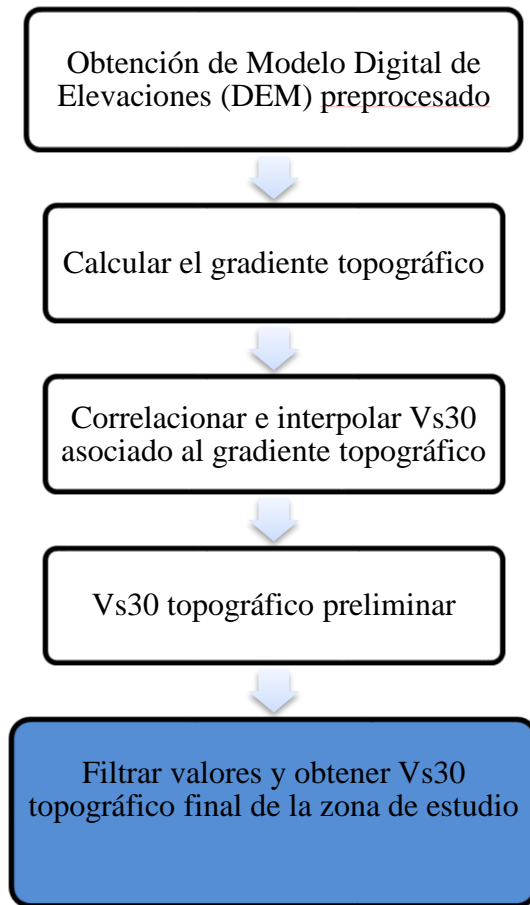


Figura 4.5. Metodología de procesamiento del Vs30 topográfico.

4.3 Potencial de licuación de suelo

A continuación se explican en detalle todos y cada uno de los pasos a seguir para la realización de un mapa del potencial de licuación de la ciudad de Maracay Estado Aragua.

- 1- **Revisión bibliografía y documental:** se estudiaron los sistemas de fallas existentes en la zona de estudio, las variables que interfieren en la aparición de las mismas, el histórico de eventos sísmicos asociados, entre otros que permitan explicar el fenómeno de la licuación y su relación con la probabilidad de un sismo.

Se aplicaron los criterios de evaluación establecidos en la Norma COVENIN 1756 (2001), en la cual se consideraron los siguientes parámetros:

- **Parámetros Geológicos:** Depósitos de origen reciente, ya que, sedimentos depositados dentro de los últimos mil años (sedimentos del Holoceno y Pleistoceno) son susceptibles a la licuación (Urbani, 2000) se consideró la cercanía a fallas activas, debido a que al estado Aragua es atravesado por dos de los más importantes sistemas de fallas del país, como son: San Sebastián y La Victoria, en los cuales se tienen suelos con características particulares (Audemard et al., 2000).
- **Parámetros Geotécnicos:** Se tomaron en cuenta para la siguiente investigación los aspectos que podrían facilitar la licuación, tales como: la baja densidad del suelo, restricciones de drenaje, el contenido de arcilla, la magnitud de deformación del suelo (el cual dependerá del espesor y profundidad del estrato licuable), la pendiente del terreno y el área de extensión del estrato. En relación a la litología del suelo, la licuación ocurre principalmente en arenas, arenas limosas o arenas arcillosas con bajo contenido arcilla, por lo que en la zona de estudio se determinaron los tipos de suelo utilizando la metodología de clasificación correspondiente.

- 2- **Evaluación de susceptibilidad a la licuación:** La ciudad de Maracay, se encuentra ubicada en una zona de alta peligrosidad sísmica y con presencia de cuerpos de agua hacia la zona sur por lo que se realizó una evaluación de susceptibilidad, de acuerdo a lo establecido, en la norma COVENIN 1756 (2001).
- 3- **Estimación de los factores de seguridad del área y cálculo del potencial de licuación, con el método simplificado de Seed e Idriss (1982):** Una vez determinada la susceptibilidad a la licuación del suelo, utilizando los criterios preliminares, se procedió a determinar el potencial de licuación según el método simplificado de Seed e Idriss (1982), el cual establece que las variables necesarias para la aplicación del mismo son:
- Número de golpes del Ensayo de Penetración Estándar (SPT).
 - Profundidad del Nivel Freático.
 - Porcentaje de Partículas Finas.
 - Peso Unitario.

Estas variables se obtuvieron de 465 planillas de perforación de los pozos estudiados otorgadas por la empresa OT Heredia y asociados.

Se evaluaron los estratos de la perforación a partir de medio metro de perforación. Igualmente la evaluación del potencial de licuación del suelo, se realizó para sismos de magnitudes M_w de 6.5, 7.0 y 7.5.

No se consideraron variaciones en los niveles de los acuíferos, debido a cambios estacionales, solo los reportados en los estudios geotécnicos considerados.

Para la determinación del factor de seguridad del suelo se calcularon los siguientes factores:

- **Factor de Magnitud de Escala:** Se calcula el factor de seguridad para sismos de magnitudes 6.5, 7.0, 7.5 M_w , que son los contemplados en este trabajo, para de ésta manera hallar la relación que existe entre la variación del potencial de

licuación y la variación de magnitud del sismo. Con esta finalidad es necesario el cálculo del factor de magnitud de escala (MSFs) para cada magnitud estudiada, por medio de la ecuación (11), arrojando como resultados los valores que se exponen en la siguiente tabla

Tabla 4.3. Factor de magnitud de escala para diferentes magnitudes de sismo

| | | | | |
|------|-------|-------|-------|------|
| Mw | 6,5 | 7,0 | 7,5 | 8,0 |
| MSFs | 1,442 | 1,193 | 1,000 | 0,85 |

- **Aceleración del terreno:** este fue un valor asumido de acuerdo a la zona de estudio la cual según FUNVISIS es una zona de peligro sísmico de intermedio a elevado; con aceleraciones del terreno que oscilan entre los 0,25g hasta 0,35g, por lo cual se tomó el promedio de dichos valores resultando en 0,30g. Valor asumido en la mayoría de los estudios de suelos hechos para Maracay.
- **Correcciones del valor de resistencia a la penetración:** Para estimar el valor de resistencia a la penetración $(N1)_{60}$ se requiere hacer una serie de correcciones al valor medido en campo, Youd & Idriss (2001):

$$(N1)_{60} = C_N \cdot N_{60}$$

- **Correcciones por Forma y Ejecución del Ensayo:** Estos factores se utilizan para corregir la influencia de la forma de aplicación del ensayo de penetración estándar durante su ejecución. Los valores utilizados se muestran a continuación en la siguiente tabla.

Tabla 4.4. Resumen Factores de Corrección por Forma y Ejecución de Ensayo

| Factor | Variable | Término | Corrección |
|--|-----------------------|---------|---|
| Corrección por confinamiento efectivo del toma muestra | - | CN | $C_N = \frac{2.2}{1.2 + \sigma'_{v0}}$ Ecuac. (13) |
| Corrección por energía del martillo | Martillo de seguridad | CE | 0,75 |
| Corrección por diámetro de perforación | 65 - 115 mm | CB | 1,00 |
| Corrección Long. Tubería | < 3 m | CR | 0,75 |
| Corrección Long. Tubería | 3 - 4 m | CR | 0,80 |
| Corrección Long. Tubería | 4 - 6 m | CR | 0,85 |
| Corrección Long. Tubería | 6 - 10 m | CR | 0,95 |
| Corrección Long. Tubería | 10 - 30 m | CR | 1,00 |
| Método de muestreo | Muestreador estándar | CS | 1,00 |

A partir de las variables iniciales, las correcciones mostradas y los valores asumidos previamente se procedió a evaluar el factor de seguridad para el cual fue necesario estimar dos parámetros: la relación de esfuerzos de corte cíclicos (CSR) inducidos por los movimientos del terreno; y la relación de resistencia cíclica (CRR) o capacidad del suelo de resistencia a la licuación. A continuación se describen las ecuaciones empleadas para su cálculo:

➤ **Relación de esfuerzos cíclicos (CSR) Seed e Idriss (1982):**

$$CSR = \left[\frac{\tau_{\sigma\theta}}{\sigma_{\theta o}} \right] = 0.65 * \left[\frac{\alpha_{max}}{g} \right] * \left[\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right] * rd \quad (\text{Ec.1})$$

➤ **Resistencia a la licuación del suelo (CRR):** es la capacidad del suelo de resistir a la licuación.

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N1)60} + \frac{(N1)60}{135} + \frac{50}{[10(N1)60 + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (\text{Ec. 6})$$

Todos estos cálculos se llevaron a cabo en el programa Microsoft Excel, en la página siguiente se muestra un modelo de la hoja de cálculo del factor de seguridad de uno de los pozos procesados. (Tabla 4.5).

- 4- De los factores de seguridad obtenidos se tomó como característico, el menor valor obtenido del análisis de cada estrato. Así mismo se consideró como suelos potencialmente licuables, aquellos cuyo factor de seguridad (FS) resultó igual o menor que 1 (≤ 1.0) Seed e Idriss (1982).
- 5- Por último con los resultados obtenidos se elaboró un mapa donde estén representados los diferentes potenciales de licuación del área de las parroquias estudiadas, utilizando el software Arcgis 10.4.

Tabla 4.5 Resultados cálculo del factor de seguridad perforación (E-964394-P2).

| Esesor | Agua | Prof (Df) (m) | SPT (Nw) | P.U.S T/m3 | PUST T/m3 | σ_{vo} Kg/cm2 | μ Kg/cm2 | σ_{vo}' Kg/cm2 | Cn | C _r | C _b | CR | CS | (N1) ₆₀ | α | β | (N1) _{cs} | CRR _{7.5} | a _{max} | g | rd | CSR | M _w | M _{sf} | f | K _G | F _s | Licuable Si/No |
|--------|------|---------------|----------|------------|-----------|----------------------|--------------|-----------------------|------|----------------|----------------|------|----|--------------------|----------|---------|--------------------|--------------------|------------------|-----|-------|-------|----------------|-----------------|-----|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0 | 1 | 32 | 1.9 | 2.1 | 0.21 | 0 | 0.21 | 1.56 | 0.75 | 1 | 0.75 | 1 | 28 | 5 | 1.2 | 39 | 0.0693 | 0.3 | 9.8 | 0.998 | 0.02 | 7.5 | 1 | 0.6 | 1.867 | 6.51 | No |
| 2 | 0 | 3 | 21 | 1.92 | 2.12 | 0.634 | 0 | 0.634 | 1.2 | 0.75 | 1 | 0.8 | 1 | 15 | 0.12 | 1.009 | 15 | 0.1637 | 0.3 | 9.8 | 0.998 | 0.02 | 7.5 | 1 | 0.6 | 1.2 | 9.89 | No |
| 2 | 0 | 5 | 22 | 1.94 | 2.14 | 1.062 | 0 | 1.062 | 0.97 | 0.75 | 1 | 0.85 | 1 | 14 | 5 | 1.2 | 21 | 0.2332 | 0.3 | 9.8 | 0.998 | 0.02 | 7.5 | 1 | 0.6 | 0.976 | 11.45 | No |
| 2 | 1 | 7 | 20 | 1.92 | 2.12 | 1.486 | 0.1 | 1.386 | 0.85 | 0.75 | 1 | 0.95 | 1 | 12 | 0 | 1 | 12 | 0.1323 | 0.3 | 9.8 | 0.998 | 0.021 | 7.5 | 1 | 0.6 | 0.878 | 5.45 | No |
| 7 | 1 | 14 | 28 | 1.96 | 2.16 | 2.998 | 0.2 | 2.798 | 0.55 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 12 | 5 | 1.2 | 19 | 0.2018 | 0.3 | 9.8 | 1.121 | 0.024 | 7.5 | 1 | 0.6 | 0.663 | 5.59 | No |
| 1 | 1 | 15 | 63 | 2 | 2.2 | 3.218 | 0.3 | 2.918 | 0.53 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 25 | 0.299 | 1.013 | 26 | 0.31 | 0.3 | 9.8 | 1.121 | 0.025 | 7.5 | 1 | 0.6 | 0.652 | 8.21 | No |

Prof (Df) Profundidad del suelo

SPT (Nw) Número de golpes prueba SPT

P.U.S. Peso unitario seco

PUST Peso unitario saturado

σ_{vo} Esfuerzo Vertical Total

σ_{vo}' Esfuerzo vertical efectivo

Cn Factor para normalizar el valor Nm

CE Factor corrección eficiencia martillo

CB Factor corrección por diámetro del hueco

CR Factor de corrección por longitud de barra

CS Factor de corr. por extracción de muestra

(N1)₆₀ Resistencia a la penetración normalizada

α Factor que dependa de los finos

β Factor que depende de los finos

(N1)_{cs} Factor de corrección de N por finos

CRR

7.5 Resistencia a la licuación del suelo

a_{max} Aceleración horizontal pico del suelo a_{max} = 0,3

g aceleración de la gravedad g = 9,8 m/s

rd Factor de reducción por esfuerzos

CSR Relación de esfuerzos cíclicos

Mw Magnitud del sismo esperado Mw = 8

Msf Factor de corrección por magnitud del sismo

f Factor de densidad del suelo f = 0,6

K_G Factor corrección esfuerzos confinamiento

F_s Factor de seguridad a la licuación

Lic. Hay licuación Si o No

4.5 Elaboración de mapas

Los mapas fueron elaborados en el programa Arcgis 10.4 utilizando el método de interpolación *IDW* (Ponderación de distancia inversa) el cual estima los valores de las celdas calculando promedios de los valores de los puntos de datos de muestra en la vecindad de cada celda de procesamiento. Cuanto más cerca está un punto del centro de la celda que se está estimando, más influencia o peso tendrá en el proceso de cálculo del promedio.

CAPITULO V

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como se explicó en los capítulos anteriores uno de los objetivos de este proyecto es recopilar la mayor cantidad de información disponible de la zona de estudio. Es por esta razón que los resultados se dividen en dos partes, en la primera sección se analiza y compara la información geofísica previa así como la generada en esta investigación con la información geotécnica de la zona de estudio.

En la segunda sección se analizan los resultados obtenidos del procesamiento de los ensayos geotécnicos con metodologías para obtener el potencial de licuación, el cual se graficó en mapas dependiendo de la magnitud del sismo analizado, esta información integrada con la geofísica sirvió para generar un mapa de zonas de potencial de licuación del suelo de la ciudad de Maracay.

5.1 Características geofísicas y geotécnicas de la ciudad de Maracay

5.1.1 Mapa de espesor de sedimentos

En la Figura 5.1 se muestra la variación del espesor de sedimentos en la ciudad de Maracay según los datos obtenidos por Ornelas (2018). El espesor va aumentando de norte a sur. En la zona norte en el límite entre los sedimentos y el afloramiento metamórfico (Cordillera de la Costa), se obtuvo que el espesor de sedimentos varía de cero a pocos metros de profundidad. Mientras que en la parte sur, hacia el Lago de Valencia se pueden encontrar espesores de hasta 320m.

Haciendo el análisis del mapa de norte a sur se observa como al alejarse de la cordillera montañosa los valores de espesor aumentan gradualmente. En la zona del Castaño y el Limón ubicada en el noreste y noroeste de la ciudad respectivamente, se observan espesores de 0 a 80 m.

Al sur de esta zona en la parte septentrional de la cuenca se visualiza como en El Limón, El castaño y Las Delicias al norte existe una franja que se extiende de este a oeste por toda la zona de estudio de este a oeste con espesores sedimentarios entre 80 m y 120 m.

En el centro de la ciudad se observa otra franja que va de este a oeste y en las zonas del Limón y las Delicias sube un poco hacia el norte. Esta franja representa espesores entre 140 m a 250 m y ocupa gran parte de la cuenca.

La última zona mostrada en este mapa se encuentra en el sur de la ciudad de Maracay hacia los sectores: Los Samanes, Mata Redonda, Campo Alegre entre otras. Esta representa los mayores espesores sedimentarios de la zona de estudio que van de los 250 m a 320 m.

5.1.2 Mapa de Isoperiodos

En la figura 5.2 se muestra el mapa de isoperiodos según los datos obtenidos por Ornelas (2018) el cual muestra una tendencia muy similar al mapa de espesor sedimentario de la figura 5.1.

Los valores más bajos de período fundamental se encuentran ubicados al norte, por la presencia de la Cordillera de la Costa. Los valores más altos hacia el sur, por el aumento del espesor sedimentario hacia el Lago de Valencia. Y en el centro de la ciudad se visualizan valores intermedios.

En la zona norte comprendida por los sectores El Limón, El Castaño, Las Delicias, La Candelaria, Barrio Independencia, entre otros, se observan periodos de 0 s a 0.7 s.

Posterior a la parte septentrional del mapa se pueden encontrar periodos de 0.7 s a 1.2 s, en esta zona se encuentran, Barrio El Carmen, CAVIM, Urb. Base Aragua, Urb. San Jacinto, Urb. Calicanto, Urb. San Isidro, Urb. Country Club.

En la parte central de la cuenca se distribuye una franja con periodos entre 1.2 s a 1.8 s. esta zona representa el centro de la ciudad de Maracay incluyendo la Av. Bolívar, Av. Constitución, Av. Aragua, y todas las urbanizaciones contenidas en estas importantes avenidas principales de la ciudad.

Ya en la zona sur de la ciudad el mapa se encuentran los mayores periodos del mapa superiores a 2 s en esta zona se encuentra la Urb. San Vicente, La Zona Industrial, Urb. Mata Redonda, Urb. Paraparal, Urb. Los Samanes, Urb. Las Acacias, Urb. La Fundación, Urb. Piñonal, hasta encontrar un máximo de 2.9 s. en la Urb. Brisas del Lago y la Urb. La Punta.

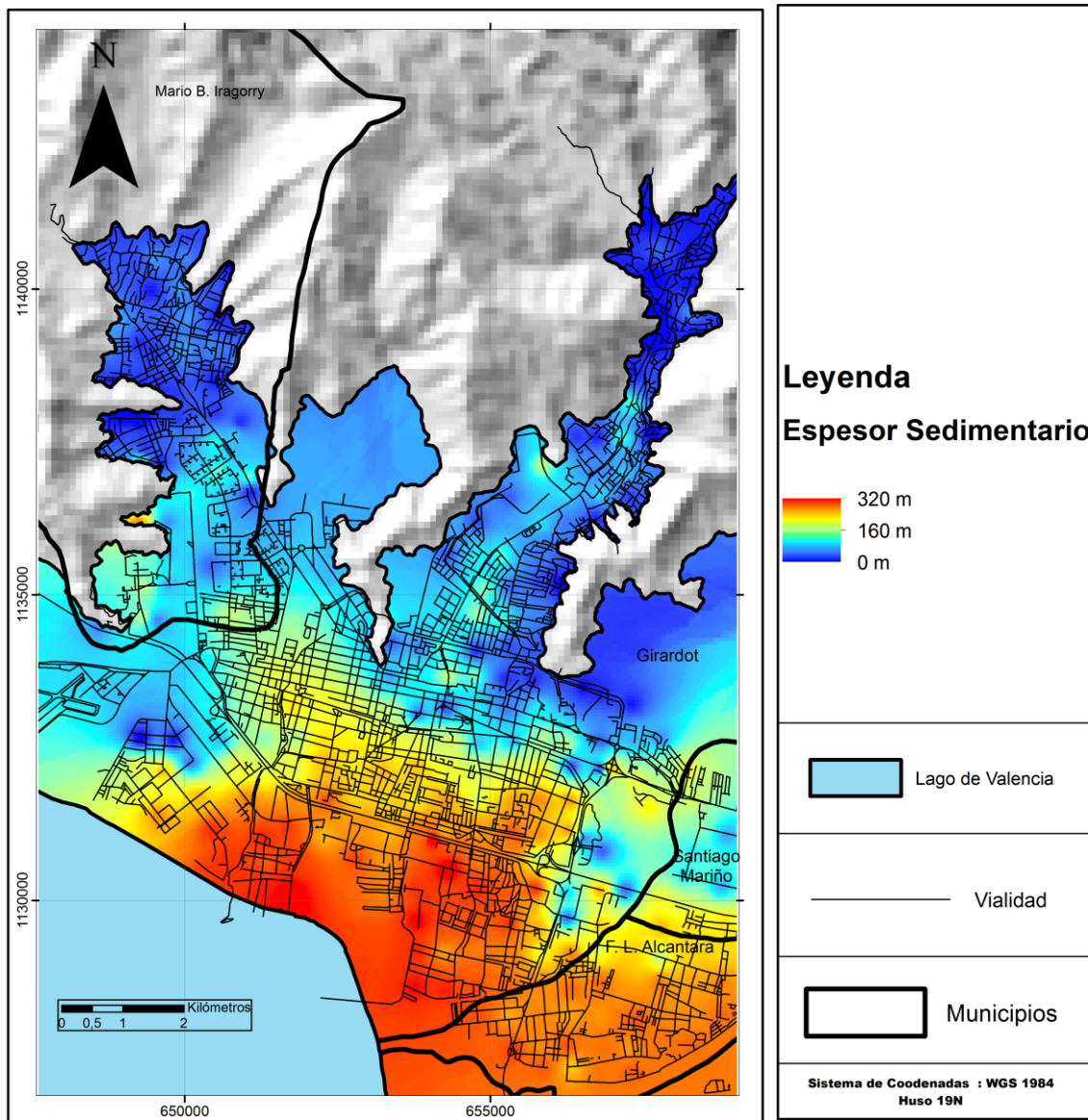


Figura 5.1 Mapa de esesor sedimentario basado en los resultados obtenidos por Ornelas (2018) de la ciudad de Maracay Estado Aragua.

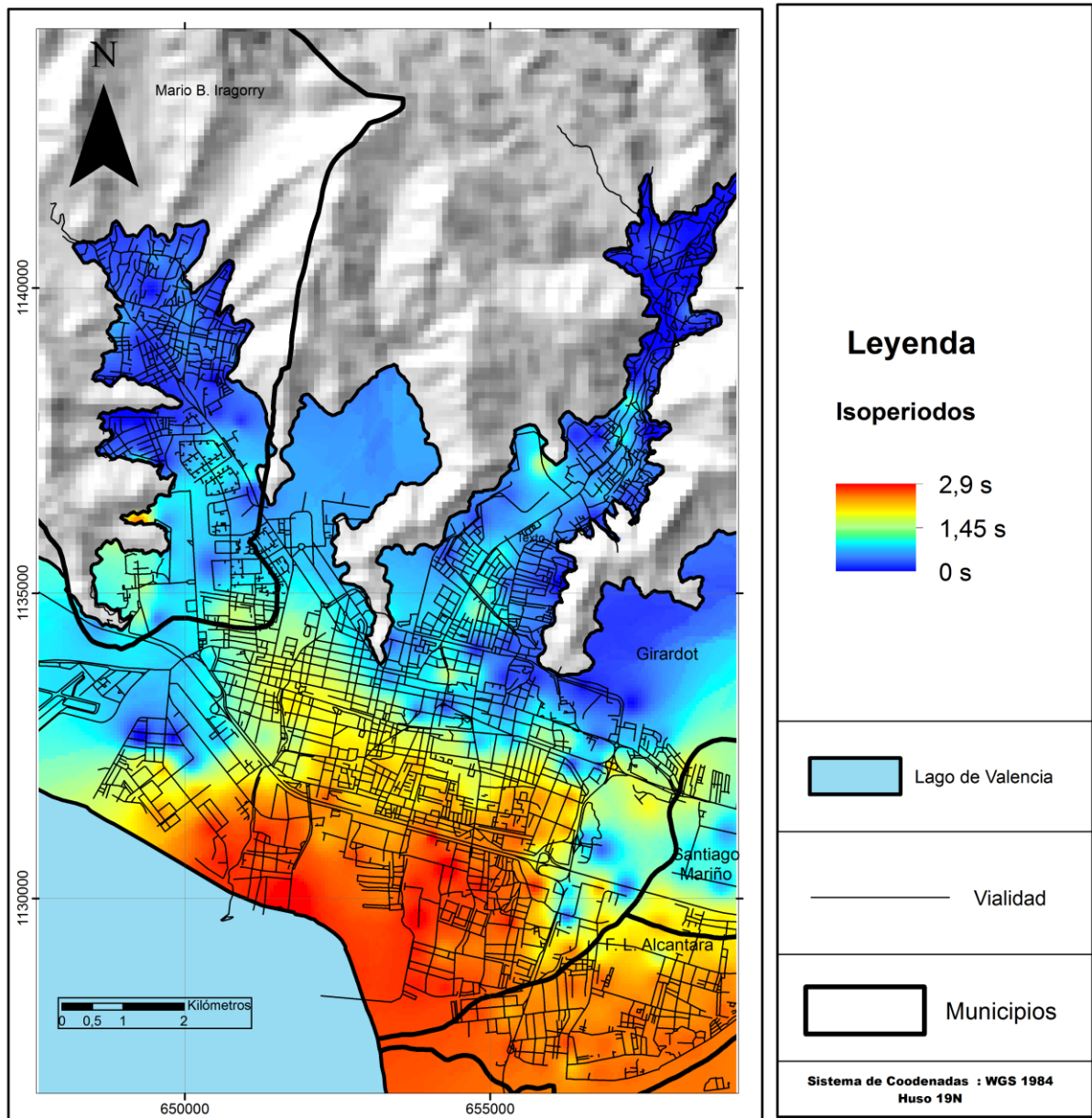


Figura 5.2 Mapa de Isoperíodos basado en los resultados obtenidos por Ornelas (2018) de la ciudad de Maracay Estado Aragua.

5.1.3 Mapa de Vs30 basado en el análisis de la topografía

El mapa de Vs30 basado en el análisis de la topografía de la ciudad Maracay realizado con un modelo de elevación de 9 arcossegundos de resolución muestra las variaciones de este parámetro en toda la extensión de los municipios que forman la ciudad, se puede visualizar dos zonas importantes en este mapa, la primera y de mayor importancia es la que representa la zona del depósito de sedimentos o cuenca, con Vs30 intermedios a bajos es decir entre unos 171 m/s y 350 m/s, valores similares a los resultados mostrados a continuación obtenidos por Escobar (2019)

En el norte de esta zona, en el límite entre los depósitos sedimentarios y la montaña se observa como el Vs30 comienza a aumentar, resultando valores entre 350 m/s y 650 m/s.

Este mapa sirvió de complemento para aportar información en las zonas donde con otras metodologías no existía información por ejemplo en el afloramiento rocoso.

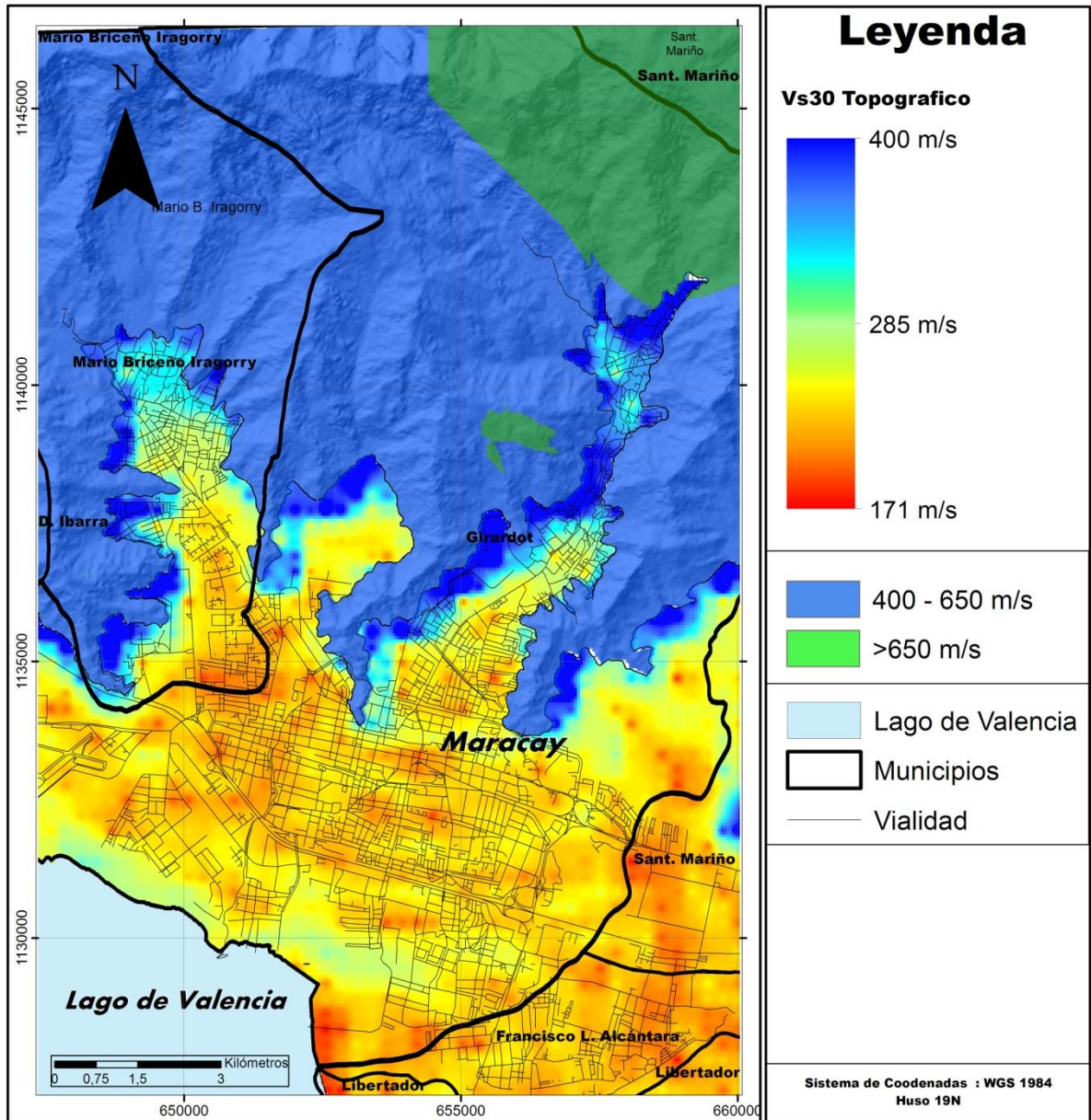


Figura 5.3 Mapa de Vs30 topográfico de la ciudad de Maracay Estado Aragua.

5.1.4 Mapas de Vs30 basados en información geofísica

Los mapas de Vs30 generados a partir de métodos sísmicos pasivos (ReMi e IMASW) muestran como este parámetro varía gradualmente de norte a sur en los depósitos sedimentarios de la ciudad de Maracay. En la zona noroeste en el sector El Limón se encuentran los valores de Vs30 mas altos mostrados en color azul representan valores de 350 m/s (ReMi) y 400 m/s (IMASW), esto puede estar asociado a dos razones la primera es el espesor sedimentario debido a la cercanía con la cordillera montañosa (afloramientos metamórficos) que por ser roca genera un aumento en la velocidad de las ondas de corte y la otra razón es que en esta zona existen sedimentos coluvionales a diferencia de los del sur de la ciudad que son de origen lacustre.

Este mismo fenómeno ocurre también en el noreste de la ciudad en el sector El Castaño aunque en este caso el Vs30 no llega a los valores máximos encontrados en El Limón.

En la franja central de la cuenca se puede visualizar como los valores de Vs30 van disminuyendo gradualmente hacia el sur sin variaciones considerables. En las dos metodologías esta zona se vio bastante similar con Vs30 en general mayores a 250 m/s.

Hacia el sur de Maracay es donde se encuentra los Vs30 más bajos de la zona de estudio, llegando a valores de 200 m/s en las cercanías a la costa del Lago de Valencia. Este comportamiento se extiende también hacia el sureste de Maracay hacia el sector de Palo Negro. Las bajas velocidades de las ondas de corte en esta zona se asocian a sedimentos del tipo lacustre, depositados como consecuencia de uno de los períodos de expansión de la superficie del Lago de Valencia.

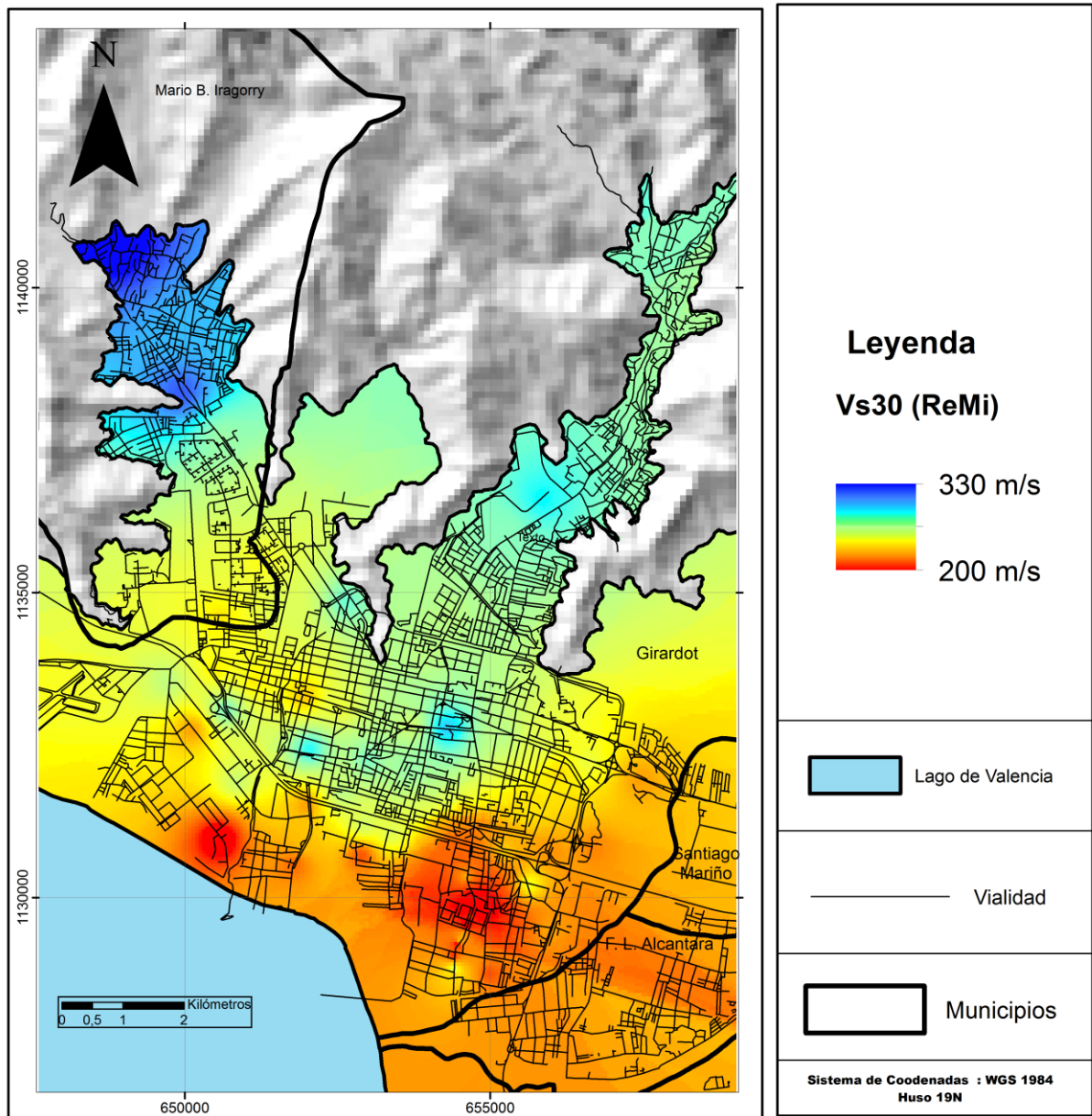


Figura 5.4 Mapa de Vs30 (ReMi) basado en los datos obtenidos por Escobar (2019) de la ciudad de Maracay Estado Aragua.

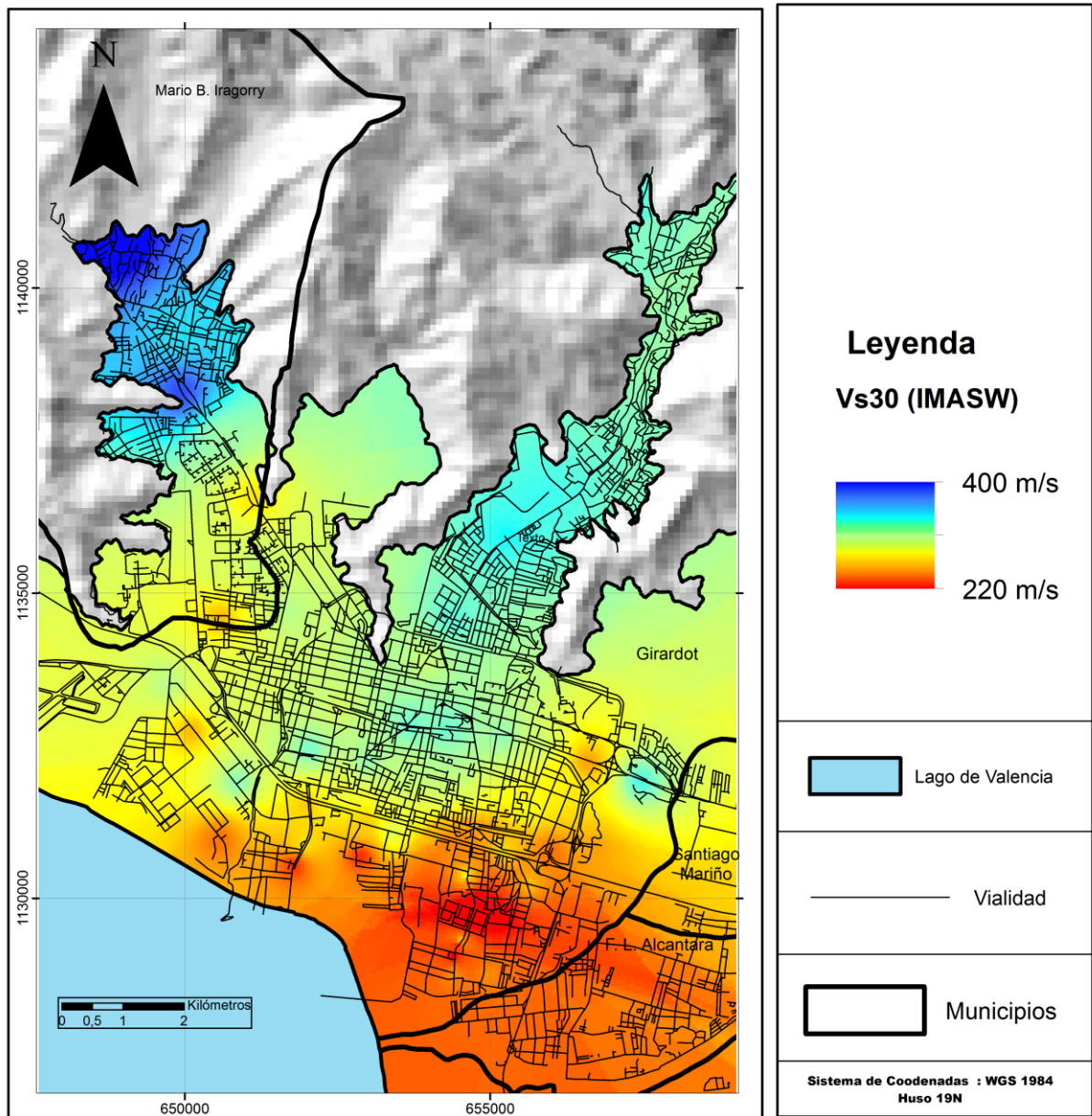


Figura 5.5 Mapa de Vs30 (IMASW) basado en los datos obtenidos por Escobar (2019) de la ciudad de Maracay Estado Aragua.

5.1.5 Mapa de Vs30 basado en metodologías N-SPT-VS

El mapa de Vs30 por SPT de la ciudad de Maracay se generó con el promedio obtenido de 3 metodologías Vs-NSPT demuestra en general un comportamiento similar a sus semejantes obtenidos por métodos geofísicos, aunque en este caso el valor de Vs30 más alto se encuentra hacia el noreste en el sector El Castaño en la perforación (E-1287997) que es la perforación ubicada más al norte de la ciudad.

Se puede visualizar que hacia la zona centro en este caso no hay tanta uniformidad respecto al Vs30 como en los mapas obtenidos por métodos geofísicos, esto se puede deber a que en la zona centro es donde se encuentra el mayor porcentaje de perforaciones geotécnicas y es posible que haya variaciones importantes entre el número de golpes de SPT entre perforaciones cercanas.

Hacia la zona sur se encuentran los valores mínimos de Vs30 siendo aún menores que los medidos mediante métodos geofísicos, llegando en la costa del lago hasta 160 m/s.

De las 3 metodologías para obtener el Vs a partir de datos de N-SPT la más similar a los datos geofísicos fue la de Campos (2004)

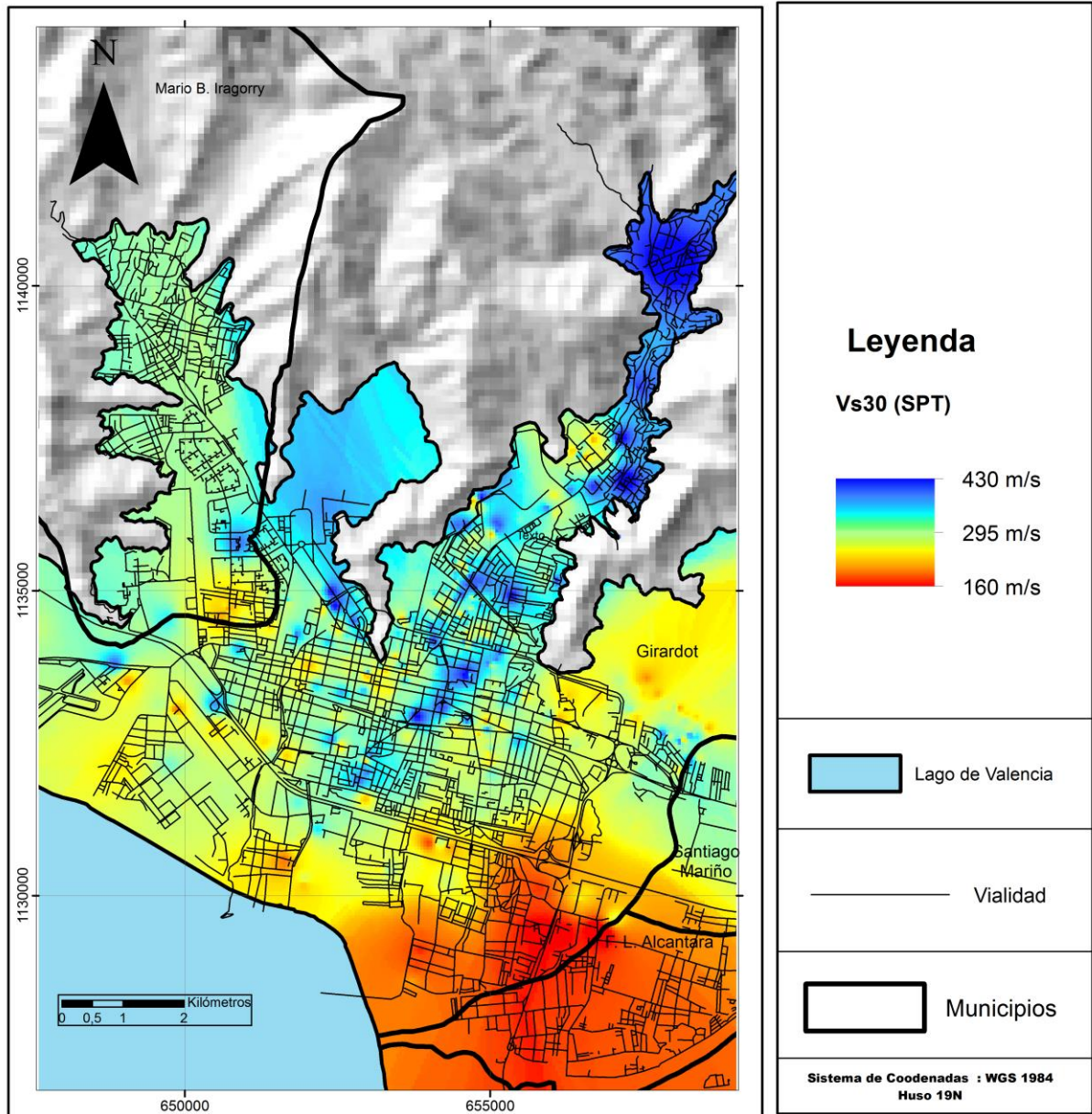


Figura 5.6 Mapa de Vs30 por SPT basado en el promedio de 3 metodologías N-SPT-VS para los datos otorgados por la empresa OT Heredia de la ciudad de Maracay Estado Aragua.

5.1.6 Comparación Vs30 por metodologías geofísicas y geotécnicas.

La tendencia de los valores de Vs30 obtenidos mediante estudios de ruido concuerda con los valores calculados a partir de ensayos SPT, con los valores más bajos hacia el sur de la ciudad, y los valores más altos hacia el norte.

Sin embargo hay que destacar que hacia la zona sur esta diferencia es importante ya que los valores de Vs30 obtenidos mediante SPT son menores a 180 m/s, mientras que los valores obtenidos por métodos geofísicos son mayores a 210 m/s.

Escobar (2019), relaciona esta diferencia en los valores a efectos azimutales no corregidos durante el análisis dispersivo.

Cheng et al. (2016) realizaron estudios con pruebas sintéticas aplicando análisis multicanal basado en correlaciones cruzadas, y encontraron que, cuando no se realizan ajustes azimutales, existe una desviación de la tendencia de valores de velocidad del espectro de dispersión hacia valores más altos. (Cheng et al. (2016)) proponen como solución a este efecto el uso de observaciones de ruido de mayor duración en tiempo, de 1 a 2 horas, generando una imagen de dispersión sin desviaciones.

5.1.7 Mapa de Vs30 Integrado

A partir de la información geofísica y geotécnica del Vs30 de la ciudad de Maracay se procedió a realizar un mapa en donde se integraran estas metodologías. Se tomó como base la información aportada con métodos geofísicos, la cual por no abarcar completamente la ciudad fue complementada con la geotecnia principalmente en la zona sur, hacia el municipio Francisco Linares Alcantara. Por último en la zona norte hacia el afloramiento rocoso se tomó en cuenta el Vs30 generado por el análisis de la topografía.

El mapa está dividido por 4 zonas de norte a sur la primera zona se encuentra en la montaña (afloramiento rocoso), posee una velocidad del Vs30 mayor a 400 m/s y tiene la forma del contacto entre la roca y el sedimento. Esta zona se basa principalmente en los resultados obtenidos por el Vs30 topográfico.

La segunda zona en color amarillo posee una velocidad de Vs30 entre 300 m/s y 400 m/s. ubicada en la zona centro y norte de la ciudad hacia los sectores del Limón en el municipio Mario Briceño Irigorry y el Castaño en el municipio Girardot los valores elevados del Vs30 se asocian a los sedimentos coluvionales en esta zona.

La tercera zona en color naranja tiene velocidades del Vs30 entre 200 m/s y 300 m/s se distribuye en la zona centro y sur de la ciudad con principalmente en el municipio Girardot. Esta zona junto con la anterior (Vs30 entre 300 m/s y 400 m/s.) son las que ubican la mayor parte de la ciudad de Maracay y su delimitación se basa principalmente en los resultados obtenidos por las metodologías geofísicas de ReMi e IMASW.

Por último una cuarta zona en color rojo posee los Vs30 menores a 200 m/s se ubica entre el municipio Girardot y Linares Alcántara al sur este de la ciudad, la delimitación de esta zona tomo en cuenta la información otorgada por las metodologías geotécnicas para la obtención del Vs30, el bajo valor de este parámetro para esta zona está asociado con los sedimentos lacustres depositados como consecuencia de uno de los períodos de expansión de la superficie del Lago de Valencia.

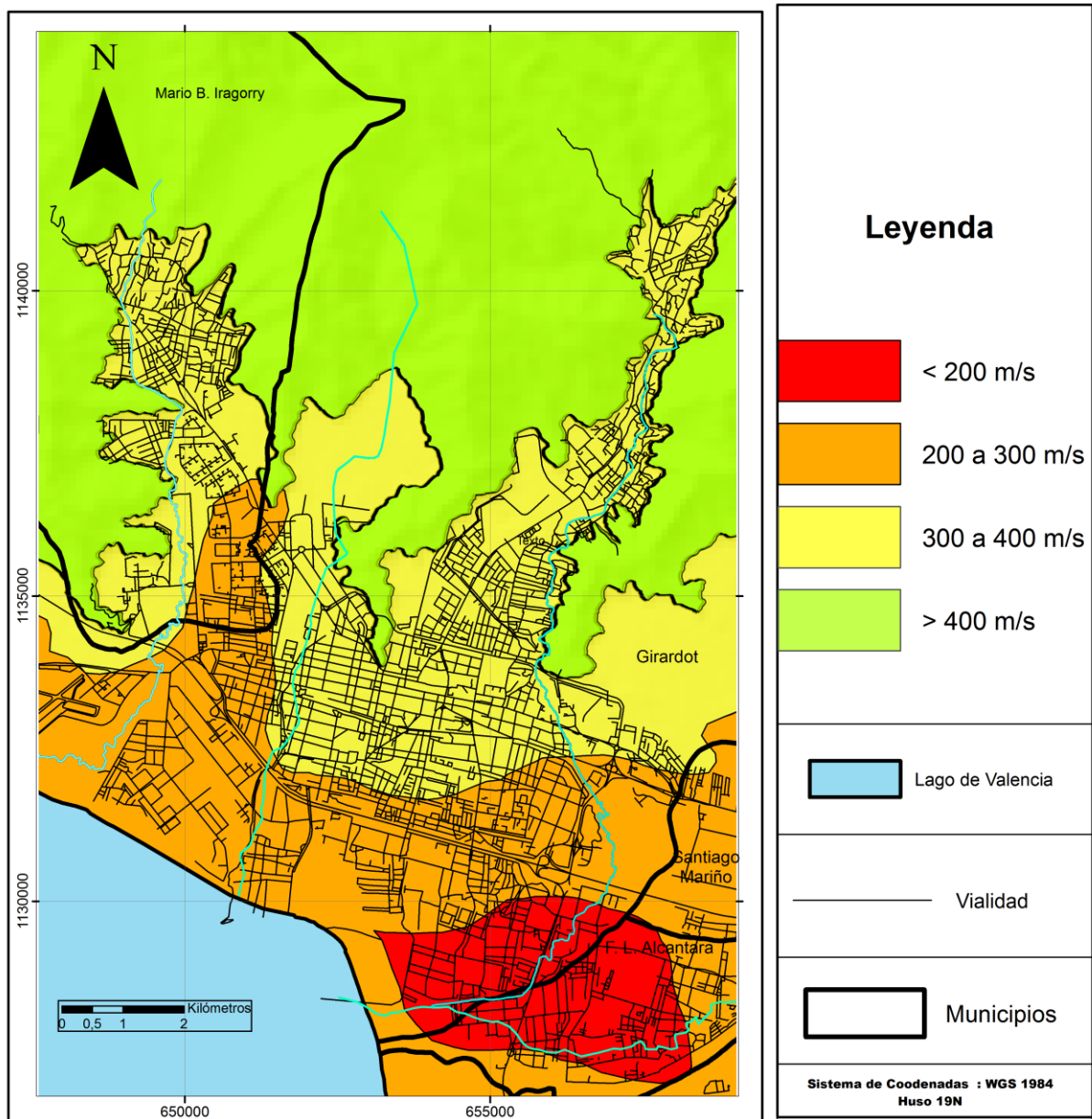


Figura 5.7 Mapa de Vs30 basado en información geofísica, topográfica y geotécnica de la ciudad de Maracay Estado Aragua.

5.2 Licuación de suelos en Maracay

A continuación se presentan los mapas del potencial de licuación de la ciudad de Maracay, Estado Aragua, para las magnitudes estudiadas en esta investigación: M_w : 6,5; 7,0; 7,5; con el factor de seguridad clasificado según los intervalos comúnmente aplicados para describir el potencial de licuación del suelo:

En general los resultados obtenidos fueron muy similares a los de (Hidalgo y Paredes 2015) un bajo porcentaje de perforaciones con estratos altamente licuables. Se visualiza en las 3 magnitudes estudiadas una extensa parte de la zona de estudio en color azul oscuro (Muy bajo potencial de licuación) y a medida que aumente la magnitud del sismo estudiado aparecerán zonas en colores verde, naranja y rojo que representaran zonas que van de bajo a muy alto potencial de licuación de suelos.

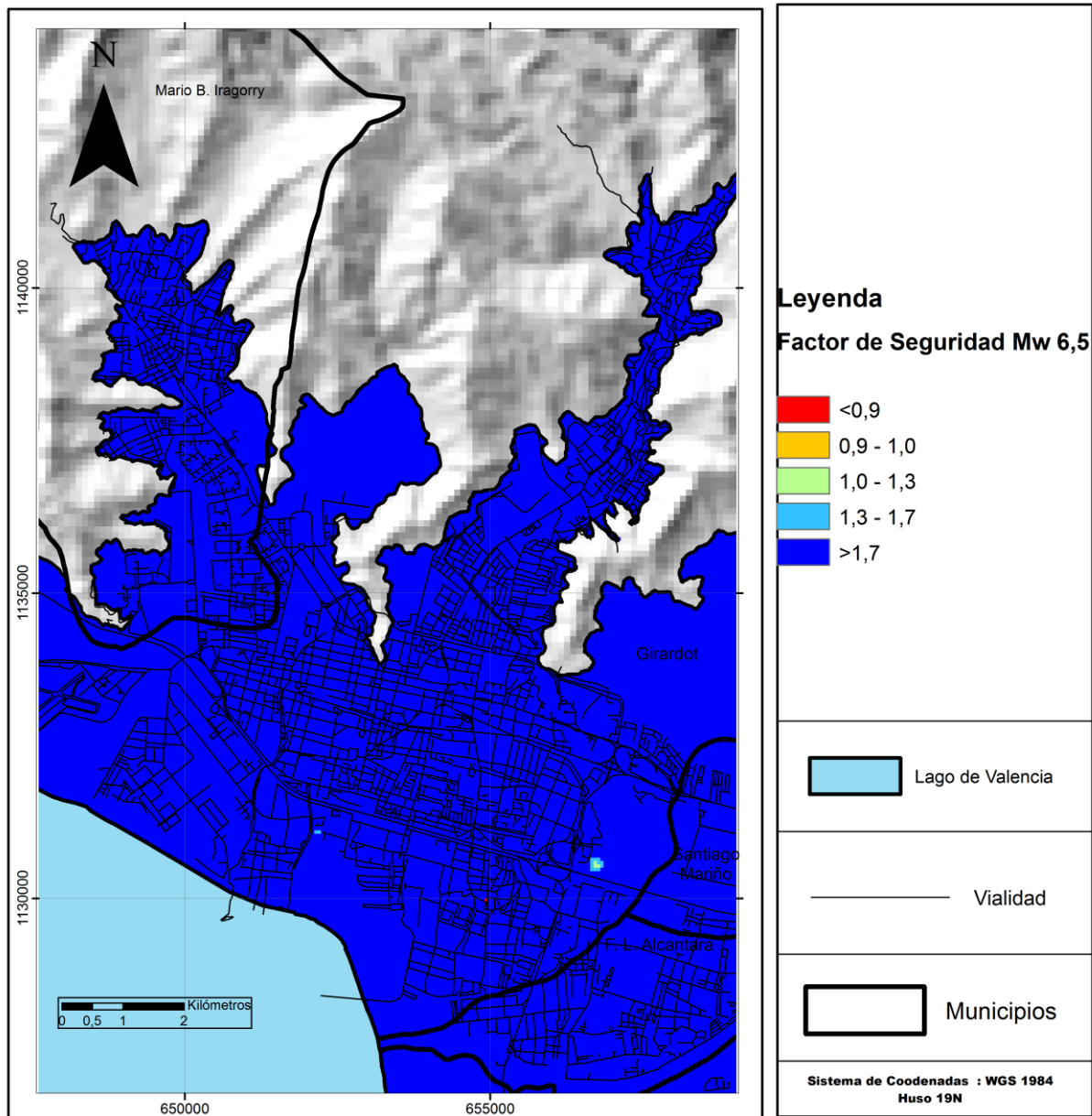


Figura 5.8. Mapa de potencial de licuación del suelo en Maracay para un sismo de Magnitud Mw 6.5.

La figura 5.8 muestra un potencial de licuación para la ciudad de Maracay prácticamente nulo ya que para esta magnitud solo una perforación de las estudiadas dio un factor de seguridad menor a 0,9 (muy alto riesgo de licuación) específicamente la perforación (E-1178096-P1) ubicada en el sur de la ciudad a 1,5 km de la costa del Lago de Valencia. El tipo de suelo del estrato licuable fue un limo arenoso.

Además de esta perforación tenemos la (ES-27387-P2) con un factor de seguridad de 1,088 lo que representa un moderado a alto potencial de licuación. Esta perforación se encuentra también en la zona sur de la ciudad a unos 2,8 km de la costa del Lago de Valencia pero a escasos metros del Rio las Delicias en su extensión hacia el Lago de Valencia en el sur lo que nos demuestra la influencia de la cercanía de los ríos con la disminución del factor de seguridad de licuación en la zona de estudio.

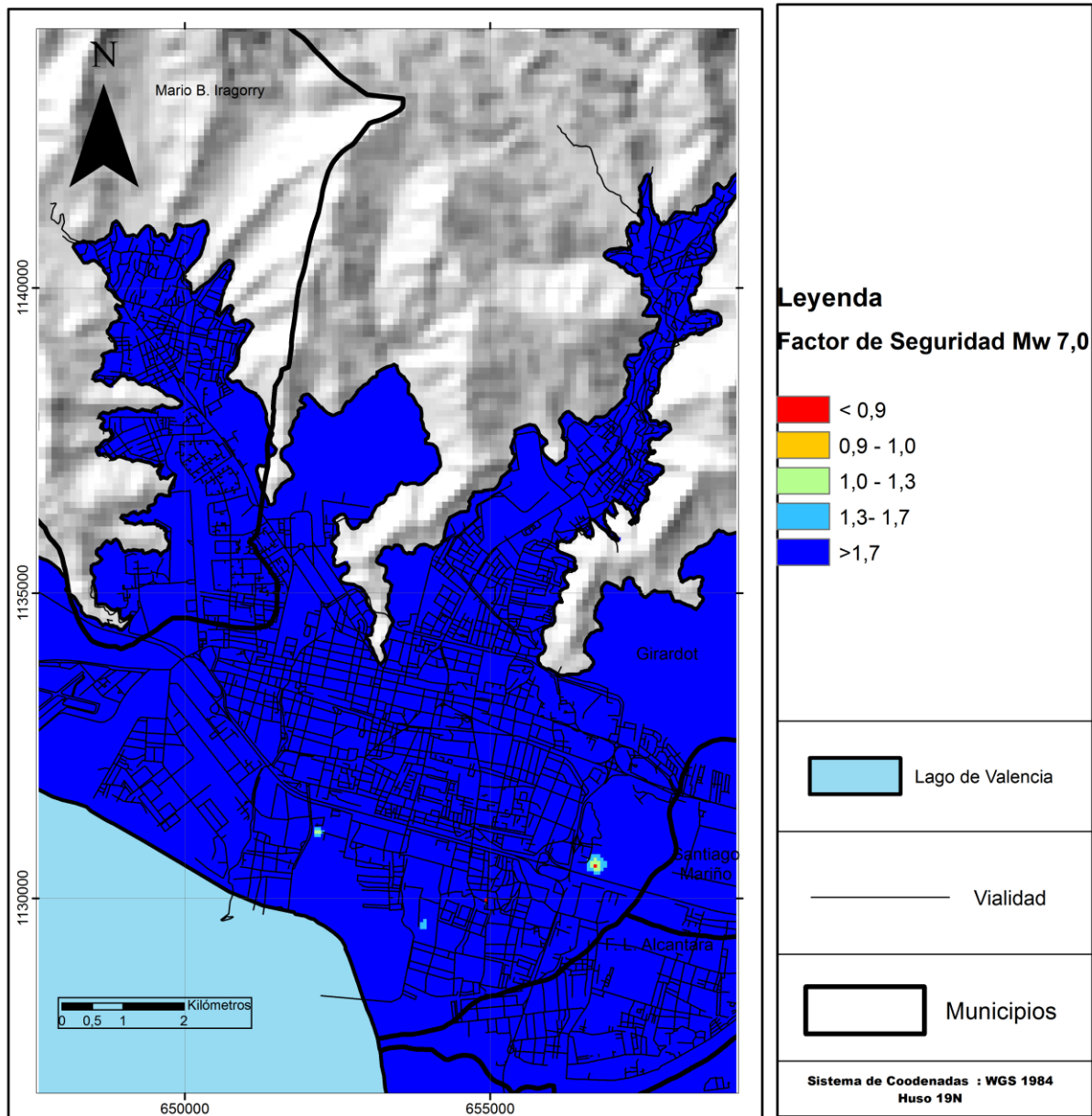


Figura 5.9 Mapa de potencial de licuación del suelo en Maracay para un sismo de Magnitud Mw 7,0.

Para esta magnitud se puede visualizar como comienzan a aparecer perforaciones con bajo, moderado y alto potencial de licuación aunado a las nombradas en el análisis de la figura 5.8, es el caso de (E-1072495-P1) ubicada a menos de un km de la costa del lago con un factor de seguridad de 1,1 representa un moderado potencial de licuación en su capa de arena limosa.

Además las perforaciones (ES-27387-P2) y (E-1178096-P1) muestran una zona de influencia mayor por el aumento en la magnitud del sismo.

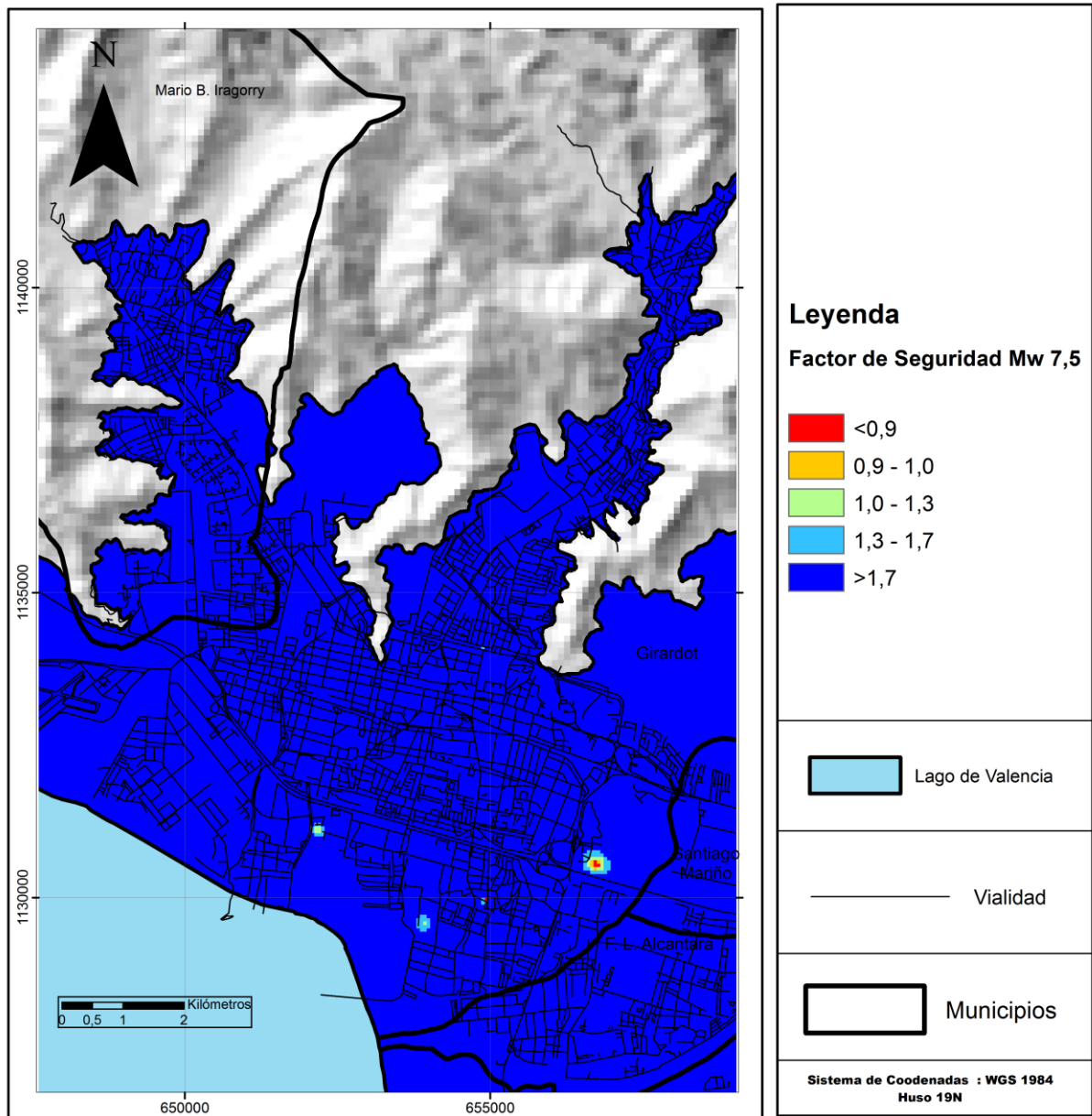


Figura 5.10 Mapa de potencial de licuación del suelo en Maracay para un sismo de Magnitud Mw 7,5.

La figura 5.10 mapa de potencial de licuación para un sismo de magnitud Mw 7,5, representa la mayor magnitud en ser estudiada en esta investigación se puede visualizar como hay varias zonas con potencial de licuación moderado y alto y como las zonas de influencia de estas son mucho mayor a comparación con la figura 5.8 en donde se evalúa el potencial de licuación para un sismo de magnitud Mw 6.5.

Estas zonas con potencial de licuación considerable en colores distintos al azul oscuro que ocupa la gran mayoría del área se encuentran todas al sur de la ciudad a una distancia máxima de 2,8 km de la costa del Lago de Valencia, además algunas de estas se encuentran a pocos metros de los ríos Guey y Las Delicias.

Otro aspecto importante a resaltar, es la clasificación de la capa del suelo que mostro el menor de factor de seguridad para cada perforación en toda la zona de estudio. La figura 5.11 muestra la distribución estadística de estos estratos, un 43 % de estas capas resulto en una arena limosa, 14 % de limos arenosos y un 13 % de estos fueron arena con grava.

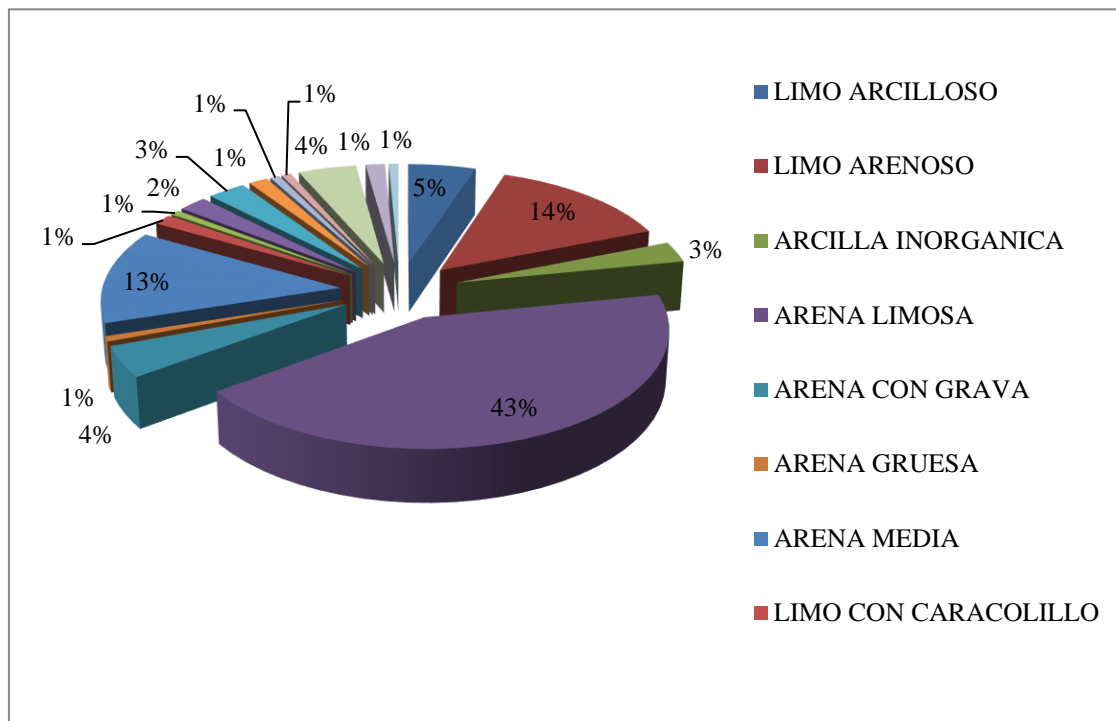


Figura 5.11. Tipo de suelo de la capa con menor factor de seguridad de cada perforación.

Es importante recalcar que en la mayoría de las perforaciones que resultaron en potenciales de licuación moderados y altos ubicadas en la zona sur sureste de la ciudad, tenían entre los estratos estudiados, capas de un suelo conocido como caracolillo de origen diatomáceo

Aunque no exista una relación entre el caracolillo con el fenómeno de licuación de suelos, la presencia de este sedimento en las perforaciones con moderado y alto potencial de licuación en el sur de la ciudad de Maracay puede asociarse a que es un suelo blando con baja compactación que en el ensayo de SPT suele obtener un bajo número de golpes y que fue depositado en un periodo de crecimiento del Lago de Valencia lo cual es un criterio importante para que se presente el fenómeno de la licuación de suelos Kramer (1996).

Heredia (1984) estudio profundamente los fenómenos geotécnicos en los suelos diatomáceos del lago de Valencia e indica que estos suceden en una forma particularmente fuerte en los suelos granulares con alto contenido de “caracolillo” de las riberas del lago. Según sus investigaciones, puede producirse un colapso por el ascenso del nivel freático debido al humedecimiento por vía capilar del suelo. Este colapso puede ser peligroso, particularmente en presas de tierra y para todo tipo de edificaciones que sean construidas sobre suelos residuales.

A continuación se muestra un mapa de la distribución de las perforaciones con presencia de caracolillo en la ciudad de Maracay (figura 5.12), en donde se observa que estas se encuentran todas al sur de la ciudad y la distribución es similar a los límites del Lago de Valencia III en la figura 2.4.



Figura 5.12. Distribución de perforaciones con presencia de caracolillo en la ciudad de Maracay, Estado Aragua.

A pesar que la Ciudad de Maracay se encuentra muy cercana a zonas de fallas que pueden generar sismos de importante magnitudes como el máximo estudiado en esta investigación Mw 7.5 aunado a que en la mayoría de las perforaciones hay presencia de depósitos de arcillas y limos arcillosos, intercalados con depósitos de arena, los cuáles ante la presencia de agua podrían generar un ambiente propicio para que se manifieste la falla por licuación en algún sismo, la mayoría de las perforaciones resulto en factores de seguridad altos , (potencial de

licuación de suelo baja) la única zona de la ciudad en donde las perforaciones resultaron en factores de seguridad bajos e intermedios asociados a suelos potencialmente licuables es en el sur de Maracay.

Es posible que algunas perforaciones con condiciones favorables a la licuación no hayan presentado factores de seguridad relacionados a suelos potencialmente licuables por no poseer información sobre el nivel freático de esa perforación resultando así en un factor de seguridad alto.

Por esta razón a partir de las perforaciones que si poseen información sobre el nivel freático se generó un mapa con el método de interpolación IDW en Arcgis 10.4 de la profundidad del mismo (figura 5.13).

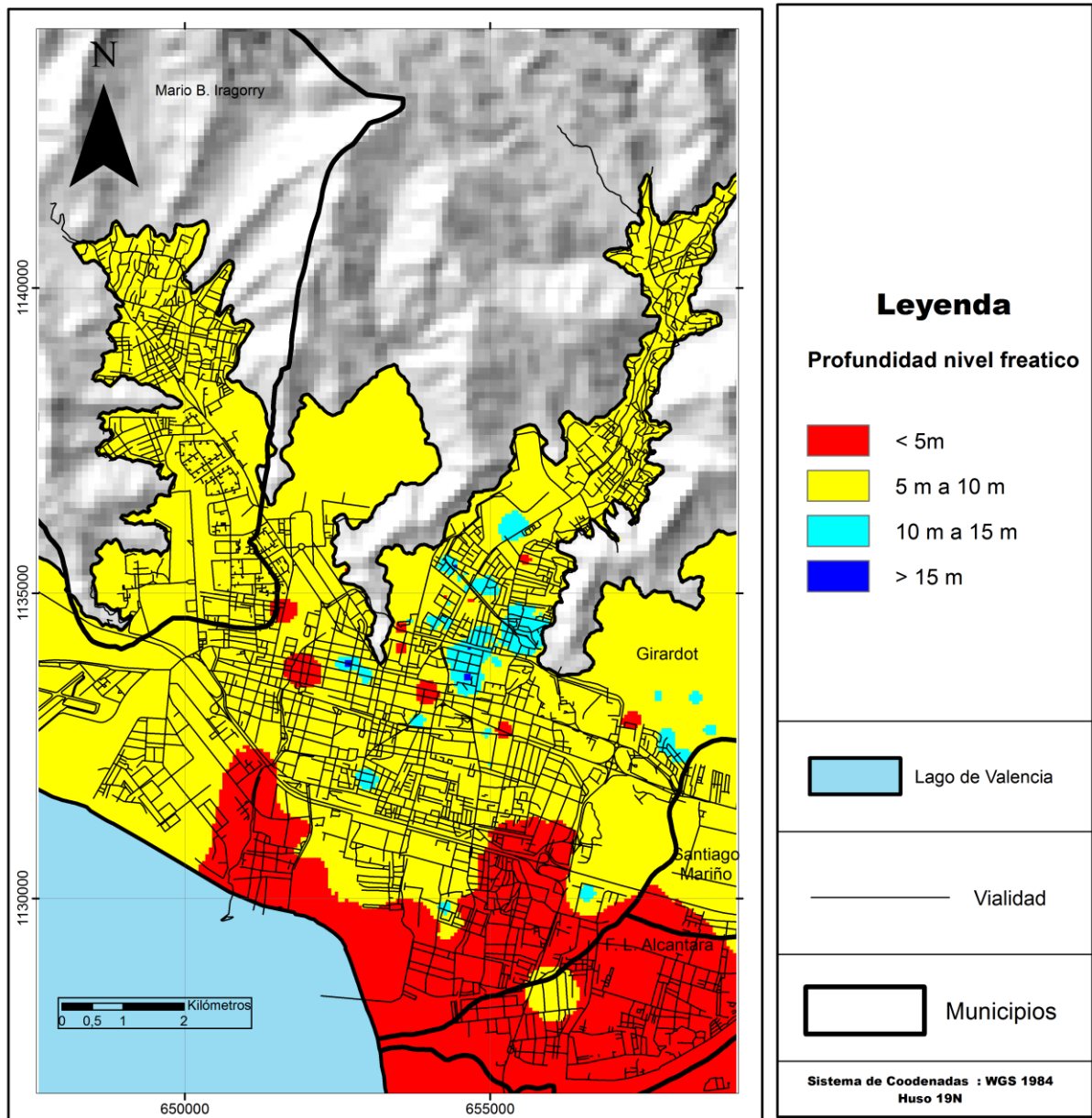


Figura 5.13. Mapa de profundidad del nivel freático en la ciudad de Maracay

La figura 5.13 (mapa de profundidad del nivel freático) muestra como hacia la zona sur y sur este de la ciudad de Maracay se encuentran las menores profundidades del nivel freático (menores a 5 m).

La profundidad entre 5 y 10 m del nivel freático se distribuye alrededor de toda la ciudad

En la zona de las Delicias se visualizan pequeñas zonas con el nivel freático entre 10 y 15 metros.

Y por último dos perforaciones ubicadas en el centro norte de la ciudad poseen profundidades del nivel freático mayor a 15 m.

Aunque la aplicación de la metodología Seed & Idriss (1982) para el cálculo del factor de seguridad de licuación de suelos en la ciudad de Maracay haya obtenido un bajo porcentaje de perforaciones con alto potencial de licuación, es importante integrar toda la información geofísica, geológica y geotécnica de la ciudad de Maracay para de esta forma poder elaborar un mapa de las zonas con potencial de licuación, de manera similar al trabajo realizado en Portoviejo (Marcial et al., 2017) donde integraron la información geológica, geotécnica y geofísica así como la profundidad del nivel freático, ubicación de los cuerpos de agua y el relieve para proponer un mapa de licuación de dicha ciudad.

Un mapa que sirve de apoyo para entender el comportamiento del factor de seguridad de licuación en la ciudad de Maracay es el mostrado a continuación en la figura 5.14 (mapa del factor de seguridad (sin intervalos), del potencial de licuación del suelo en Maracay para un sismo de Magnitud 7.0).

La diferencia de este mapa con la figura 5.9 es simplemente que los valores del factor de seguridad no se clasifican según los intervalos comúnmente aplicados para catalogar el potencial de licuación, por lo tanto representa la distribución de los valores del factor de

seguridad para cada perforación obtenidos por la metodología de Seed e Idriss (1982) e interpolados por el método IDW de Arcgis 10.4.

Este mapa nos permite visualizar el comportamiento regional de los valores de factor de seguridad de licuación en la ciudad de Maracay.

Se observa como en la zona sur existen al menos 5 zonas rojas las cuales son las mismas perforaciones que en la figura 5.9 poseen factores de seguridad menores a 1 pero que en este caso por la interpolación están rodeadas de zonas naranjas que representan factores de seguridad cercanos a 1.

Hacia el centro de la ciudad se presenta una zona heterogénea con una amplia variación de los valores del factor de seguridad que en general son mayores 1.7 por lo tanto no se asocian a suelos potencialmente licuables igual que hacia el norte.

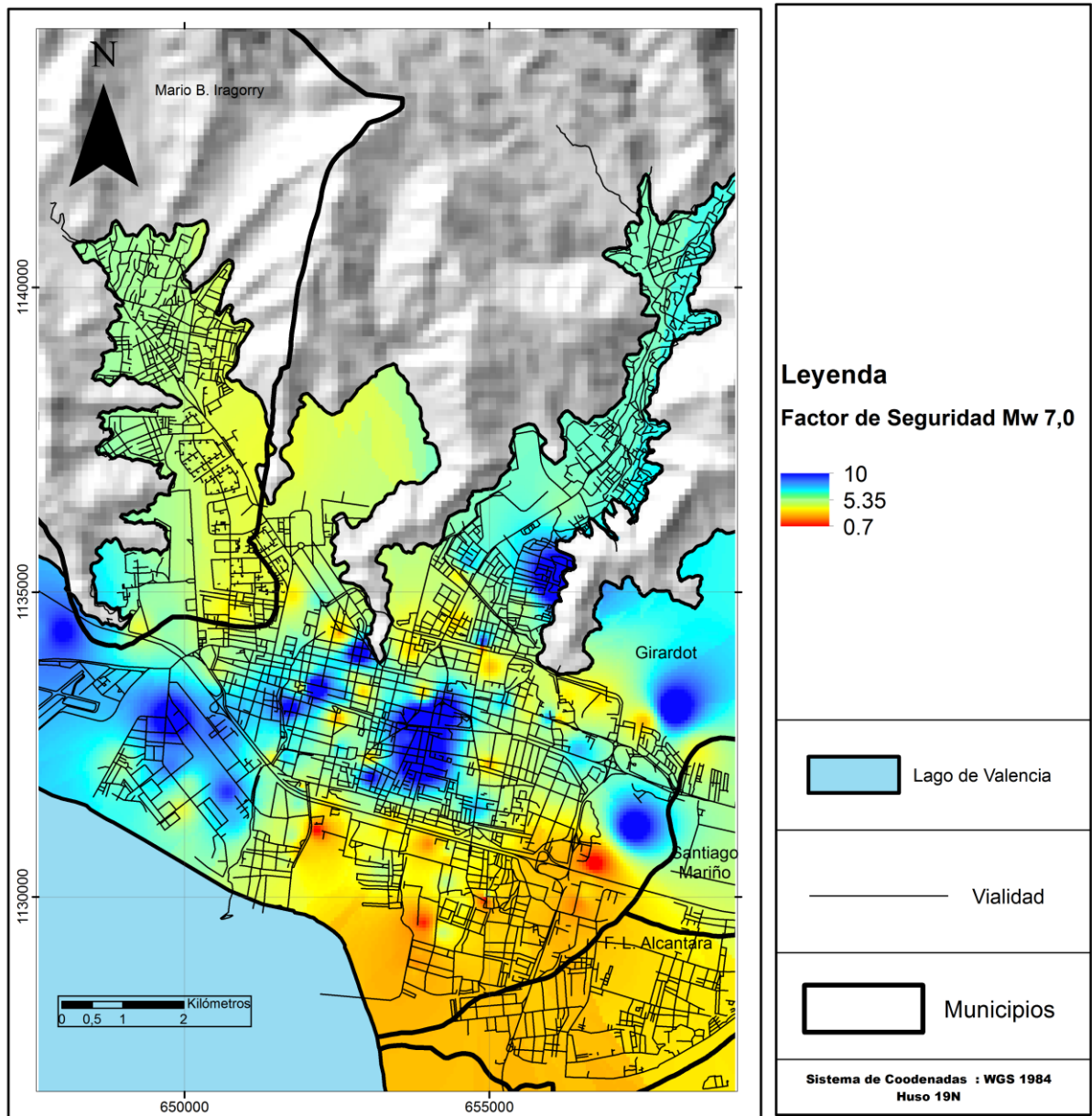


Figura 5.14. Mapa del factor de seguridad (sin intervalos), del potencial de licuación del suelo en Maracay para un sismo de Magnitud 7.0.

Por lo tanto a partir de la toda la información disponible de la ciudad de Maracay se procede a elaborar un mapa con de zonas con potencial de licuación integrando la información geológica geofísica y geotécnica, la cercanía con cuerpos de agua la profundidad del nivel freático etc.

El mapa será definido por 4 zonas, la más importante (zona con alto potencial de licuación) se delimito en base a las perforaciones que obtuvieron valores del factor de seguridad de licuación menores a 1 con la metodología de Seed & Idriss (1982). El área de influencia de las mismas fue ampliada y hacia la zona este de la costa del Lago de Valencia se definió también como zona de alto potencial de licuación debido a la presencia de este importante cuerpo de agua, la baja profundidad del nivel freático, la geología del suelo, el Vs30 que por ser el más bajo de la zona de estudio se asocia a suelos poco compactos y el comportamiento del factor de seguridad mostrado en la figura 5.14. En la zona suroeste de la ciudad de Maracay no se tomo como suelo con alto potencial de licuación en la costa del Lago debido a que las perforaciones estudiadas con la metodología Seed & Idriss (1982) no resultaron en valores del factor de seguridad bajos.

La profundidad del nivel freático en esta zona con alto potencial de licuación tiene un promedio de 3,5 metros, un promedio de número de golpes SPT para las capas más profundas menor a 25 golpes y presencia de caracolillo en sus estratos.

Una segunda zona (moderado potencial de licuación) bordea las zonas con alto potencial de licuación y en el centro sur de la ciudad toma una dirección norte en el rio Guey, cuerpo de agua que pudiera aumentar el potencial de licuación.

Las perforaciones geotécnicas características de esta zona muestran una profundidad promedio del nivel freático de 7 metros, los estratos de estas perforaciones son intercalaciones de arenas y limos con presencia de caracolillo.

El Vs30 promedio por metodologías geofísicas en esta zona es de 248 m/s con un valor mínimo de 206 m/s. La profundidad del basamento en esta zona ronda los 260 y 280 m.

Una tercera zona con un bajo potencial de licuación se encuentra ubicada desde el centro hacia el norte de la ciudad siendo junto a la zona sin licuación la más vasta del mapa. El promedio de factor de seguridad de licuación de esta zona es el más alto. En cuanto a la información geofísica, es en esta zona donde se encuentran los valores máximos de V_{s30} así como los valores mínimos de espesor sedimentario. Aunque el nivel freático según la figura 5.13 en esta zona es en su mayoría es entre 5 m y 10 m, muchas perforaciones analizadas no poseían información del mismo

Por último encontramos la zona sin licuación, definida principalmente por la intersección entre la cuenca sedimentaria y las montañas o afloramientos metamórficos en el norte de la ciudad.

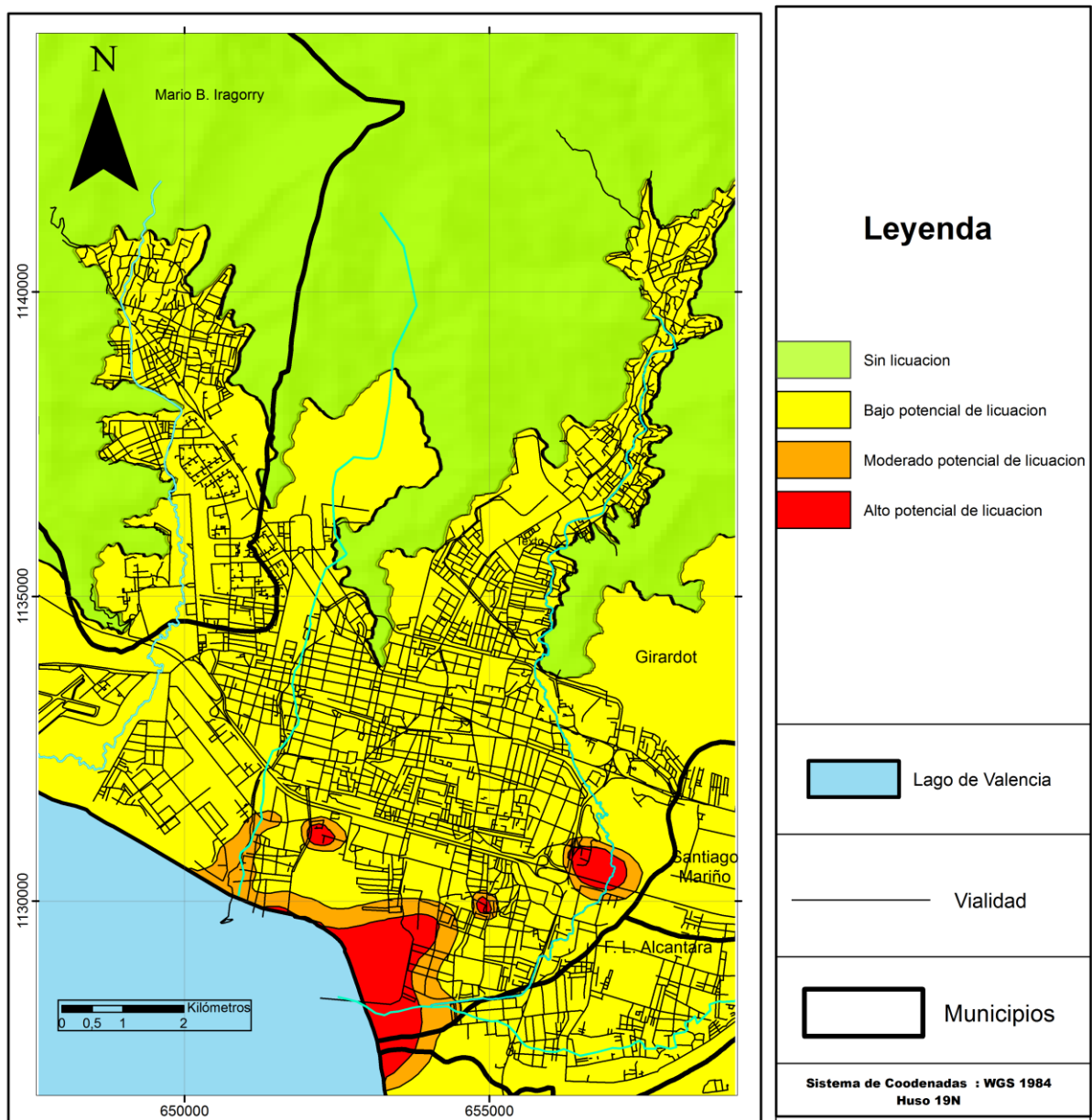


Figura 5.15. Mapa de potencial de licuación para la ciudad de Maracay estado Aragua.

CONCLUSIONES

- La información geotécnica de las perforaciones otorgadas por la empresa OT Heredia sirvió para el cálculo del Vs30 por SPT y el cálculo del factor de seguridad de licuación.
- Se han comparado las metodologías que usan datos geofísicos con las que usan datos geotécnicos, así como Vs30 derivado de topografía para la obtención del Vs30 en la ciudad de Maracay. Los resultados obtenidos entre ambos son bastante similares y concuerdan con los estudios previos realizados donde se aplicaron otras metodologías.
- La función de N-SPT-Vs que mejor se acopló a los resultados geofísicos fue la de Campos 2004.
- El mapa de Vs30 topográfico sirve para complementar la información geofísica en zonas donde no se pudo realizar adquisiciones.
- Debido a las bajas velocidades Vs de los sedimentos se puede concluir que el material sedimentario al sur de la ciudad, cercano al Lago de Valencia, puede asociarse a la presencia de material lacustre, caracterizado por arcillas blancas y el tipo de suelo conocido como caracolillo de origen diatomáceo
- Los valores altos del VS hacia el norte de la ciudad se debe al material fluvial correspondiente a arcillas y limos con presencia de material grueso tales como grava y arena mostrado en los ensayos realizados en el norte de Maracay.
- Los mapas realizados permitieron corroborar que el espesor de la cuenca del Lago de Valencia aumenta desde la Cordillera de la Costa, al norte de la ciudad, hacia el lago, obteniendo un espesor máximo de 321 m hacia el sur de la ciudad.

- En la zona sur de la ciudad de Maracay el nivel freático es menor a 5 metros de profundidad
- Hacia el sur de la ciudad de Maracay en la costa del Lago de Valencia se encuentran los suelos con el mayor potencial de licuación.
- En el centro y norte de la ciudad de Maracay no existe riesgo de licuación.
- El suelo conocido como caracolillo de origen diatomáceo se distribuye en la zona sur sureste de Maracay y se relaciona a un periodo de expansión del Lago de Valencia.

RECOMENDACIONES

- Obtener la profundidad del nivel freático en las perforaciones donde no se especifica para ver como varían el potencial de licuación en las mismas.
- Tener en cuenta la información sobre el potencial de licuación de la ciudad en la generación de microzonas sísmicas de la misma.
- Tener en cuenta las zonas con moderado y alto potencial de licuación en los planes de ordenamiento de la ciudad.
- Informar sobre las posibles medidas de mitigación de los efectos de los fenómenos de licuación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguerrevere, P. I., & Zuloaga, G. (1937). Observaciones geológicas en la parte central de la Cordillera de la Costa, Venezuela. *Bol. Geol y Min.*, Caracas, Venezuela, 1(2-4), 3-22.
- Allen, T., & Wald, D. (2009). On the use of High-Resolution Topographic Data as proxy for seismic site conditions (V_{s30}). *Bulletin of Seismological Society of America*, 99, No. 2A, 935-943.
- Alviar, J.D y Penela, J. (1985). *Evaluación de la eficiencia del sistema Martillo-barras en el ensayo de penetración normal, para aplicaciones en Ingeniería Civil.*(Trabajo Especial de grado no publicado) Universidad Católica Andrés Bello, Caracas.
- American Society for Testing and Materials (1999). Standard test methods for crosshole seismic testing: ASTM D 4428/D 4428M00. EUA:
- Amundaray, J., (2006). *Ingeniería Forense y Estudios de Sitio. Guía para la prevención de Gestión de Riesgos.* Editor José Grases. Venezuela.
- Arai, H., & Tokimatsu, K. (2004). S-Wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor H/V Spectrum. *Bulletin of the Seismological Society of America*.
- Audemard, F (2014).. "Active Block Tectonics in and around the Caribbean: A review",
Contribución a: El Límite Noreste de la Placa Sudamericana - estructuras litosféricas de la superficie al manto, Editores: M. Schmitz, F. Audemard, F. Urbani, Comité Editor Libros y Monografías, Fac. Ing. UCV, Capítulo 2, 29-77.

- Audemard, F. (2000). *Aludes torrenciales en los sistemas montañosos de Venezuela: ¿Imprevisibles?*, Caracas, Venezuela, FUNVISIS.
- Audemard, F. (2002). Ruptura de los grandes sismos históricos venezolanos de los siglos XIX y XX revelados por la sismicidad instrumental contemporánea. *XI Congreso Venezolano de Geofísica*.
- Audemard, F. A.; F. D. Santis; A. Singer y C. Ramos (1995). El Sistema de Fallas de La Victoria, Venezuela Norcentral: Trazas Activas, Complejidades Estructurales, Cinemática y Sismicidad Asociada. *IX Congreso Latinoamericano de Geología*, Caracas, Venezuela.
- Audemard, F.; F. D. Santis y A. Singer. (1990). Evidences of lateral spread in the lacustrine delta os Guigue, South margin of the Valencia Lake, during the 07-29-1967 Caracas Earthquake. *Bulletin in INQUEA Neotectonics Commission 13*.
- Bard, P. (1999). Microtremor measurements: A tool for site effect estimation?. The Effects of surface Geology on Seismic motion. *Balkema, Rotterdam, Holanda*, 1251-1279.
- Bockh, A. (1956) El Desecamiento del Lago de Valencia. *Ediciones de la Fundación Eugenio Mendoza*. Caracas, Venezuela, 246 p.
- Brandes, H (2003). *Geotechnical and Foundation Aspects*. Inglaterra.
- Campos, A. (2004) *Definición de las relaciones entre parámetros geofísicos en pozos disponibles a lo largo de la Línea 4 del Metro de Caracas*. (Trabajo Especial de Grado), Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.

- Casalena, M. 2011. *Caracterización geofísica del suelo somero mediante la aplicación del método de refracción por microtemores (ReMi) en la ciudad de Maracay – estado Aragua*. (Trabajo Especial de Grado). UCV, Venezuela. 142 pp.
- Cheng, F., Xia, J., Luo, Y., Xu, Z., Wang, L., Shen, C., Liu, R., Pan, Y., Mi, B., y Hu, Y. (2016). Multichannel analysis of passive surface waves based on crosscorrelations. *Geophysics*, 81(5), EN57-EN66.
- COVENIN. (2001). "Edificaciones sismorresistentes, COVENIN 1756:2001.", *Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN), FONDONORMA, MCT, MINFRA, FUNVISIS*. Caracas, Venezuela.
- Crespo, C (2004). Consideraciones sobre la Licuación de los Suelos XVIII. *Seminario Venezolano de Geotecnia. Geoinfraestructura “La Geotecnia en el Desarrollo Nacional”*. Venezuela.
- Curtis, A., Gerstoft, P., Sato, H., Snieder, R., & Wapenaar, K. (2006). Seismic interferometry - turning noise into signal. *The Leading Edge*, 25(9), 1082-1092.
- De Santis, F. Singer, A. Audemard, F. (1989); Manifestaciones de “lateral spread” en el delta Cauche de Guigue; costa sur del Lago de Valencia durante el terremoto de Caracas del 29-07-1967; *VII Congreso geológico Venezolano*, Barquisimeto, Venezuela. 1124-1136.
- Escobar, V. (2019). *Estudio de la velocidad de ondas de corte mediante análisis multicanal de ondas superficiales en la ciudad de Maracay*. (Trabajo Especial de Grado). Universidad Simón Bolívar. Sartenejas, Venezuela. 114 pp
- Everett, M. E. (2013). *Near-Surface Applied Geophysics*. Cambridge University Press, New York. (182-197).

- Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas. FUNVISIS (1978). Segunda Fase del Estudio del Sismo ocurrido en Caracas el 29 de Julio de 1967. Ministerio de Obras Públicas, Comisión Presidencial para el Estudio del Sismo, FUNVISIS, Caracas, Venezuela, Volumen A, 517 p.
- Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas FUNVISIS. (2002). *La investigación sismológica en Venezuela*. Caracas, Venezuela.
- Garcés, F. (2009). Learning from Earthquakes. The Mw 6.4 Tucacas, Venezuela. Quake of September 12, 2009. *EERI. Newsletter November 2009. Volume 43, Number 11*.
- González de Juana, C., Iturralde, J., y Picard, X (1980). Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas (Vol. I). *FONINVES*, Caracas-Venezuela, (309-316).
- Granda, A., Granda, T y Madrid, A. (2005). El Método de la Sísmica Pasiva: Una herramienta fiable para la caracterización geotécnica del terreno en zonas urbanas. *International Geophysical Technology, S.L.*
- Graterol, M. (1972). Petrogénesis de la peridotita de Loma de Hierro, estado Aragua. *Mem. VI Conf. Geol. Caribe*. Margarita, Venezuela (329-336).
- Grotzinger, J., y Jordan, T. (2010). Understanding Earth. *N. W. H. Freeman Ed. 7th ed.*. New York, Estados Unidos. (355-356).
- Hackley, P. C., Urbani, F., Karlsen A.W, y Garrity C.P. (2006). Mapa Geológico de Venezuela. *U.S. Geological Survey*.
- Heredia, J. (1984). *Comportamiento mecánico de suelos en la zona sur de Maracay*. Trabajo de Ascenso. Instituto Universitario de Tecnología Antonio José de Sucre

- Hernandez M. (2006). *Estudio geológico y reconocimiento de arcillas expansivas en suelos de una zona al sur de Maracay, Estado Aragua*. (Trabajo Especial de Grado). Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. 149 pp.
- Hidalgo, F. y Paredes L. (2015). *Elaboración de mapa de microzonificación del potencial de licuefacción de suelos, en las parroquias: Los Tacarigua, Andres Eloy Blanco, Jose Casanova Godoy y Pedro Jose Ovalles, Maracay*. (Trabajo Especial de Grado). Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, Venezuela.
- Idriss, M y Boulanger, R. (2008). Soil Liquefaction During Earthquakes Engineering monographs on miscellaneous earthquake engineering topics. *USA: Publication Earthquake Engineering Research Institute*
- Imai, T. y Yoshimura, M. (1970). Elastic wave velocity and dynamics characteristics of the soft ground. Soil and Foundation. *Journal of soil mechanics and foundation division. ASCE, 97 SM9 (1249- 1273)*
- Kramer, S. Y Stewart, J., (2004). Geotechnical aspects of seismic hazards. *Cap. 4 de: Earthquake Engineering: from Engineering Seismology to Performance-based Engineering, CRC Press, Boca Raton, Florida, Estados Unidos.*
- Kramer, S., (1996). Geotechnical Earthquake Engineering, *Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, New Jersey, Estados Unidos.*
- Marcial, D., Linares, M. E., Fragieli, R., Cardenas, D., Hernández, J, J., Paez V., (2017). Capítulo 14: Evaluación del potencial de licuación en Portoviejo. *En: EPN-TECH EP (Ed.), PRODUCTO 1: Estudio de la microzonificación sísmica del área urbana de Portoviejo y sus cabeceras parroquiales rurales, Estudio de Microzonificación Sísmica del Cantón Portoviejo, Segunda Fase. Quito. (240-262)*

- Menéndez, A. (1966). Tectónica de la parte central de las Montañas Occidentales del Caribe, Venezuela. *Bol. Geol*, Caracas, Venezuela. 8(15): 116-139.
- Meza, J. (2010). *Modelado Bidimensional en las ciudades de Maracay, edo. Aragua y Valencia, edo. Carabobo, a traves de datos de sísmica de refracción somera*. (Trabajo Especial de Grado). UCV, Venezuela. 140 pp.
- Morales, C, Hernández, J, Schmitz, M, Cano, V y Tagliaferro, F., (2011). Velocidades promedios de ondas de corte en los primeros 30 m de profundidad (vs30). *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V., Vol. 26, N° 2, (5–6)*.
- NEHRP (2003). BSSC recommended seismic provisions for new buildings and other structures, *FEMA P-1050*, Building Seismic Safety Council, National Institute of Building Sciences, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., USA.
- Ohta, Y. y Gota, N. (1978). Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 6. (167-187)*.
- Omaña, I. (2002). *Integración de la geología de la zona de Morón - Valencia Ocumare de la Costa, Estado Carabobo y Aragua*. (Trabajo Especial de Grado). Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela
- Ornelas A. (2018). *Inversión 1D de la onda Rayleigh de datos de ruido ambiental en la ciudad de Maracay*. (Trabajo Especial de Grado). Universidad Simón Bolívar. Sartenejas, Venezuela. 123 pp.
- Pardon y Porcelet (1994). *Reducción del Daño Sísmico-Guía para las empresas de agua*. Estados Unidos.

- Park, C. B., Miller, R. D., y Xia, J. "Multichannel Analysis of Surface Waves". *Geophysics*, 64, 800-808. (1999).
- Peeters, L. (1968) *Origen y evolución de la cuenca del Lago de Valencia, Venezuela*. Caracas. Instituto para la conservación del Lago de Valencia. Venezuela.
- Pérez, O., y Mendoza, J. (1998). Sismicidad y tectónica en Venezuela y áreas vecinas. *Física en la Tierra*, 10, (87-110)
- Piburn, M. D. (1968). Metamorfismo y estructura del grupo Villa de Cura, norte de Venezuela. *Bol. Geol.*, Caracas, Venezuela. 9(18): 183-290.
- Pullammanappalill, S; Honjas, W and Louie, J. (2003). Determination of 1-D shear wave velocities using the refraction microtremor method. *3th internacional conference on the application of geophysical methodologies to transportation facilities and infrastructure. Orlando, Florida. USA.*
- Renz, O. y K. C. Short, (1960). Estratigrafía de la región comprendida entre El Pao y Acarigua, Estados Cojedes y Portuguesa. *III Cong. Geol. Mem. 1.* (277-315). Caracas, Venezuela.
- Rodríguez, L.M., Singer, A., Rocabado, V., (2005). Evidencias geomorfológicas de fenómenos de sufosión-tubificación-colapso en el tope de la terraza Pleistocena de Barquisimeto. *IV Coloquio sobre Microzonificación Sísmica, Barquisimeto. Serie Técnica FUNVISIS No. 1.* (235-239).
- Rojas, C., (2008). *Determinación de Los Periodos Fundamentales del subsuelo de la Ciudad de Maracay, Edo. Aragua.* (Tesis Especial de Grado). Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. 132 pp.

Rojas, S., Morales, C., Rojas, H., Cataldo, A., Schmitz, M. (2008). Determinación de las velocidades de propagación de las ondas de corte - parámetros Vs30, VsP, Vs500 y parámetros dinámicos - con métodos sismológicos en Caracas. *Conferencia 50 Aniversario Sociedad Venezolana de Geotecnia "Estado de la Práctica" en Honor a Gustavo Luís Pérez Guerra*. Caracas, Venezuela. 18p.

Schlumberger. (2017). Te Oilfield Glossary. from <http://www.glossary.oilfield.slb.com/>.

Schmitz, M.; V. Cano; O. A. López; S. Klarica; A. Pombo; J. F. Díaz; J. Heredia; J. Avendaño y C. Morales. (2015). Estudios Geofísicos en Cuencas Urbanas en Venezuela con Fines de Microzonificación Sísmica. *Boletín de Geología*, 37 (1), 17-26.

Schubert, C. (1980). Contribution to the Paleolimnology of the Lake Valencia, Venezuela: Seismic Stratigraphy, *CATEMA*, 7(1), 275-292.

Seed H B, e Idriss I M. (1982). Ground motions and soil liquefaction during earthquakes. Berkeley, California: EERI.

Seed, H e Idriss, M. (1971). *Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potencial*.

Shagam, R.. (1960). Geología de Aragua central (Venezuela). *III Cong. Geol. Venez.* Caracas, Venezuela. (1959, 2): 574-675.

Smith, R. J. (1952). Geología de la región de Los Teques-Cúa. *Bol. Geol.* Caracas, Venezuela (2(6)) : 333-406.

Suárez, M., Marcano, E., Ramírez, A., Segura, Y., y Marcó, L., (2013). Distribución espacial de fósforo en sedimentos superficiales del Lago de Valencia, *Revista Scielo*, 17(66), 1-7.

- Urbani F. (1972). Geología del Granito de Guaremal y rocas asociadas, estado Carabobo. *Bol. Geol.*, Caracas, Venezuela. (5, 4): 2340-2374.
- Wald, D. & Allen, T., (2007). Topographic Slope as a Proxy for Seismic Site-Conditions (V_{s30}) and Amplification Around the globe. Open-File Report 2007–1357. U.S. Geological Survey,.
- Yauri, S. (2006). Microtremores. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. *Instituto Geofísico del Perú*. Perú.
- Youd T L e Idriss I M. (1997). NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. Technical Report *NCEER 97-0022*, Salt Lake, Estados Unidos. (276).
- Youd, T e Idriss, I (2001). Liquefaction Resistance of Soils: Summary from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 127, (4). 297-313.
- Young, H. y R. Freedman. (2009). Física Universitaria. México

APÉNDICE

Tabla A.1. Información sobre el estrato con menor factor de seguridad de las perforaciones procesadas con la metodología Seed e Idriss (1982) para obtención del potencial de licuación para sismos de Mw 7.5, 7 y 6.5

| ID | # | Norte | Este | Mw 7.5 | Mw 7 | Mw 6.5 | Profundidad del Estrato (m) | TIPO DE SUELO |
|----------|----|---------|--------|--------|------|--------|-----------------------------|--------------------|
| ES-25287 | P1 | 1132793 | 651889 | 3.88 | 4.61 | 5.59 | 10 | LIMO ARCILLOSO |
| ES-27387 | P2 | 1130530 | 656730 | 0.76 | 0.9 | 1.09 | 15 | LIMO ARENOSO |
| E-210487 | P1 | 1132147 | 649763 | 4.91 | 5.82 | 7.07 | 13 | ARCILLA INORGANICA |
| E-210887 | P2 | 1135265 | 654481 | 2.6 | 3.08 | 3.74 | 20 | ARENA LIMOSA |
| E-315488 | P1 | 1130073 | 656589 | 2.48 | 2.94 | 3.57 | 20 | ARENA CON GRAVA |
| E-317288 | P1 | 1131970 | 653060 | 5.75 | 6.82 | 8.28 | 15 | ARENA LIMOSA |
| E-317888 | P2 | 1131585 | 652960 | 3.46 | 4.1 | 4.98 | 8 | ARENA LIMOSA |
| E-421289 | P1 | 1133991 | 652857 | 7.08 | 8.4 | 10.2 | 0.5 | CAPA SUPERFICIAL |
| E-423189 | P2 | 1132250 | 653884 | 8.08 | 9.59 | 11.65 | 6 | ARENA GRUESA |
| E-525190 | P3 | 1131460 | 652350 | 2.31 | 2.74 | 3.33 | 17 | ARENA MEDIA |
| E-528990 | P2 | 1129420 | 654240 | 3.22 | 3.82 | 4.64 | 10 | ARENA MEDIA |
| E-528690 | P3 | 1135049 | 654285 | 3.34 | 3.96 | 4.81 | 11 | ARENA MEDIA |
| E-629491 | P1 | 1132920 | 649820 | 6.67 | 7.91 | 9.61 | 6 | ARENA LIMOSA |
| E-630591 | P2 | 1130240 | 654310 | 3.36 | 3.99 | 4.85 | 13 | ARENA LIMOSA |
| E-631891 | P1 | 1129850 | 654270 | 2.54 | 3.01 | 3.66 | 17 | ARENA MEDIA |
| E-632091 | P1 | 1134045 | 653710 | 2.36 | 2.8 | 3.4 | 12 | ARENA LIMOSA |
| E-633491 | P1 | 1134865 | 652190 | 3.87 | 4.59 | 5.58 | 10 | LIMO ARENOSO |
| E-632691 | P3 | 1134750 | 655540 | 3.34 | 3.96 | 4.81 | 10 | ARENA CON GRAVA |
| E-632791 | P1 | 1133076 | 658011 | 6.91 | 8.2 | 9.96 | 4 | ARENA LIMOSA |
| E-634891 | P1 | 1133601 | 652785 | 3.1 | 3.68 | 4.47 | 10 | ARENA MEDIA |
| E-637291 | P3 | 1131796 | 651926 | 2.36 | 2.8 | 3.4 | 11 | LIMO ARENOSO |
| E-637291 | P4 | 1131767 | 651901 | 4.31 | 5.11 | 6.21 | 10 | LIMO ARCILLOSO |
| E-739992 | P3 | 1134087 | 654895 | 1.36 | 1.61 | 1.96 | 15 | ARENA MEDIA |

| ID | # | Norte | Este | Mw 7.5 | Mw 7 | Mw 6.5 | Profundidad del Estrato (m) | TIPO DE SUELO |
|------------|----|---------|--------|-----------|---------|-----------|-----------------------------|----------------------|
| E-739992 | P4 | 1134087 | 654895 | 2.89 | 3.43 | 4.17 | 15 | ARENA MEDIA |
| E-740192 | P1 | 1133732 | 650546 | 3.09 | 3.67 | 4.45 | 14 | LIMO CON CARACOLILLO |
| E-747092 | P2 | 1133198 | 655245 | 4.38 | 5.19 | 6.31 | 10 | ARENA |
| E-849883 | P3 | 1132338 | 654979 | 2.89 | 3.43 | 4.17 | 15 | LIMO ARENOSO |
| E-849893 | P5 | 1132403 | 655006 | 3.45 | 4.09 | 4.96 | 15 | ARENA MEDIA |
| E-852293 | P1 | 1131215 | 653406 | 2.36 | 2.8 | 3.4 | 6 | ARENA CON GRAVA |
| E-853093 | P3 | 1130259 | 656644 | 2.36 | 2.8 | 3.4 | 0.5 | RELLENO |
| E-958894 | P1 | 1132550 | 652410 | 3.23 | 3.84 | 4.66 | 10 | ARENA LIMOSA |
| E-1068695 | P2 | 1133330 | 652570 | 4.7 | 5.57 | 6.77 | 15 | ARENA LIMOSA |
| E-1069195 | P1 | 1132939 | 653811 | 8.47 | 10.05 | 12.21 | 15 | ARENA LIMOSA |
| E-1069395 | P1 | 1134170 | 654900 | 5.9 | 7 | 8.5 | 11 | ARENA LIMOSA |
| E-1072495 | P1 | 1131090 | 652170 | 0.99 | 1.18 | 1.43 | 5 | ARENA LIMOSA |
| E-1178096 | P1 | 1129973 | 654941 | 0.59 | 0.7 | 0.85 | 20 | ARENA CON GRAVA |
| E-1178096 | P3 | 1130016 | 654966 | 3.65 | 4.33 | 5.25 | 20 | ARENA LIMOSA |
| E-1180496 | P2 | 1131004 | 651757 | 3.48 | 4.13 | 5.02 | 12 | LIMO INORGANICO |
| E-1180496 | P1 | 1131027 | 651749 | 3.36 | 3.99 | 4.85 | 11 | ARCILLA INORGANICA |
| E-1188797 | P1 | 1132288 | 653041 | 2.36 | 2.8 | 3.4 | 1 | LIMO ARENOSO |
| E-1283797 | P2 | 1131721 | 650699 | 5.4 | 6.41 | 7.79 | 10 | ARENA LIMOSA |
| E-1284597 | P1 | 1129888 | 656446 | 1.78 | 2.11 | 2.57 | 12 | ARENA MEDIA |
| E-1285197 | P3 | 1135172 | 656077 | 7.67 | 9.1 | 11.05 | 15 | ARENA MEDIA |
| E-1287297 | P1 | 1134941 | 651769 | 2.51 | 2.98 | 3.62 | 10 | ARENA LIMOSA |
| E-1289497 | P1 | 1135486 | 654640 | 4.48 | 5.32 | 6.46 | 15 | ARENA MEDIA |
| E-1290397 | P1 | 1131538 | 651863 | 3.78 | 4.48 | 5.44 | 10 | ARCILLA INORGANICA |
| E-1290597 | P2 | 1132483 | 652960 | 3.66 | 4.34 | 5.27 | 9 | ARENA LIMOSA |
| E-1394598 | P1 | 1132523 | 651307 | 4.01 | 4.76 | 5.78 | 6 | ARENA LIMOSA |
| E-1394698 | P1 | 1137275 | 651332 | 2.83 | 3.36 | 4.08 | 7 | ARENA MEDIA |
| E-1398098 | P1 | 1130905 | 651966 | 2.24 | 2.66 | 3.23 | 14 | ARENA LIMOSA |
| E-13100798 | P1 | 1132363 | 658405 | 2.71 | 3.22 | 3.91 | 17 | LIMO ARENOSO |
| E-13100898 | P1 | 1132931 | 652501 | 2.02 | 2.39 | 2.91 | 17 | ARENA MEDIA |
| E-14105499 | P3 | 1133776 | 655025 | 2.21 | 2.62 | 3.18 | 15 | ARENA LIMOSA |

| ID | # | Norte | Este | Mw 7.5 | Mw 7 | Mw 6.5 | Profundidad del Estrato (m) | TIPO DE SUELO |
|------------|-----|---------|--------|-----------|---------|-----------|-----------------------------|----------------------|
| E-15111000 | P1 | 1132447 | 652544 | 4.17 | 4.94 | 6 | 10 | ARENA MEDIA A GRUESA |
| E-15114900 | P1 | 1132297 | 651655 | 4.37 | 5.18 | 6.29 | 10 | LIMO ARENOSO |
| E-15115500 | P2 | 1134547 | 653686 | 2.82 | 3.35 | 4.06 | 10 | ARENA MEDIA A GRUESA |
| E-15119300 | P3 | 1133355 | 653912 | 2.36 | 2.8 | 3.4 | 10 | ARENA MEDIA A GRUESA |
| E-15120100 | P1 | 1130122 | 655800 | 2.36 | 2.8 | 3.4 | 0.5 | RELLENO |
| E-15120100 | P3 | 1130174 | 655542 | 2.31 | 2.74 | 3.33 | 7 | ARENA LIMO-ARCILLOSA |
| E-16122801 | P1 | 1134387 | 647558 | 4.72 | 5.6 | 6.8 | 7 | ARENA LIMOSA |
| E-16125601 | P13 | 1134500 | 648720 | 4.48 | 5.32 | 6.46 | 5 | ARENA LIMOSA |
| E-16125801 | P1 | 1131457 | 654778 | 4.48 | 5.32 | 6.46 | 20 | ARENA LIMOSA |
| E-16125601 | P21 | 1134360 | 648000 | 5.78 | 6.86 | 8.33 | 5 | ARENA LIMOSA |
| E-17142302 | P2 | 1129875 | 654554 | 2.83 | 3.36 | 4.08 | 15 | ARENA LIMOSA |
| E-17135902 | P2 | 1130607 | 651632 | 3.27 | 3.88 | 4.71 | | LIMO ARENOSO |
| E-17139602 | P1 | 1131140 | 657370 | 6.42 | 7.62 | 9.25 | 8 | LIMO ARENOSO |
| E-17142302 | P2 | 1129875 | 654554 | 2.83 | 3.36 | 4.08 | 14 | ARENA LIMOSA |
| E-18147203 | P3 | 1132862 | 657534 | 2.18 | 2.59 | 3.15 | 15 | ARENA LIMOSA |
| E-18147903 | P1 | 1134339 | 652534 | 1.92 | 2.28 | 2.77 | 13 | ARENA LIMOSA |
| E-18147903 | P2 | 1134367 | 652508 | 2.6 | 3.08 | 3.74 | 10 | ARENA LIMOSA |
| E-21174906 | P2 | 1132287 | 651450 | 2.71 | 3.22 | 3.91 | 14 | ARENA LIMOSA |
| E-21177306 | P2 | 1130591 | 655937 | 2.12 | 2.52 | 3.06 | 10 | ARENA LIMOSA |
| E-21178606 | P1 | 1130463 | 653252 | 3.36 | 3.99 | 4.85 | 10 | LIMO ARCILLOSO |
| E-21178706 | P1 | 1130743 | 651939 | 2.36 | 2.8 | 3.4 | 17 | ARENA LIMOSA |
| E-21178706 | P2 | 1130763 | 651887 | 2.12 | 2.52 | 3.06 | 7 | ARENA LIMOSA |
| E-21179006 | P7 | 1130784 | 654339 | 3.19 | 3.78 | 4.59 | 8 | ARENA LIMOSA |
| E-21179006 | P8 | 1130880 | 654198 | 2.36 | 2.8 | 3.4 | 1 | RELLENO |
| E-21179006 | P9 | 1130864 | 654001 | 1.85 | 2.2 | 2.67 | 10 | ARENA LIMOSA |
| E-21181806 | P2 | 1131446 | 649955 | 2.89 | 3.43 | 4.17 | 20 | LIMO ARCILLOSO |
| E-851293 | P12 | 1130590 | 654300 | 2.36 | 2.8 | 3.4 | | ARCILLA INORGANICA |
| ES-25287 | P2 | 1132793 | 651889 | 5.07 | 6.02 | 7.31 | 6 | LIMO ARENOSO |
| ES-25387 | P1 | 1134536 | 654456 | 2.36 | 2.8 | 3.4 | 6 | ARENA |

| ID | # | Norte | Este | Mw 7.5 | Mw 7 | Mw 6.5 | Profundidad del Estrato (m) | TIPO DE SUELO |
|----------------|-----|---------|--------|-----------|---------|-----------|-----------------------------|----------------------|
| ES-28987 | P2 | 1133364 | 652933 | 2.36 | 2.8 | 3.4 | 0.5 | ARENA LIMOSA |
| INGEO-12185 | P1 | 1133082 | 654212 | 6.61 | 7.84 | 9.52 | 11 | LIMO ARENOSO |
| LES-106/84 | P1 | 1132205 | 654995 | 2.09 | 2.48 | 3.01 | 14 | ARENA CON GRAVA |
| DIQUE LA PUNTA | P3 | 1129338 | 653877 | 1.94 | 2.3 | 2.79 | 10 | ARENA LIMOSA |
| DIQUE LA PUNTA | P7 | 1128979 | 653814 | 1.98 | 2.35 | 2.86 | 10 | ARENA LIMOSA |
| DIQUE LA PUNTA | P9 | 1128900 | 653806 | 1.86 | 2.21 | 2.69 | 10 | ARENA LIMOSA |
| DIQUE LA PUNTA | P11 | 1128785 | 653779 | 2.27 | 2.69 | 3.26 | 7 | ARENA LIMOSA |
| DIQUE LA PUNTA | P5 | 1129100 | 653853 | 2.12 | 2.52 | 3.06 | 10 | ARENA LIMOSA |
| DIQUE LA PUNTA | P1 | 1129567 | 653918 | 1.23 | 1.46 | 1.77 | 10 | ARENA LIMOSA |
| E-423589 | P1 | 1131322 | 650782 | 4.48 | 5.32 | 6.46 | 10 | CARACOLILLO |
| E-314388 | P3 | 1131826 | 650060 | 3.54 | 4.2 | 5.1 | 15 | LIMO ARENOSO |
| E-16132701 | P1 | 1132193 | 648964 | 3.46 | 4.1 | 4.98 | 6 | ARENA LIMOSA |
| E-964394 | P2 | 1133150 | 650500 | 4.51 | 5.35 | 6.49 | 7 | ARENA LIMOSA |
| E-17142002 | P1 | 1132749 | 650517 | 5.04 | 5.98 | 7.26 | 5 | ARENA LIMOSA |
| E-422689 | P1 | 1134546 | 649686 | 3.66 | 4.34 | 5.27 | 12 | LIMO ARCILLOSO |
| E-637591 | P2 | 1134054 | 650878 | 3.49 | 4.14 | 5.03 | 11 | ARCILLA |
| E-17143102 | P1 | 1134572 | 650606 | 2.74 | 3.25 | 3.94 | 15 | ARCILLA |
| E-20166705 | P1 | 1134697 | 650711 | 2.57 | 3.05 | 3.71 | 10 | ARENA LIMOSA |
| E-19159004 | P1 | 1134422 | 649257 | 2.83 | 3.36 | 4.08 | 7 | ARENA LIMOSA |
| E-857793 | P1 | 1133433 | 652152 | 7.71 | 9.14 | 11.1 | 9 | LIMO ARCILLOSO |
| E-20172905 | P2 | 1133436 | 651894 | 2.91 | 3.46 | 4.2 | 8 | ARENA LIMOSA |
| E-1393398 | P2 | 1133257 | 655584 | 2.82 | 3.35 | 4.06 | 12 | ARENA LIMOSA |
| E-1392698 | P2 | 1132940 | 655990 | 4.72 | 5.6 | 6.8 | 4 | ARENA LIMOSA |
| E-1398298 | P1 | 1133002 | 655684 | 2.86 | 3.39 | 4.11 | 15 | ARENA MEDIA A GRUESA |
| E-16131101 | P2 | 1132918 | 656136 | 2.3 | 2.73 | 3.32 | 10 | ARENA LIMOSA |
| E-17137802 | P1 | 1133290 | 656287 | 2.56 | 3.04 | 3.69 | 10 | ARENA LIMOSA |
| E-18144803 | P1 | 1132412 | 656459 | 4.47 | 5.31 | 6.44 | 10 | LIMO ARENOSO |

| ID | # | Norte | Este | Mw 7.5 | Mw 7 | Mw 6.5 | Profundidad del Estrato (m) | TIPO DE SUELO |
|------------|----------|--------------|-------------|-------------------|-----------------|-------------------|------------------------------------|----------------------|
| E-20162705 | P1 | 1133271 | 656788 | 2.48 | 2.94 | 3.57 | 15 | ARENA LIMOSA |
| E-1286697 | P1 | 1133095 | 651740 | 6.1 | 7.24 | 8.79 | 7 | ARENA LIMOSA |
| E-17138002 | P2 | 1133764 | 652041 | 3.62 | 4.3 | 5.22 | 10 | LIMO ARCILLOSO |
| E-1073995 | P2 | 1132610 | 653650 | 5.23 | 6.2 | 7.53 | | ARENA LIMOSA |
| E-16124501 | P1 | 1136450 | 656232 | 3.55 | 4.21 | 5.12 | 10 | ARENA CON GRAVA |
| E-1391298 | P1 | 1133282 | 653508 | 3.88 | 4.61 | 5.59 | 10 | ARENA MEDIA |

Tabla A.2. Modelo de hoja de cálculo de Vs30 por metodologías NSPT-VS.

| ID | Perforacion | Norte | Este | SPT promedio | Vs (m/s) Campos | Vs(m/s) Imai & Yoshimura | Vs (m/s) Ohta & Goto | Vs (m/s) medio | Espesor h (m) | Espesor proyectado (30m) | hi/Vsi (s) | Sumatoria (hi/Vsi) | Vs30 (m/s) |
|----------------------------|-------------|--------------|------------|--------------|--------------------|--------------------------------|-------------------------|-------------------|------------------|--------------------------------|------------|-----------------------|---------------|
| LES-117/84 | P2 | 1.133.791,70 | 653.567,00 | 5,000 | 185 | 155 | 107 | 149 | 1,0 | 1,0 | 0,0067115 | 0,089312 | 336 |
| | | | | 13,750 | 274 | 220 | 215 | 236 | 4,0 | 4,0 | 0,0169454 | | |
| | | | | 26,750 | 355 | 275 | 299 | 310 | 3,0 | 3,0 | 0,0096868 | | |
| | | | | 19,500 | 314 | 247 | 282 | 281 | 2,0 | 2,0 | 0,0071189 | | |
| | | | | 17,000 | 298 | 236 | 280 | 271 | 2,0 | 2,0 | 0,0073771 | | |
| | | | | 17,000 | 298 | 236 | 285 | 273 | 1,0 | 1,0 | 0,0036662 | | |
| | | | | 37,000 | 403 | 308 | 377 | 363 | 1,0 | 1,0 | 0,0027581 | | |
| | | | | 55,330 | 471 | 353 | 452 | 425 | 3,0 | 3,0 | 0,0070553 | | |
| | | | | 53,000 | 463 | 348 | 451 | 421 | 1,0 | 1,0 | 0,0023777 | | |
| | | | | 65,000 | 502 | 373 | 489 | 454 | 1,0 | 1,0 | 0,0022004 | | |
| 70,500 | 518 | 383 | 508 | 470 | 1,0 | 11,0 | 0,0234146 | | | | | | |
| LES-116/84 | P1 | 1.134.740,00 | 654.370,00 | 2,000 | 129 | 114 | 78 | 107 | 1,0 | 1,0 | 0,00934 | 0,095523 | 314 |
| | | | | 13,330 | 271 | 217 | 221 | 236 | 5,0 | 5,0 | 0,0211568 | | |
| | | | | 54,667 | 469 | 351 | 391 | 404 | 3,0 | 3,0 | 0,0074294 | | |
| | | | | 39,000 | 411 | 313 | 371 | 365 | 3,0 | 3,0 | 0,0082142 | | |
| | | | | 37,000 | 403 | 308 | 383 | 364 | 3,0 | 18,0 | 0,049383 | | |
| LES-114/84 | P1 | 1.133.787,60 | 653.640,80 | 4,000 | 169 | 144 | 99 | 137 | 1,0 | 1,0 | 0,0072743 | 0,107119 | 280 |
| | | | | 5,330 | 190 | 159 | 139 | 162 | 2,0 | 2,0 | 0,0123144 | | |
| | | | | 20,500 | 320 | 252 | 246 | 273 | 2,0 | 2,0 | 0,0073387 | | |
| | | | | 17,500 | 301 | 238 | 251 | 263 | 2,0 | 2,0 | 0,0075927 | | |
| | | | | 27,250 | 358 | 277 | 316 | 317 | 3,0 | 23,0 | 0,0725988 | | |

