

"Caracterización geotécnica mediante la correlación geológica-geofísica de un área piloto para la planificación territorial de la ZEDE en la ESPOL. Guayaquil-Ecuador"

Karla Ayala-Cabrera¹, Bill Vera-Muentes¹, Fernando Morante-Carballo^{2,3,4}, Josué Briones-Bitar^{1,2}, Joselyne Solórzano^{1,2*} and Paúl Carrión-Mero^{1,2*}

¹ Facultad de Ingeniería Ciencias de la Tierra (FICT), ESPOL Polytechnic University, Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador; klayala@espol.edu.ec; bkvera@espol.edu.ec; briones@espol.edu.ec; josbasol@espol.edu.ec; pcarri@espol.edu.ec

² Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra, CIPAT, ESPOL Polytechnic University, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 Vía Perimetral, 09-01-5863 Guayaquil, Ecuador; fmorante@espol.edu.ec

³ ESPOL Polytechnic University, Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Geo-recursos y Aplicaciones (GIGA), Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador

⁴ ESPOL Polytechnic University, Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas (FCNM), Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador

* Correspondence: J.S.: josbasol@espol.edu.ec; P.C.-M.: pcarri@espol.edu.ec

Resumen: La Zona Especial de Desarrollo Económico (ZEDE) es una zona franca con una superficie de 133ha ubicada en la Universidad Politécnica ESPOL en Guayaquil-Ecuador, con fuertes pendientes y un denso bosque seco. Esta zona tiene el propósito de crear parcelas para industrias con la sustentabilidad como su enfoque principal. Debido a la limitada información sobre las propiedades geotécnicas del suelo, la ZEDE necesita invertir en una campaña de exploración de suelos para satisfacer los intereses de sus clientes. Este estudio tiene como objetivo analizar el perfil del suelo con prospección geotécnica y geofísica para la factibilidad de la construcción de varios edificios para regiones que tienen características geotécnicas no especificadas. La metodología utilizada siguió estas fases: (i) Investigación de información de línea de base e inspección del sitio; (ii) Caracterización geotécnica y correlación de resultados; (iii) Parámetros de diseño del desarrollo del edificio. La caracterización geotécnica realizada ha permitido la zonificación del área, considerando las susceptibilidades que denotan y diferencian las zonas más cercanas al lago con suelos aptos y afloramientos rocosos como tobas lapilli y lutitas tobáceas. Con la geofísica de la refracción sísmica se hizo un análisis que conjuga la sismicidad de la zona con las propiedades materiales del suelo. El estudio permite consideraciones de ingeniería para el óptimo diseño y construcción de la infraestructura.

Palabras clave: Caracterización geotécnica; refracción sísmica; geoelectrico; Estabilidad de taludes

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introducción

La geotecnia es importante en la ingeniería porque previene daños antes de que ocurran [1]. Sin la aplicación de la ingeniería geotécnica, las obras civiles colapsarían ante sismos [2], fallas de taludes [3] o asentamientos excesivos [4,5]. Estos factores influyen directamente en la vida útil de las estructuras [6–9]. La caracterización del subsuelo contribuye a la seguridad de las personas durante y después del proceso constructivo [10–14] y advierte de los lugares donde es posible la excavación considerando los impactos ambientales [15–17].

La caracterización geotécnica determina las capacidades geomecánicas del suelo difíciles de precisar en inspecciones de campo [18,19]. Los estudios geotécnicos son imprescindibles para el desarrollo urbano y para el cumplimiento de las normativas vigentes [20–23].

En la actualidad y a nivel global, la geofísica brinda información valiosa sobre las propiedades físicas del suelo y disminuyen la ambigüedad de los modelos geológicos [24–26]. Una caracterización geofísica acertada requiere del entendimiento de las ventajas y limitaciones de los métodos utilizados [27,28].

Las limitaciones de los ensayos geotécnicos relacionados a los costos y tiempos de ejecución promueven la implementación de la geofísica dentro de las exploraciones del subsuelo [29–31]. Las técnicas geofísicas no son invasivas, permiten alcanzar zonas de difícil acceso, incrementar la extensión de la zona de estudio, detectar aguas subterráneas y estructuras geológicas [32,33]. Estos métodos ofrecen resultados inmediatos y facilitan una visión general para la determinación de las ubicaciones de las perforaciones [34–36].

La correlación de la investigación geofísica y geotécnica amplía el alcance de la evaluación de las propiedades del suelo [37]. Las variaciones o anomalías de los parámetros geofísicos medidos sugieren la existencia de materiales de distinta composición y naturaleza [38]. La relación entre los parámetros geofísicos y las propiedades físicas del suelo restringe la elección del método geofísico aplicado [39].

En Santiago, Cuba correlacionaron la sísmica de refracción y geoelectrica con los resultados de la litología de cortes geológicos existentes al noroeste de la ciudad. Posteriormente, se estableció la existencia de arcillas hacia el sureste y tobas fracturadas al noroeste, coincidiendo con las correlaciones [40]. Otro caso de estudio, en una zona minera de Zaruma, Ecuador implicó la correlación entre datos de Sondeos Eléctricos Verticales (VES) y calicatas. El conocimiento de estas propiedades permitió elaborar un mapa de susceptibilidad al deslizamiento de la zona de estudio y analizar la estabilidad de taludes socavados [41].

Las zonas francas son áreas geográficas de un país, sometidas a controles aduaneros, donde se permite la instalación de empresas que destinen su producción o servicios a mercados externos [42]. Estas zonas son supervisadas independientes, integradas por puertos o áreas terrestres y poseen el más alto nivel de logística de libre comercio con políticas preferenciales [43]. La zona libre de Panamá es reconocida internacionalmente por no cobrar impuestos en ganancias de reexportación, aranceles, facturación, ni en servicios de exportación/importación [44].

En Ecuador, la zona franca de Quito dispone de parcelas y se desarrolló en conjunto con la academia para tener estudios de servicios e infraestructura básica [45]. La zona franca de universidad ESPOL (Guayas) fue inaugurada el 18 de abril de 2017 [46], esta se categoriza como una Zona Especial de Desarrollo Económico (ZEDE), la cual está exenta de impuestos. Una de las primeras fases de desarrollo de la zona franca comprende estudios de topografía y caracterización geotécnica, para propiciar la llegada de empresas e infraestructura necesaria para la promoción y desarrollo sostenible de este territorio.

Mediante la correlación de datos geofísicos y geotécnicos existentes y obtenidos de ensayos de campo ¿Cómo se puede analizar eficientemente un terreno con información geofísica y de campo para una caracterización geotécnica que permita la planificación territorial? Para responder esta interrogante, se plantea el siguiente objetivo: Caracterizar geotécnicamente un área piloto de la ZEDE, a través de la correlación de información geofísica y geotécnica para el análisis geomecánico integral.

2. Zona de estudio y contexto geológico

ZEDE está en el noroeste de la ciudad de Guayaquil, región Costa del Ecuador. El área de estudio se definió considerando los sitios más adecuados para la construcción civil y su extensión es de 281.495,24 m² (Fig. 1). Estudios geomorfológicos previos corroboran

cambios de elevación de aproximadamente 30 metros, con pendientes de las laderas, de aproximadamente 14 a 25 grados [47]. La zona es clasificada ecológicamente como un bosque tropical seco, de acuerdo con el sistema de zonas de vida de Holdridge (1982) [48].

Según la hoja geológica de Guayaquil (Hoja 33, CT – NV – A) – escala 1:100.000, la zona de estudio pertenece a la formación Cayo de la cordillera Chongón – Colonche. Esta formación está constituida principalmente por sedimentos marinos y volcánicos plásticos, intercalaciones de lutitas tobáceas, aglomerados, y areniscas de grano fino a medio [49]. La geología local muestra la existencia de depósitos aluviales, secuencia de tobas, lutita tobácea y toba lapilli (Fig. 1)

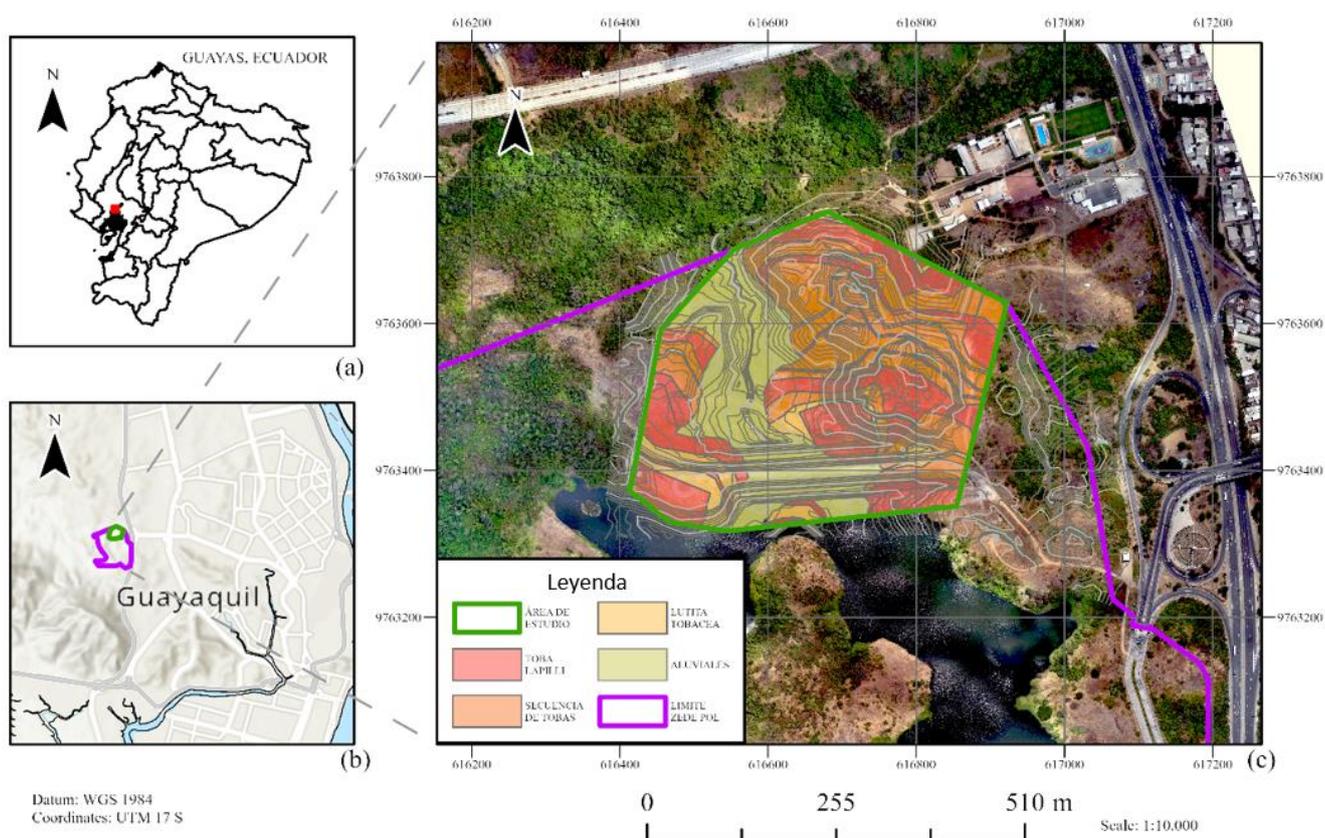


Figura 1. (a) Mapa geopolítico del Ecuador (b) Ubicación del área de estudio (c) Mapa geológico [50,51].

3. Materiales y Métodos

La metodología consistió en el desarrollo de tres fases (Fig. 2): (i) Investigación de información de línea de base en la zona de interés e inspección in situ; (ii) Caracterización geotécnica del suelo y correlación de resultados y, (iii) Parámetros de diseño para el desarrollo de edificaciones e interpretación de resultados.

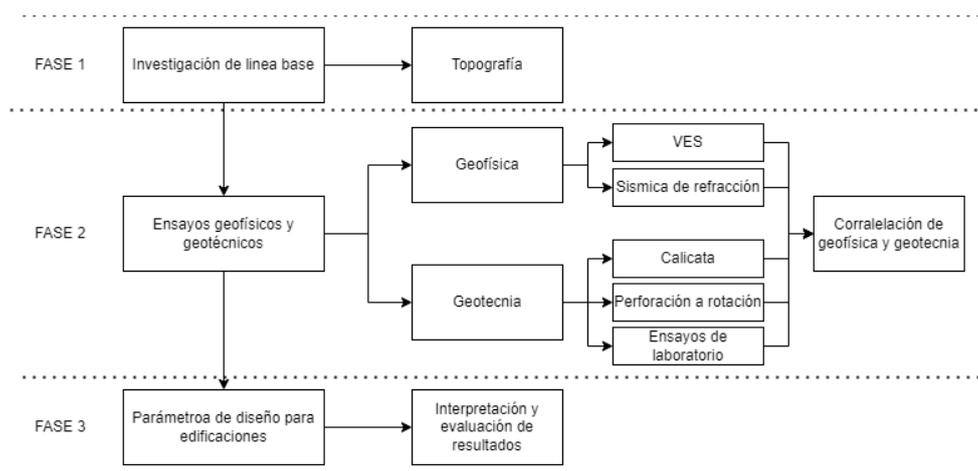


Figura 2. Esquema metodológico de la investigación

3.1 Fase 1: Investigación de información de línea de base en la zona de interés e inspección in situ

Esta fase contempló la base de estudios y reportes pertenecientes al departamento de gerencia de infraestructura física en la ESPOL. También información relevante sobre 8 calicatas y 4 Sondeos Eléctricos Vertical (VES's) [52]. Para el análisis del entorno de la zona de estudio, se procesó información de topografías cercanas al sitio de estudio para visualización de la geomorfología general de la zona y su incidencia con el área de estudio [47]. La geología recurrente de la región se determinó por medio de un mapa y perfiles geológicos [49]. También se realizaron inspecciones generales para verificar la información obtenida.

3.1.1 Levantamiento topográfico

El levantamiento topográfico del área de estudio partió de un hito georreferenciado preexistente [53]. Para ello, se utilizó el sistema GPS-RTK (Global Positioning System-Real Time Kinematic) y una estación total SOKKIA FX 150. Posteriormente, se identificaron las posibles zonas de acceso mediante la ortofotografía (Detalle en la fig. 3 en el apartado 2)

3.2 Fase 2: Caracterización geotécnica del suelo y correlación de resultados

A partir del mapa geológico de la zona de estudio se determinaron los materiales de interés: depósitos aluviales, secuencias de tobas, lutitas tobáceas y tobas lapilli (Fig. 1). Para comprobar la información geológica, se realizaron 2 VES's, 3 líneas sísmicas, 2 calicatas y 4 perforaciones (Fig. 3). La cantidad y ubicación de los ensayos también dependieron de las condiciones topográficas del terreno, priorizando los sitios con menor información disponible y aptos para la construcción de edificaciones.

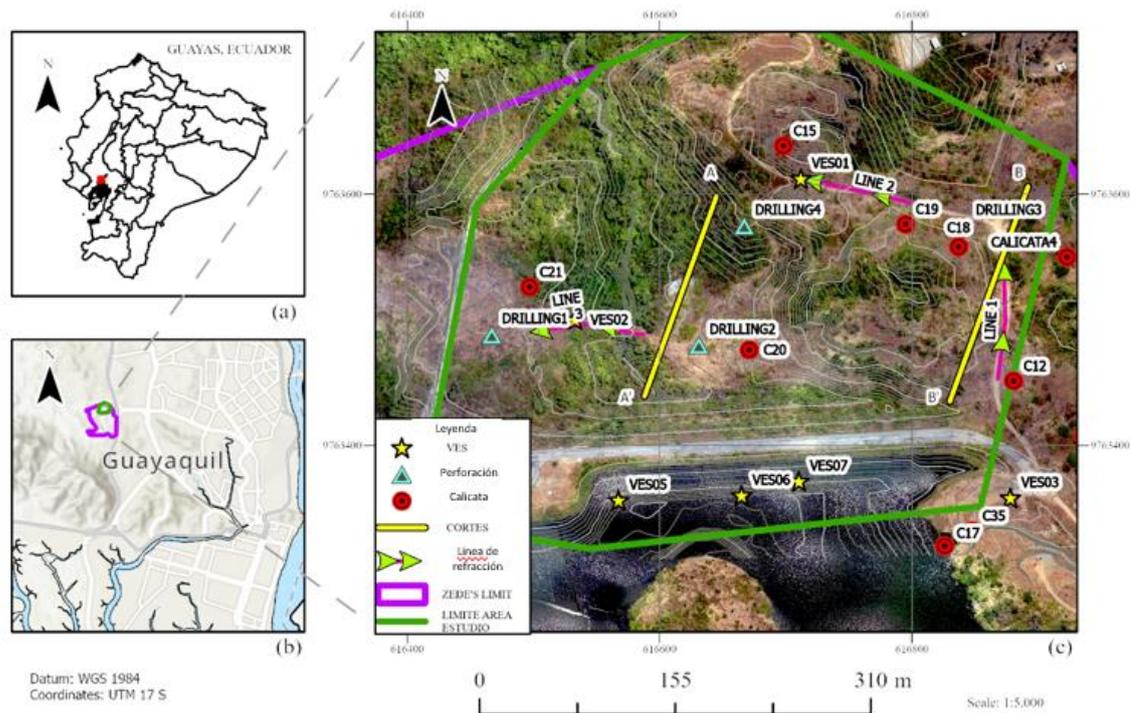


Figura 3. (a) Mapa geopolítico de Ecuador, (b) Área de ubicación (c) Ubicación de ensayos geofísicos y geotécnicos

3.2.1 Ensayos geofísicos

Los sondeos eléctricos verticales permitieron detectar la variación de la resistividad en función de la profundidad y analizar la estructura del subsuelo [54]. En este procedimiento, se utilizó un Terrameter SAS 1000 y la configuración Schlumberger para separar los electrodos, con rangos AB/2 entre 1 y 100 m. Los resultados se procesaron con el software IPI2win 3.0.1 obteniendo modelos de resistividad eléctrica de varias capas. El tipo de material de cada capa se determinó mediante la interpretación manual de las resistividades [55].

La sísmica de refracción contempló 3 perfiles de 96 m de longitud (Fig. 3), la separación de los geófonos en cada línea sísmica fue de 4 m. La fuente de energía utilizada para producir las ondas sísmicas “P” fue un martillo de 8 kg y los registros sísmicos se obtuvieron con el sismógrafo Terraloc Pro 2. El procesamiento de los datos se hizo con el software IXREFRAX. Los estratos del suelo se definieron a partir de las anomalías detectadas en la velocidad de llegada de las ondas P (V_p). La litología se determinó empleando valores típicos de velocidades de onda correspondientes a diferentes tipos de materiales [56].

3.2.2 Ensayos geotécnicos: calicatas y perforaciones

Las perforaciones rotativas de rocas y calicatas se desarrollaron en los puntos cercanos a los VES para verificar la información obtenida de los métodos geofísicos empleados. Las muestras de roca se analizaron en laboratorio para determinar sus propiedades físico-mecánicas, como la resistencia a la compresión uniaxial (RCU), densidad, cohesión y ángulo de fricción interna de los materiales. Las muestras de suelo de las calicatas sirvieron para precisar sus propiedades físicas, como límites de Atterberg, análisis granulométrico, densidad seca máxima, contenido óptimo de humedad y el California Bearing Ratio (CBR).

3.2.3 Correlaciones geofísicas – geotécnicas

Las perforaciones y calicatas se proyectaron como columnas estratigráficas sobre los modelos de resistividad y los modelos de V_p . Las correlaciones directas entre estos modelos permitieron validar los valores de resistividad eléctrica y V_p de las secuencias litológicas [57].

3.3 Fase 3: Parámetros de diseño para el desarrollo de edificaciones

3.3.1 Espectro de respuesta en sitio y clasificación de perfil del suelo para el diseño sísmico según la norma ecuatoriana.

La Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015 (NEC-15) [58] define 6 tipos de perfil de suelo según la velocidad de onda de corte V_s , el número de golpes (N), la resistencia al corte no drenado (S_u), el contenido de humedad del suelo (W) y otros parámetros detallados en la tabla 1. En esta investigación, la V_s se aproximó con la relación $V_p/V_s \sim \sqrt{3}$ [59].

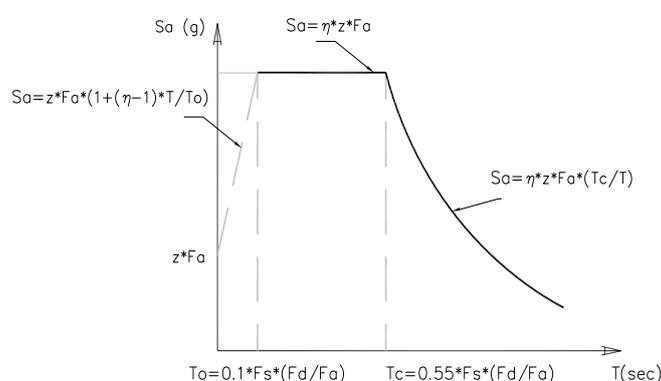


Figura 4. Espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño adaptado de NEC-15.

Donde,

η : Razón entre la aceleración espectral S_a ($T = 0.1$ s) y el PGA para el período de retorno seleccionado.

F_a : Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de periodo corto

F_d : Coeficiente de amplificación de suelo.

F_s : Coeficiente de amplificación de suelo.

S_a : Espectro de respuesta elástico de aceleraciones

T : Periodo fundamental de vibración de la estructura

T_0 : Periodo límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones

T_c : Periodo límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones

Z : Aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño

3.3.2 Capacidad de carga última de cimentaciones superficiales sobre roca

La capacidad de carga última se evaluó mediante la teoría de capacidad de carga de Terzaghi [60] para cimentaciones cuadradas, según la expresión 7:

$$q_u = 1.3C'N_c + qN_q + 0.4\gamma BN_\gamma \quad (7)$$

donde

N_c : Factor de capacidad de carga para sobrecarga

N_q : Factor de capacidad de carga para componente no cohesivo del suelo

N_γ : Factor de capacidad de carga por peso propio

Los factores de capacidad de carga utilizados se presentan en las ecuaciones 8-10 [61]:

$$N_c = 5 \tan^4 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (2)$$

212

$$N_q = \tan^6 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (3)$$

213

$$N_\gamma = N_q + 1 \quad (4)$$

Where: 214

Donde ϕ' = Ángulo de fricción de la roca. 215

216

3.3.3 Estabilidad de taludes y zonificación 217

218

Es importante considerar en la caracterización geotécnica que la geomorfología del lugar (Fig. 3) presenta pendientes pronunciadas en diferentes zonas. Para ello, se analizó la estabilidad natural de 8 perfiles de la zona de estudio. El factor de seguridad de cada talud se determinó utilizando el software Geostudio y el método de Bishop simplificado [62]. El análisis de estabilidad se realizó en condiciones estáticas y pseudoestáticas [63]. Bajo la condición pseudoestática, la carga sísmica se estimó como una fuerza horizontal de aceleración máxima en sitio (Sección 3.3) [64]. 219
220
221
222
223
224
225

La resistencia de los materiales se determinó en base al criterio de falla de Hoek-Brown [65], empleando los parámetros presentados en la sección 3.2.2. 226
227

Los FS obtenidos de los perfiles críticos se interpolaron con la herramienta de distancia inversa ponderada (IDW) del software ArcGIS Pro, generando un mapa de estabilidad natural [66]. Los valores obtenidos se clasificaron en 3 rangos y se compararon con los valores que exige la NEC-15. Posteriormente, la correlación de los datos de la geología (Fig. 1) y el FS permitieron obtener un mapa de zonas de menor riesgo para la construcción de edificaciones con la herramienta Raster Calculator de ArcGIS Pro. 228
229
230
231
232
233

4. Resultados 234

4.1 Sondeos eléctricos verticales 235

En las curvas de resistividad (Fig. 5 y 6), la línea azul representa el modelo 1D del sondeo eléctrico y la curva roja es el modelo calculado. En todos los casos, el valor del porcentaje de error de ajuste que se logró con el software IPI2win fue menor al 4% [67], por lo tanto, la coincidencia entre la curva de campo y la curva teórica de resistividad fue alta. Los modelos de los SEV mostraron entre 3 y 5 capas geoelectricas de resistividad con sus respectivos espesores (Fig. 5 y 6). Al ser un ambiente vulcano sedimentario, los perfiles predominantes fueron los de tobas lapilli y secuencias de tobas gruesas, tobas finas y lutitas tobáceas. El suelo superficial en ambos ensayos demostró un alto índice de resistividad, en el rango de los 7000 Ω .m, a diferencia de los estratos rocosos que presentaron resistividades inferiores a los 1000 Ω .m. 236
237
238
239
240
241
242
243
244
245

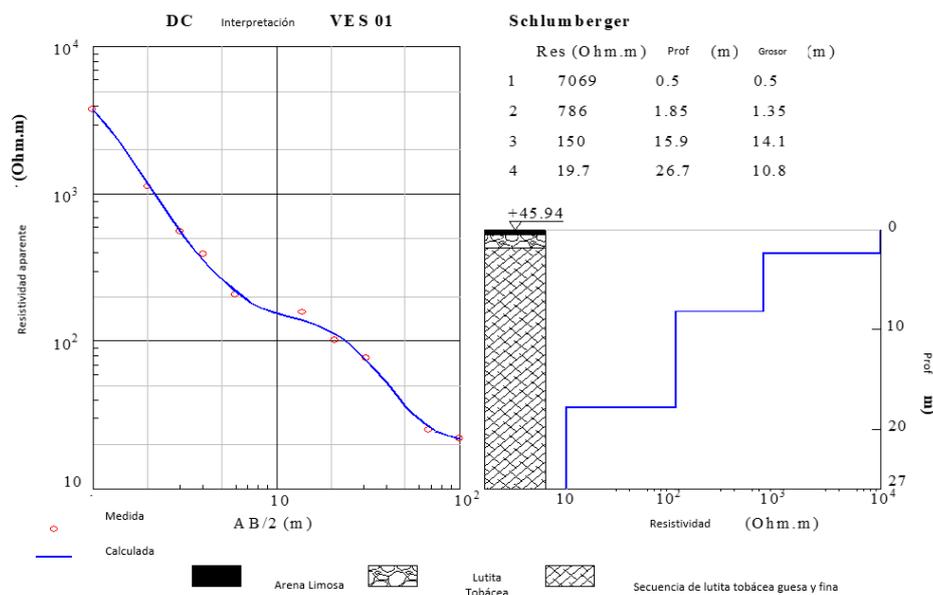


Figura 5. Modelo 1D de sondeo eléctrico SEV01.

246

247

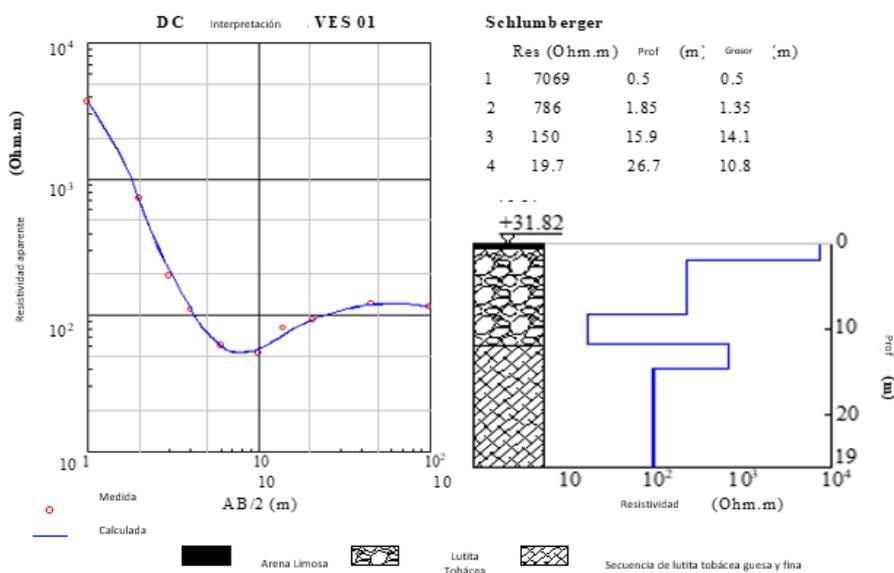


Figura 6. Modelo 1D de sondeo eléctrico SEV02.

248

249

4.2 Líneas de refracción sísmica

250

Los perfiles de refracción sísmica fueron correlacionados con los datos de perforaciones, calicatas y sondeos eléctricos. Para los 3 perfiles (Fig. 7, 8 y 9), se establecieron 2 capas predominantes y se las correlacionó con los datos de las unidades geológicas existentes (Fig. 1). El primer perfil se asoció con la toba lapilli con un Vp promedio de 650 m/s, mientras que el segundo estrato predominante, con una Vp promedio de 2300 m/s, se lo correlacionó con secuencias de tobas gruesas, tobas finas y lutitas tobáceas.

251

252

253

254

255

256

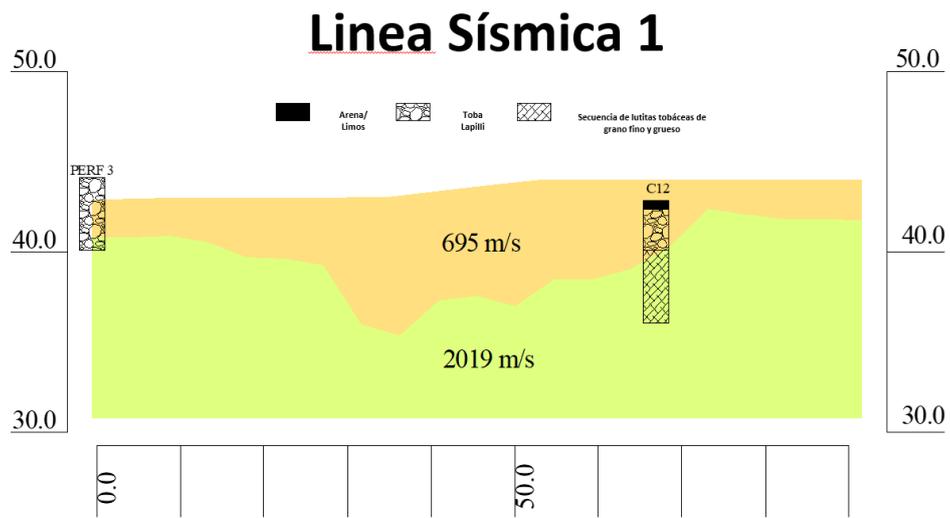


Figura 7. Correlación entre el modelo geosísmico 1, perforación 3 y calicata 12.

257
258

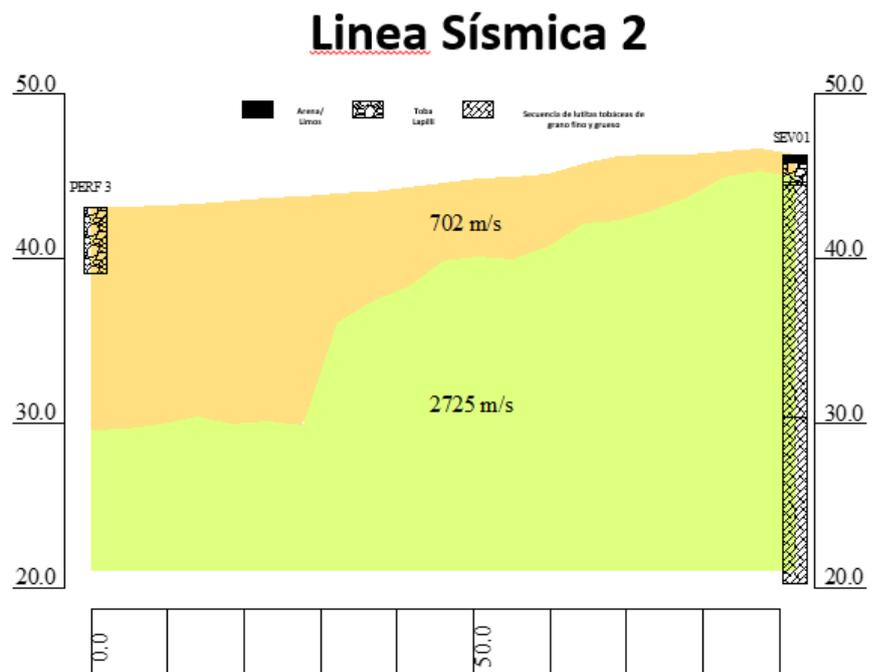


Figura 8. Correlación entre el modelo geosísmico 2, perforación 3 y SEV 01.

259
260
261

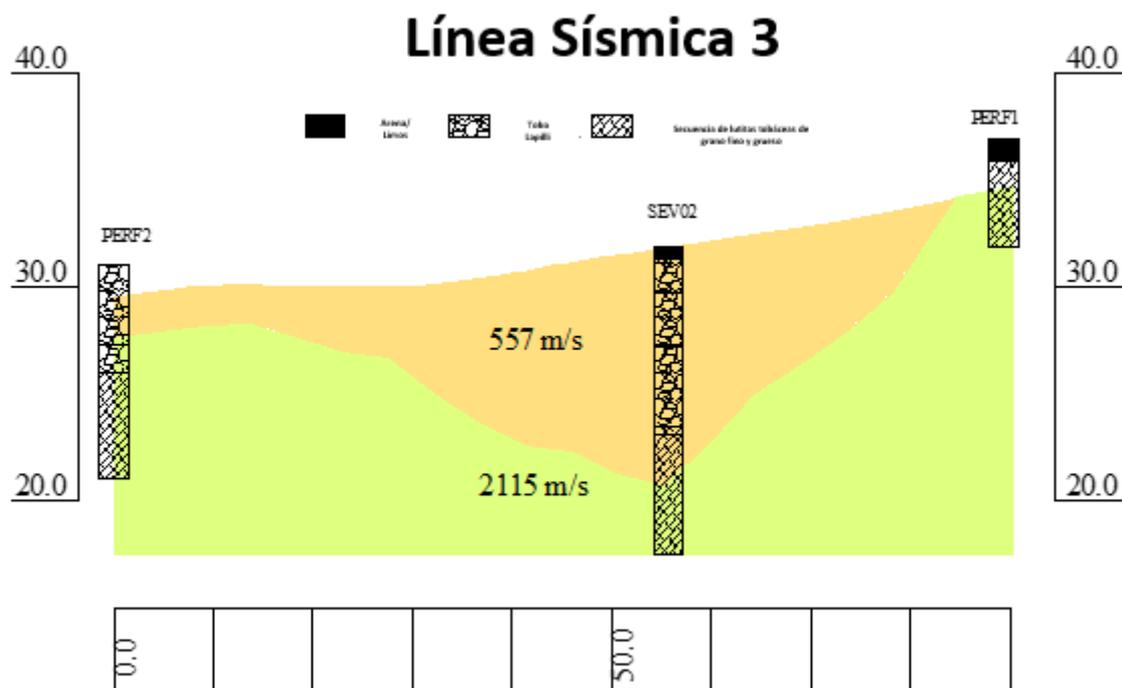


Figura 9. Correlación entre el modelo geosísmico 3, perforación 1, perforación 2 y SEV 02.

4.3 Caracterización geotécnica general de la zona de estudio

En la tabla 2 se resumen los resultados de las correlaciones geofísicas-geotécnicas, donde se indica que el suelo de la zona de estudio está conformado por grava - arena, toba lapilli y secuencias de tobas gruesas, tobas finas y lutitas tobáceas. La tabla 2 incluye parámetros geofísicos y propiedades físico mecánicas relevantes de los materiales detectados. Las tablas 2 -7 presentan las propiedades físicas y de ingeniería obtenidas de las perforaciones rotativas de rocas y calicatas realizadas en la investigación geotécnica.

4.4 Correlación geológica-geofísica

Los modelos de los SEV y sísmica de refracción se afinaron mediante las perforaciones a rotación. Se elaboraron dos cortes geológicos (Fig.10 y 11) con la información obtenida de las perforaciones, calicatas, geofísica y el recorrido de campo. Estos perfiles se realizaron para correlacionar los ensayos geofísicos y geotécnicos. En las secciones A-A' y B-B' de orientación NNE - SSW, se establecieron unidades geológicas de toba lapilli cuyo espesor máximo es de 10.22 m y secuencias de tobas gruesas, tobas finas y lutitas tobáceas de hasta 19.41 m de espesor.

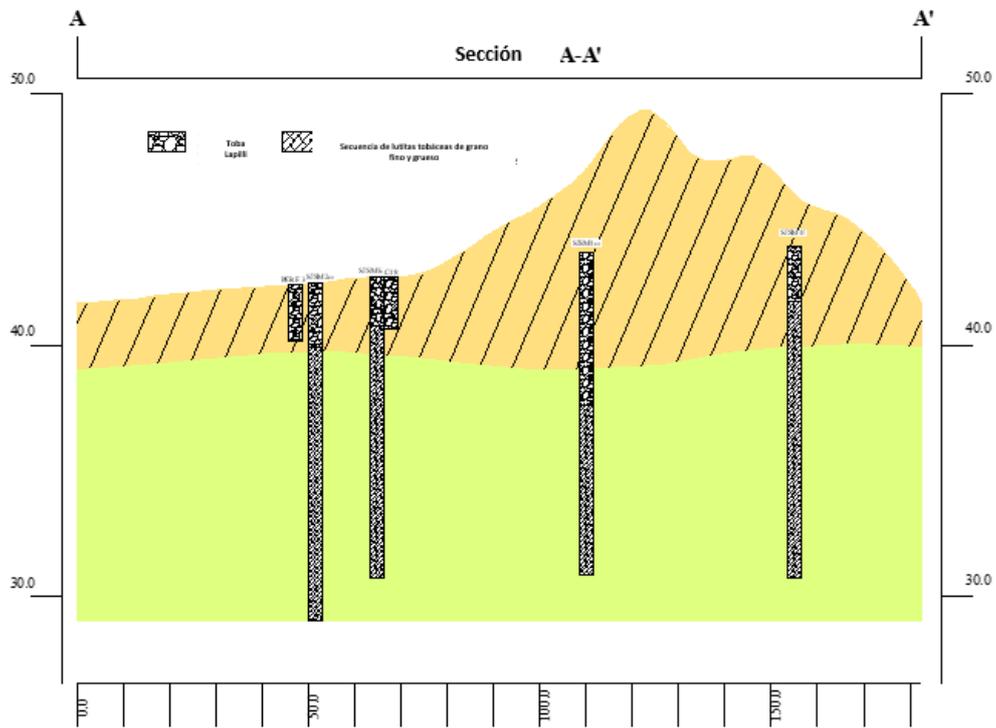


Figura 8. Corte geológico A-A'

279

280

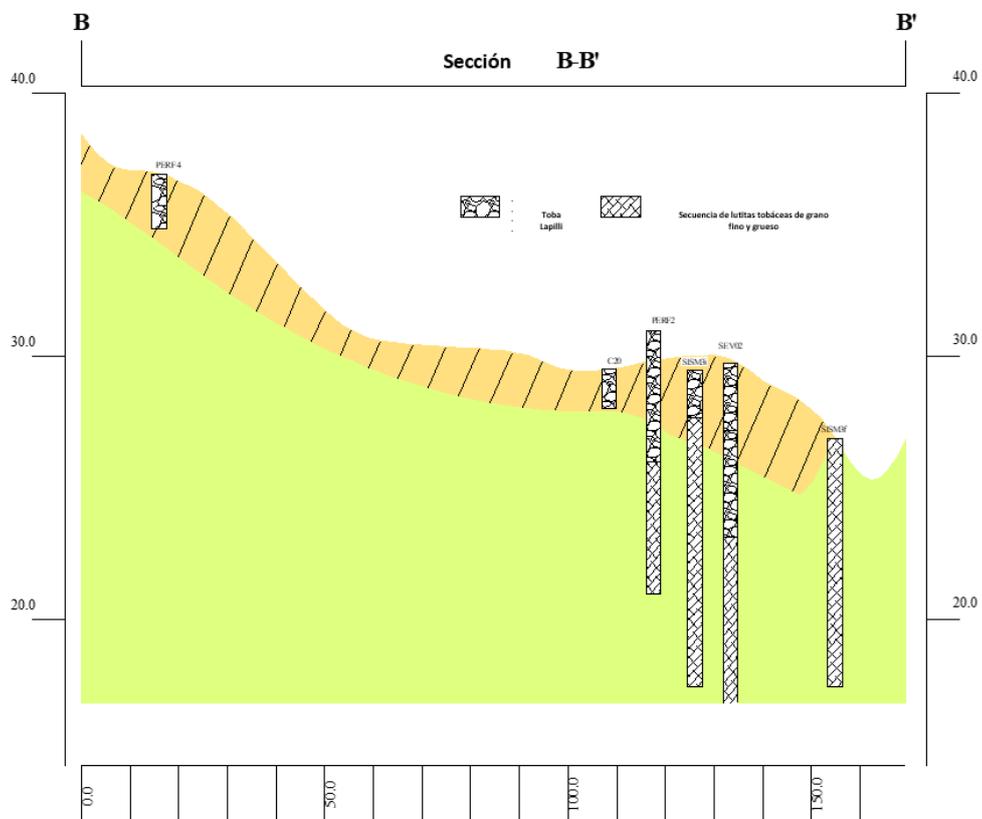


Figura 8. Corte geológico B-B'

281

282

4.5 Parámetros de diseño para el desarrollo de edificaciones

283

4.5.1 Tipo de suelo y espectro de respuesta en sitio según NEC-15.

Según NEC-15 la clasificación del perfil de suelo es tipo B, que corresponde a un perfil de roca de rigidez media. Con la metodología del apartado 3.3 y la Fig. 4 de la NEC-15, se graficó el espectro de respuesta en sitio (Ver figura 12). Debido a las restricciones municipales para campus universitarios, el cálculo del espectro consideró edificios de hasta 4 pisos. Esto permite que el riesgo ante sismos sea bajo al combinarlo con el perfil de suelo tipo B.

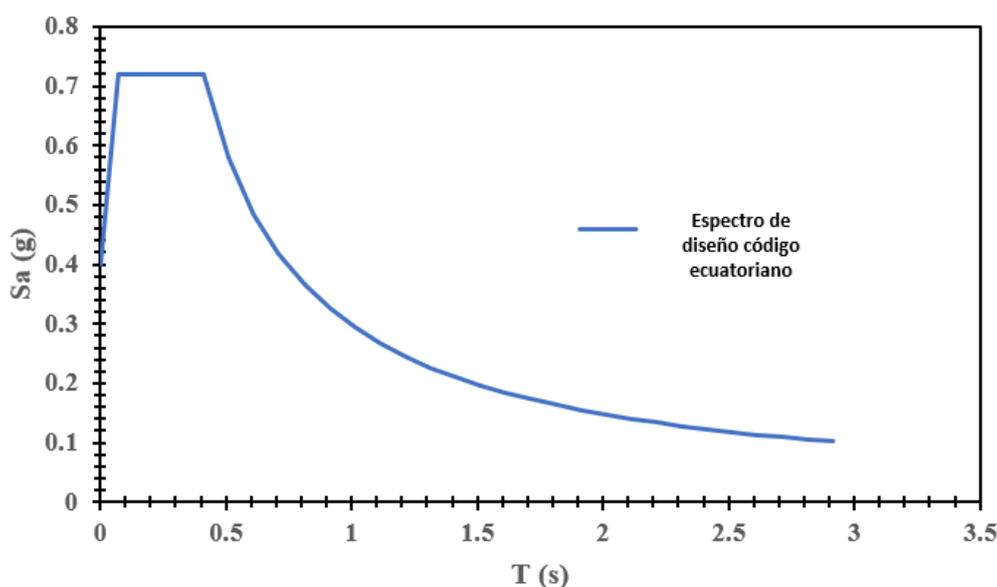


Figura 12. Diseño de espectro para el perfil de suelo tipo B, $Z=0.4$ g.

4.5.2 Estabilidad de taludes y zonificación de susceptibilidad al deslizamiento.

En este estudio se evaluó la estabilidad estática y sísmica de los perfiles de taludes más críticos (Fig. 13a). El mapa de estabilidad natural de la zona se generó utilizando los factores de seguridad indirectos mínimos de NEC-15. Los factores de seguridad pseudoestáticos (FS_{PS}) de cada perfil analizado se muestran en la figura 14. Los valores de FS en condiciones estáticas y pseudoestáticas se encuentran en la Tabla 11.

For the correlation, the weighted parameters determined the level of risk according to geology and the FS (Table 1). The geology presented a range of weighted values from 1-4, with the alluvial soil being the one with the highest risk in the face of seismic threat. due to its low undrained shear strength. Conversely, the material with the highest UCS was the tuffaceous shale found at the greatest depth. The zoning of the correlation between natural stability and geology made it possible to define three risk ranges for instability in the sector (Figura 13b).

Table 10. Parámetros de zona de estudio ponderados

Peso	FS	Peso	Adición	Riesgo
1	2.1-3.1	1	≤ 3	Alto
2	3.2-4.9	2	4	Medio
3	5-7.7	3	≥ 5	Low
4				

284

285

286

287

288

289

290

291

292

293

294

295

296

297

298

299

300

301

302

303

304

305

306

307

308

309

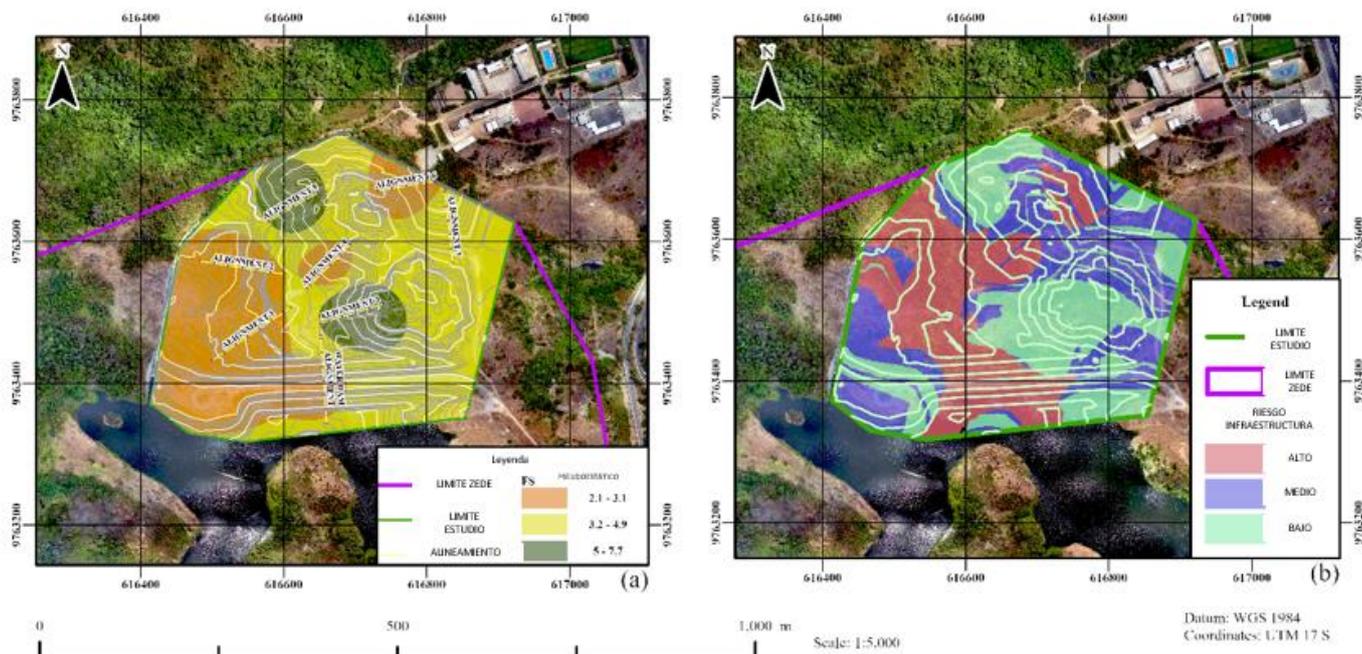
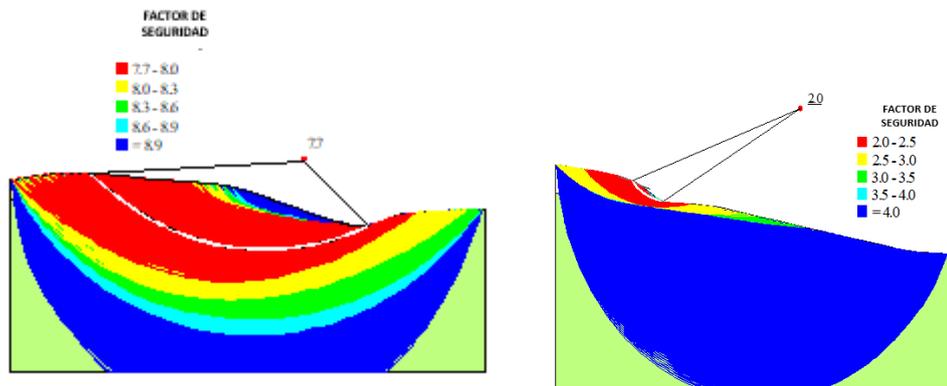


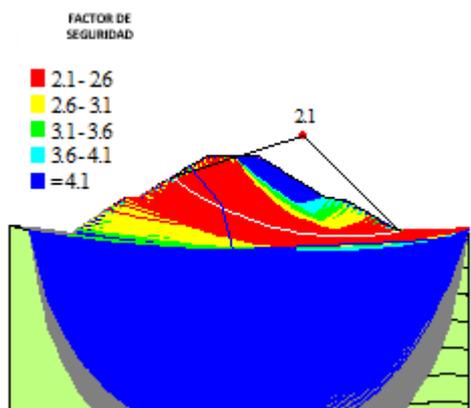
Figura 13. (a) Mapa de estabilidad natural según análisis de perfiles críticos (b) Zonificación de la relación de estabilidad natural y data geología-geofísica

310
311
312



(a) FS_{P01} (b) FS_{P06}

313



(c) FS_{P03}

Figura 14. Resultados of FS_{PS} . (a) P01; (b) P06; (c) P03

314
315
316
317

4.5.3 Capacidad de carga última del suelo

En esta sección se presenta un ejemplo de aplicación de los parámetros geotécnicos obtenidos en la investigación para calcular la capacidad portante del suelo. Se consideraron zapatas cuadradas de 1.3 m de ancho y 1 m de profundidad de cimentación. En la tabla 8 se muestran las propiedades físicas y de ingeniería utilizadas en el cálculo y los resultados de la capacidad de carga última se presentan en la tabla 9.

5. Discusión

La combinación de los métodos geofísicos y la investigación geotécnica permitieron que la caracterización del suelo de la zona de estudio sea más detallada. En el análisis, los valores de V_p y resistividad eléctrica se corroboraron al correlacionarse directamente con las columnas estratigráficas obtenidas de perforaciones y calicatas. Con ello, se determinó que la distribución de los materiales en función de la profundidad consiste en gravas-arenas, toba lapilli y secuencias de tobas gruesas, tobas finas y lutitas tobáceas. Las principales características geofísicas y geotécnicas de estos materiales se muestran en las tablas 2-7.

Las perforaciones 2, 3 y 4 mostraron toba lapilli de 0.5 a 5 m de profundidad, con rangos de V_p de 557 - 702 m/s y de resistividad eléctrica de 226 - 786 Ω .m. Esto coincide con los valores de V_p de 500 -1650 m/s y resistividades eléctricas de 576 - 25,000 Ω .m de diferentes tipos de tobas lapilli determinados por [68], en el estudio de sismica de refracción realizado en las Islas Canarias. [69] registraron resistividades de toba de 212 - 655 Ω .m y [70] presentó rangos de 20 - 268 Ω .m para distintas clases de tobas. Las perforaciones 1 y 2 evidenciaron secuencias de tobas gruesas, tobas finas y lutitas tobáceas. Las V_p de estos materiales oscila entre 2019 y 2725 m/s y los rangos de [resistividad](#) son de 9.7 a 150 Ω .m, ajustándose a la litología encontrada. A su vez, esto es consistente con los valores de V_p de 2100 a 2440 m/s correspondientes a tobas reportados por [71].

El promedio de la V_s en los 30 primeros metros del área de estudio es de 885 m/s y el perfil de suelo de la zona de estudio es tipo B según la NEC-15. Este perfil corresponde a roca de rigidez media, lo cual es consistente con los resultados de los ensayos de RCU. Las disposiciones municipales del sitio admiten la construcción de edificaciones de hasta 4 pisos. La carga estructural de un edificio de 4 pisos es de alrededor 0.04 MPa. La capacidad portante del suelo es de hasta 26.10 MPa, por lo tanto, soporta cargas estructurales más altas. Sin embargo, la construcción de otro tipo de estructuras requerirá análisis diferentes. Las laderas y el talud de la presa son estables y cumplen con las exigencias de la NEC-15.

El descubrimiento y la comprobación de los materiales existentes en el subsuelo de la zona de estudio son imprescindibles para determinar del grado de estabilidad de los terrenos y su capacidad para soportar diferentes cargas estructurales. Estas consideraciones sobre el suelo deben contemplarse adecuadamente siempre en los procesos de planificación territorial. De lo contrario, las estructuras podrían verse afectadas por la actividad sísmica, asentamientos y/o deslizamiento. Algunos casos destacados sobre esta problemática son la inclinación de la Torre de Pisa, el deslizamiento de rocas de la presa de Vajont y el hundimiento de un grupo de silos en Canadá en el año 2016 [72-74].

De este modo, se piensa que el conocimiento de las propiedades y clasificación del subsuelo de la zona de desarrollo económico del campus universitario, influirán en los criterios, propuestas de construcción y en la toma de decisiones sobre el ordenamiento territorial. Este tipo de consideraciones del subsuelo también aportarán en gran medida al desarrollo sostenible del sector.

Cabe señalar, que la zona de estudio es de aproximadamente el 12% del área total de ZEDE. Por ello, la metodología utilizada representa un estudio piloto referencial con características integrales, al incorporar la geofísica, geología, perforaciones y calicatas. No obstante, dependiendo del tipo de obra civil, debería profundizarse la investigación realizando estudios adicionales en los que se aumenten las exploraciones del suelo y las campañas geofísicas - geotécnicas. También es necesario un estudio hidrológico que constatare

la cota de inundación de la presa, para determinar la cota de excavación. Otro aspecto para abordar en futuras investigaciones es la planificación territorial y urbanística, para el ordenamiento del espacio según el tipo de industria y necesidades de la zona de estudio. De tal modo, que se abarquen todos los aspectos esenciales para el desarrollo de ZEDE.

6. Conclusiones

Se caracterizó mediante geología, geofísica y perforaciones las propiedades geomecánicas del terreno en base a correlaciones para establecer zonificaciones fiables de la capacidad portante del terreno donde se va a realizar la construcción. En consecuencia, se obtuvo que el subsuelo del área de estudio está constituido de gravas-arenas, toba lapilli y secuencias de tobas gruesas, tobas finas y lutitas tobáceas. Dicha información fue validada analizando los núcleos de roca y muestras de suelo de calicatas.

Las zonas más aptas para la construcción se definieron en base a los hallazgos sobre el tipo de materiales que conforman subsuelo y a la estabilidad natural de las laderas. Adicionalmente, se calcularon los parámetros necesarios para el desarrollo de edificaciones en ZEDE, como el espectro de respuesta en sitio, la capacidad de carga del suelo y el mapa de zonificación de susceptibilidad al deslizamiento.

La investigación presentó una metodología integral que incluye estudios geofísicos, geotécnicos y geológicos indispensables para el análisis de factibilidad de los proyectos de construcción. Con la metodología propuesta se obtuvo información más detallada en comparación con estudios geotécnicos convencionales. Además, representa una alternativa económica, práctica y de fiabilidad cuando la información de las perforaciones es limitada. Por lo tanto, esta metodología puede replicarse en cualquier proyecto de construcción. Es apropiado utilizar los resultados de esta investigación como referencia para estudios de características similares.

El aporte del trabajo fue establecer una caracterización geotécnica de un área piloto que representa el 12% (16 ha) del área total de ZEDE. La metodología se puede replicar, con procedimientos que correlacionen geología, geofísica y geotécnica para zonificar la estabilidad y el tipo de suelo. De tal forma, que estos aspectos se incluyan en las consideraciones de las obras a efectuarse, y que sirvan de referencia en el 88% del área restante. Este tipo de estudios son un requisito para cumplir la norma local para construcciones civiles, y que aseguran que la planificación territorial de ZEDE prevea cualquier contingencia en los diseños de la infraestructura.

Material suplementario: La siguiente información puede ser descargada en : www.mdpi.com/xxx/s1, Figura S1: title; Table S1: title; Video S1: title.

Contribución de autor: Conceptualization, K.A.-C., B.V.-M., F.M.-C., J.B.-B., J.S. and P.C.-M.; methodology, K.A.-C., B.V.-M., F.M.-C., J.B.-B., J.S. and P.C.-M.; software, K.A.-C., B.V.-M.; validation, K.A.-C., B.V.-M., F.M.-C., J.B.-B., J.S. and P.C.-M.; formal analysis, F.M.-C., J.B.-B., J.S. and P.C.-M.; investigation, F.M.-C., J.B.-B., J.S. and P.C.-M.; data curation, K.A.-C., B.V.-M.; writing—original draft preparation, K.A.-C., B.V.-M., F.M.-C., J.B.-B., J.S. and P.C.-M.; writing—review and editing, K.A.-C., B.V.-M., F.M.-C., J.B.-B., J.S. and P.C.-M.; supervision, P.C.-M. and F.M.-C.; project administration, P.C.-M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Financiamiento: La Escuela Politécnica del Litoral ESPOL financió este proyecto de investigación: “Geotechnical characterization through geological-geophysical correlation of a pilot area for territorial planning of the ZEDE in ESPOL. Guayaquil, Ecuador” with institutional code CIPAT-01-2018 and the physical infrastructure management department at ESPOL.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional: No aplica.

Declaración de consentimiento informado: No aplica.

Declaración de disponibilidad de información: No aplica.

Agradecimiento: agradecen a la maestría en geotecnia de la Universidad Politécnica ESPOI ya los integrantes del CIPAT por el apoyo brindado a lo largo de esta investigación

Conflictos de Interés: Lo autores no declaran conflicto de interés.

Referencias

1. Fang, H.-Y.; Daniels, J.L. *Introductory Geotechnical Engineering*; CRC Press, 2017; ISBN 1315274957. 422
2. Chu, Y.; Zhong, Y.; Shi, B.; Gong, Y. Experimental Study on Seismic Performance of Seismic-Damaged RC Frames Strengthened by Different Strengthening Methods. *Structures* **2022**, *41*, 1475–1487, doi:10.1016/j.istruc.2022.05.103. 423–425
3. Rahul, T.; Ramya Krishna, V.; Singh, P.N. Evaluation of Soil Bearing Capacity and Settlements of Soil for Various Hard Rock Depths for a 128 m High Commercial Building with Raft Foundation. *Mater Today Proc* **2022**, *51*, 2604–2607, doi:10.1016/j.matpr.2021.12.582. 426–428
4. Gobbi, S.; Santisi d'Avila, M.P.; Lenti, L.; Semblat, J.F.; Reiffsteck, P. Liquefaction Assessment of Silty Sands: Experimental Characterization and Numerical Calibration. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **2022**, *159*, doi:10.1016/j.soildyn.2022.107349. 429–431
5. Fatahi, B.; Tabatabaiefar, H.R.; Samali, B. Performance Based Assessment of Dynamic Soil-Structure Interaction Effects on Seismic Response of Building Frames. In *Proceedings of the Geotechnical Special Publication*; 2011; pp. 344–351. 432–434
6. Saha, S.; Dutta, D.; Karmakar, R.; Ray, D.P. Structure-Toxicity Relationship of Chloroacetanilide Herbicides: Relative Impact on Soil Microorganisms. *Environ Toxicol Pharmacol* **2012**, *34*, 307–314, doi:10.1016/j.etap.2012.04.014. 435–437
7. Sangirardi, M.; Amorosi, A.; de Felice, G. A Coupled Structural and Geotechnical Assessment of the Effects of a Landslide on an Ancient Monastery in Central Italy. *Eng Struct* **2020**, *225*, doi:10.1016/j.engstruct.2020.111249. 438–439
8. Shirzad-Ghaleoudkhani, N.; Mahsuli, M.; Ghahari, S.F.; Taciroglu, E. Bayesian Identification of Soil-Foundation Stiffness of Building Structures. *Struct Control Health Monit* **2018**, *25*, e2090, doi:https://doi.org/10.1002/stc.2090. 440–441
9. Ding, L.; Zhou, C.; Ye, X.; Luo, H.; Ni, Y.; Guo, P. Study on Real-Time Sensing and Early-Warning of Construction Safety Risk for Metro Crossing Passage under Yangtze River. *Tumu Gongcheng Xuebao/China Civil Engineering Journal* **2013**, *46*, 141–150. 442–444
10. Jia, J.; Xie, X.; Yang, K. Soil Microstructure Evolution and Macro Deformation Mechanism for Controlling Construction Disturbance in Shanghai Soft Soil. *J Shanghai Jiaotong Univ Sci* **2016**, *21*, 713–718, doi:10.1007/s12204-016-1785-1. 445–447
11. Zhang, J.-F.; Chen, J.-J.; Wang, J.-H.; Zhu, Y.-F. Prediction of Tunnel Displacement Induced by Adjacent Excavation in Soft Soil. *Tunnelling and Underground Space Technology* **2013**, *36*, 24–33, doi:10.1016/j.tust.2013.01.011. 448–449
12. Mei, Y.; Zhou, D.; Wang, X.; Zhao, L.; Shen, J.; Zhang, S.; Liu, Y. Deformation Law of the Diaphragm Wall during Deep Foundation Pit Construction on Lake and Sea Soft Soil in the Yangtze River Delta. *Advances in Civil Engineering* **2021**, *2021*, 6682921, doi:10.1155/2021/6682921. 450–452
13. Khan, M.S.; Park, J.; Seo, J. Geotechnical Property Modeling and Construction Safety Zoning Based on GIS and BIM Integration. *Applied Sciences* **2021**, *11*. 453–454
14. Chen, R.-P.; Li, J.; Kong, L.-G.; Tang, L.-J. Experimental Study on Face Instability of Shield Tunnel in Sand. *Tunnelling and Underground Space Technology* **2013**, *33*, 12–21, doi:10.1016/j.tust.2012.08.001. 455–456
15. Zhang, W.; Li, Y.; Wu, C.; Li, H.; Goh, A.T.C.; Liu, H. Prediction of Lining Response for Twin Tunnels Constructed in Anisotropic Clay Using Machine Learning Techniques. *Underground Space (China)* **2022**, *7*, 122–133, doi:10.1016/j.undsp.2020.02.007. 457–459

16. Hu, J.; Liu, Y.; Li, Y.; Yao, K. Artificial Ground Freezing In Tunnelling Through Aquifer Soil Layers: A Case Study in Nanjing Metro Line 2. *KSCE Journal of Civil Engineering* **2018**, *22*, 4136–4142, doi:10.1007/s12205-018-0049-z. 460
461
462
17. Sanchez, P.A.; Palm, C.A.; Buol, S.W. Fertility Capability Soil Classification: A Tool to Help Assess Soil Quality in the Tropics. *Geoderma* **2003**, *114*, 157–185, doi:https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00040-5. 463
464
18. Jong, S.C.; Ong, D.E.L.; Oh, E. State-of-the-Art Review of Geotechnical-Driven Artificial Intelligence Techniques in Underground Soil-Structure Interaction. *Tunnelling and Underground Space Technology* **2021**, *113*, doi:10.1016/j.tust.2021.103946. 465
466
467
19. Morante, F.; Aguilar, M.; Ramírez, G.; Blanco, R.; Carrión, P.; Briones, J.; Berrezueta, E. Evaluation of Slope Stability Considering the Preservation of the General Patrimonial Cemetery of Guayaquil, Ecuador. *Geosciences (Basel)* **2019**, *9*, 103, doi:10.3390/geosciences9030103. 468
469
470
20. Scarpelli, G.; Fruzzetti, V.M.E.; Ruggeri, P. The Design of Infrastructures in Stiff Jointed Clay Formations: A Step towards a Geological-Geotechnical Integrated Approach. *Eng Geol* **2022**, *304*, doi:10.1016/j.enggeo.2022.106681. 471
472
21. Shephard, C.J.; Vardanega, P.J.; Holcombe, E.A.; Michaelides, K. Analysis of Design Choices for a Slope Stability Scenario in the Humid Tropics. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability* **2018**, *171*, 37–52, doi:10.1680/jensu.16.00081. 473
474
475
22. Anbazhagan, P.; Prabhu, G.; Moustafa Sayed, S.R.; Arifi Al Nassir, S.; Aditya, P. Provisions for Geotechnical Aspects and Soil Classification in Indian Seismic Design Code Is-1893. *Disaster Advances* **2014**, *7*, 72–89. 476
477
23. Sieffert, J.-G.; Bay-Gress, Ch. Comparison of European Bearing Capacity Calculation Methods for Shallow Foundations. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering* **2000**, *143*, 65–74, doi:10.1680/geng.2000.143.2.65. 478
479
24. Liu, H.; Low, B.K. Reliability-Based Design of Tunnelling Problems and Insights for Eurocode 7. *Comput Geotech* **2018**, *97*, 42–51, doi:10.1016/j.compgeo.2017.12.005. 480
481
25. Fan, X.; Dufresne, A.; Whiteley, J.; Yunus, A.P.; Subramanian, S.S.; Okeke, C.A.U.; Pánek, T.; Hermanns, R.L.; Ming, P.; Strom, A.; et al. Recent Technological and Methodological Advances for the Investigation of Landslide Dams. *Earth Sci Rev* **2021**, *218*, doi:10.1016/j.earscirev.2021.103646. 482
483
484
26. Rahimi, S.; Wood, C.M.; Kokkali, P.Y.; Rivers, B. Advantages of Geophysics to Improve Site Characterization and Reliability for Transportation Projects. In *Transportation Research Record*; 2021; Vol. 2675, pp. 540–554. 485
486
27. Hasan, M.; Shang, Y. Geophysical Evaluation of Geological Model Uncertainty for Infrastructure Design and Groundwater Assessments. *Eng Geol* **2022**, *299*, 106560, doi:https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106560. 487
488
28. Hoffmann, R.; Dietrich, P. An Approach to Determine Equivalent Solutions to the Geoelectrical 2D Inversion Problem. *J Appl Geophy* **2004**, *56*, 79–91, doi:10.1016/j.jappgeo.2004.03.005. 489
490
29. Yue, L. Application of Geophysical Technique in the Coal Mining. *International Journal of Online and Biomedical Engineering (ijOE)* **2015**, *11*, 11, doi:10.3991/ijoe.v11i7.4759. 491
492
30. Oyeyemi, K.D.; Aizebeokhai, A.P.; Adagunodo, T.A.; Olofinnade, O.M.; Sanuade, O.A.; Olajojo, A.A. Subsoil Characterization Using Geoelectrical and Geotechnical Investigations: Implications for Foundation Studies. *International Journal of Civil Engineering and Technology* **2017**, *8*, 302–314. 493
494
495
31. Mehta, P.; Thaker, T.P. Development of Empirical Correlation Between Standard Penetration Test and Shear Wave Velocity. In *Proceedings of the Lecture Notes in Civil Engineering*; 2021; Vol. 138, pp. 483–496. 496
497
32. O.J., A.; O., A. Subsoil Evaluation for Pre-Foundation Study Using Geophysical and Geotechnical Approach. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences* **2011**, *2*, 858–863, doi:10.10520/EJC156603. 498
499
33. Morelli, S.; Utili, S.; Pazzi, V.; Castellanza, R.; Fan, X. Landslides and Geophysical Investigations: Advantages and Limitations. *International Journal of Geophysics* **2019**, *2019*, doi:10.1155/2019/8732830. 500
501

34. Caielli, G.; de Franco, R.; di Fiore, V.; Albarello, D.; Catalano, S.; Pergalani, F.; Cavuoto, G.; Cercato, M.; Compagnoni, M.; Facciorusso, J.; et al. Extensive Surface Geophysical Prospecting for Seismic Microzonation. *Bulletin of Earthquake Engineering* **2020**, *18*, 5475–5502, doi:10.1007/s10518-020-00866-4. 502
503
504
35. Guevara-Mansilla, O.; López-Loera, H.; Ramos-Leal, J.A.; Ventura-Houle, R.; Guevara-Betancourt, R.E. Characterization of a Fractured Aquifer through Potential Geophysics and Physicochemical Parameters of Groundwater Samples. *Environ Earth Sci* **2020**, *79*, doi:10.1007/s12665-020-09096-y. 505
506
507
36. Mukhopadhyay, R.; Renjith, M.L.; Devarajan, P.; Rajasekar, R. Marine Geophysical Surveys for Geotechnical Appraisal off Manjeshwaram, Kasaragod, Kerala. *Indian Geotechnical Journal* **2022**, *52*, 125–131, doi:10.1007/s40098-021-00564-1. 508
509
37. Medeiros, W.E.; Silva, J.B.C. Geophysical Inversion Using Approximate Equality Constraints. *GEOPHYSICS* **1996**, *61*, 1678–1688, doi:10.1190/1.1444086. 510
511
38. Foti, S. Combined Use of Geophysical Methods in Site Characterization. In Proceedings of the Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4 - Proceedings of the 4th International Conference on Site Characterization 4, ISC-4; 2013; Vol. 1, pp. 43–61. 512
513
514
39. Malick Rosvelt, D.M.; Jean Victor, K.; Isaac yannick, B.; François, N.; Armand Sylvain Ludovic, W. Geotechnical Soil Mapping from Electrical and Mechanical Properties: Case Study of the Bafoussam Urban Area, West Cameroon. *Applied Computing and Geosciences* **2022**, *13*, 100078, doi:https://doi.org/10.1016/j.acags.2021.100078. 515
516
517
40. Hausmann, J.; Steinel, H.; Kreck, M.; Werban, U.; Vienken, T.; Dietrich, P. Two-Dimensional Geomorphological Characterization of a Filled Abandoned Meander Using Geophysical Methods and Soil Sampling. *Geomorphology* **2013**, *201*, 335–343, doi:10.1016/j.geomorph.2013.07.009. 518
519
520
41. Sudha, K.; Israil, M.; Mittal, S.; Rai, J. Soil Characterization Using Electrical Resistivity Tomography and Geotechnical Investigations. *J Appl Geophy* **2009**, *67*, 74–79, doi:https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2008.09.012. 521
522
42. Caballero, L.F.; Rivera, Z.C. Correlación Geológica Con La Interpretación Geofísica al Noreste de La Ciudad de Santiago de Cuba. *Comunicação Geológicas* **2015**, *102*. 523
524
43. Carrión-Mero, P.; Aguilar-Aguilar, M.; Morante-Carballo, F.; Domínguez-Cuesta, M.J.; Sánchez-Padilla, C.; Sánchez-Zambrano, A.; Briones-Bitar, J.; Blanco-Torrens, R.; Córdova-Rizo, J.; Berrezueta, E. Surface and Underground Geomechanical Characterization of an Area Affected by Instability Phenomena in Zaruma Mining Zone (Ecuador). *Sustainability* **2021**, *13*, 3272, doi:10.3390/su13063272. 525
526
527
528
44. Carrión, P.; Solórzano, J.; Chávez, M.; Blanco, R.; Morante, F.; Aguilar, M.; Briones, J. Evaluation of Geomechanical Features and Stability for the Recommendations and Rehabilitation of the Humberto Molina Hospital, Zaruma, El Oro, Ecuador. *Sustainable Development and Planning XI; WIT Press: Ashurst, UK* **2020**, *1*, 455–466. 529
530
531
45. Carrión-Mero, P.; Solórzano, J.; Morante-Carballo, F.; Chávez, M.Á.; Montalván-Burbano, N.; Briones-Bitar, J. Technical Closure of the Humberto Molina Astudillo Hospital and Its Implications for Sustainability, Zaruma-Ecuador. *International Journal of Sustainable Development and Planning* **2022**, *17*, 363–373, doi:10.18280/ijstdp.170202. 532
533
534
46. Wang, H.; Zhang, Y.; Liu, Z.; Liu, R.; Li, K. The Impact and Mechanisms of the Shanghai Pilot Free-Trade Zone on the Green Total Factor Productivity of the Yangtze River Delta Urban Agglomeration. *Environmental Science and Pollution Research* **2022**, *29*, 40997–41011, doi:10.1007/s11356-021-17758-y. 535
536
537
47. Meng, G.; Liu, M. Evaluation on the Establishment of Free Trade Zones in Tianjin Binhai New Area. *Dili Xuebao/Acta Geographica Sinica* **2011**, *66*, 223–234. 538
539
48. Tasiguano M. Las Zonas Francas y Las Zonas de Desarrollo (ZEDE): Herramientas de Política Económica y Fiscal. Postgraduate, Universidad Andina Simón Bolívar, unpublished: Quito, 2011. 540
541
49. Teixeira, L.C. Labor Standards and Social Conditions in Free Trade Zones: The Case of the Manaus Free Trade Zone. *Economics* **2020**, *14*, doi:10.5018/economics-ejournal.ja.2020-19. 542
543

50. Chen, J.; Wan, Z.; Zhang, F.; Park, N.; Zheng, A.; Zhao, J. Evaluation and Comparison of the Development Performances of Typical Free Trade Port Zones in China. *Transp Res Part A Policy Pract* **2018**, *118*, 506–526. 544
545
51. Harrison, M.; Hong, W.; Lam, S.; Xiao, G. The Promise of China’s Free Trade Zones – the Case of Hainan. *Asian Education and Development Studies* **2019**, *9*, 297–308, doi:10.1108/AEDS-11-2018-0173. 546
547
52. Rodriguez, C. La Zona Libre de Colón y Su Aporte al Estado Panameño. **2015**. 548
53. Chavez M. *Informe: Aprovechamiento de Áreas Disponibles (ESPOL)*, Unpublished; Guayaquil, 2021; 549
54. Sánchez E. *Informe de Levantamiento Topográfico Correspondiente Al Sector 6 de La Zona ZEDE de ESPOL*; Guayaquil, 2022; 550
55. Delgado, D.; Herrera, R.; Zambrano, A.; Torres, G.; Peñafiel, J.; Ortíz, M. Diagnóstico Del Potencial Turístico Para El Diseño de Senderos Ecoturísticos. Caso Bosque Protector Cerro Blanco, Guayas, Ecuador. *Revista interamericana de ambiente y turismo* **2017**, *13*, 28–43. 551
552
553
56. Solórzano, G.; Lastra, K. Diseño De Una Vía Alternativa Desde Garita Parcón Hacia Áreas Académicas a Nivel De Prefactibilidad 2017. 554
555
57. Cruz, C. Diseño De Una Residencia Universitaria De Estructura Metálica De 6 Niveles, En El Campus Gustavo Galindo De La Espol 2017. 556
557
58. Machiels, L.; Morante, F.; Snellings, R.; Calvo, B.; Canoira, L.; Paredes, C.; Elsen, J. Zeolite Mineralogy of the Cayo Formation in Guayaquil, Ecuador. *Appl Clay Sci* **2008**, *42*, 180–188, doi:10.1016/j.clay.2008.01.012. 558
559
59. Machiels, L.; Garcés, D.; Snellings, R.; Vilema, W.; Morante, F.; Paredes, C.; Elsen, J. Zeolite Occurrence and Genesis in the Late-Cretaceous Cayo Arc of Coastal Ecuador: Evidence for Zeolite Formation in Cooling Marine Pyroclastic Flow Deposits. *Appl Clay Sci* **2014**, *87*, 108–119, doi:10.1016/j.clay.2013.10.018. 560
561
562
60. Carrión, R.; Gonzales, P.; Chávez, M.Á. Estudios y Diseños de La Presa de Embalse Del Parque Del Conocimiento ESPOL. **2009**. 563
564
61. Cedeño Mosquera, U.D. Implantación de Una Red de Control Geodésica Enlazados a La Regme (Red Gns de Monitoreo Continuo Del Ecuador) Del Instituto Geográfico Militar Dentro Del Campus Gustavo Galindo de La Escuela Superior Politécnica Del Litoral. 2015. 565
566
567
62. Kumar, M.R.S.; Swathi, G. Vertical Electrical Sounding (VES) for Subsurface Geophysical Investigation in Kanigiri Area, Prakasam District, Andhra Pradesh, India. *Advances in Applied Science Research* **2014**, *5*, 82–86. 568
569
63. Reynolds, J.M. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*; John Wiley & Sons, 1997; ISBN 0471968021. 570
64. Reynolds, J.M. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*; John Wiley & Sons, 2011; ISBN 1119957141. 571
65. Telford, W.M.; Telford, W.M.; Geldart, L.P.; Sheriff, R.E. *Applied Geophysics*; Press, C.U., Ed.; Cambridge university press: Cambridge, UK, 1990; ISBN 0521339383. 572
573
66. Mahvelati, S.; Kordjazi, A.; Coe, J.T. A Review of Seismic Geophysical Testing in Iran for Building Near-Surface Velocity Models. *The Leading Edge* **2018**, *37*, 68a1-68a10, doi:10.1190/tle37010068a1.1. 574
575
67. Cosenza, P.; Marmet, E.; Rejiba, F.; Jun Cui, Y.; Tabbagh, A.; Charlery, Y. Correlations between Geotechnical and Electrical Data: A Case Study at Garchy in France. *J Appl Geophy* **2006**, *60*, 165–178, doi:10.1016/j.jappgeo.2006.02.003. 576
577
68. Wilches, F.J.; Burbano, J.L.A.; Sierra, E.E.C. Subgrade Soils Characterization Data, for Correlation of Geotechnical Variables on Urban Roads in Northern Colombia. *Data Brief* **2020**, *32*, 106095, doi:10.1016/j.dib.2020.106095. 578
579
69. “NEC” *Cargas Sísmicas NEC-SE-DS*; 2015; 580
70. Eberhart-Phillips, D. Three-dimensional P and S Velocity Structure in the Coalinga Region, California. *J Geophys Res Solid Earth* **1990**, *95*, 15343–15363. 581
582
71. Thurber, C.H.; Iyer, H.M.; Hirahara, K. *Seismic Tomography: Theory and Practice* 1993. 583
72. Hamada, G.M. Reservoir Fluids Identification Using Vp/Vs Ratio? *Oil & Gas Science and Technology* **2004**, *59*, 649–654. 584
73. Terzaghi, K. *Theoretical Soil Mechanics* John Wiley and Sons Inc. *New York* **1943**, 314. 585

74. KG, S.; Zienkiewicz, O.C. *Rock Mechanics in Engineering Practice*; John Wiley, 1968; 586
75. Ji, J.; Zhang, W.; Zhang, F.; Gao, Y.; Lü, Q. Reliability Analysis on Permanent Displacement of Earth Slopes Using the Simplified Bishop Method. *Comput Geotech* **2020**, *117*, 103286, doi:10.1016/j.compgeo.2019.103286. 587
588
76. Belghali, M.; Saada, Z.; Garnier, D.; Maghous, S. Pseudo-Static Stability Analysis of Rock Slopes Reinforced by Passive Bolts Using the Generalized Hoek–Brown Criterion. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* **2017**, *9*, 659–670, doi:10.1016/j.jrmge.2016.12.007. 589
591
77. Jiang, X.; Cui, P.; Liu, C. A Chart-Based Seismic Stability Analysis Method for Rock Slopes Using Hoek-Brown Failure Criterion. *Eng Geol* **2016**, *209*, 196–208, doi:10.1016/j.enggeo.2016.05.015. 592
593
78. Nekouei, A.M.; Ahangari, K. Validation of Hoek–Brown Failure Criterion Charts for Rock Slopes. *Int J Min Sci Technol* **2013**, *23*, 805–808, doi:10.1016/j.ijmst.2013.10.004. 594
595
79. AlHamaydeh, M.; Al-Shamsi, G.; Aly, N.; Ali, T. Seismic Risk Quantification and GIS-Based Seismic Risk Maps for Dubai-UAE_Dataset. *Data Brief* **2021**, *39*, 107566, doi:10.1016/j.dib.2021.107566. 596
597
80. Zohdy, A.A.R.; Eaton, G.P.; Mabey, D.R. Application of Surface Geophysics to Ground-Water Investigations. **1974**. 598
81. Paembonan, A.Y.; Febriansanu, D.R.; Huseina, A.A.; Sigalingging, A.S.; Nathania, E.Y.; Andika, P.P. Preliminary Result of Electrical Resistivity and Electromagnetic Methods to Determine the Bedrock. In Proceedings of the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science; IOP Publishing, 2021; Vol. 830, p. 012053. 599
601
82. Fernández-Baniela, F.; Arias, D.; Rubio-Ordóñez, Á. Seismic Refraction and Electrical Resistivity Tomographies for Geotechnical Site Characterization of Two Water Reservoirs (El Hierro, Spain). *Near Surface Geophysics* **2021**, *19*, 199–223. 602
603
83. Fener, M. The Effect of Rock Sample Dimension on the P-Wave Velocity. *J Nondestr Eval* **2011**, *30*, 99–105. 604
84. Solórzano, J.; Morante, F.; Montalván, N.; Briones, J.; Carrión, P. A Systematic Review of the Relationship between Geotechnics and Disasters. *Sustainability* **2022**, *14*, 12835, doi:10.3390/su141912835. 605
606
85. Fiorentino, G.; Quaranta, G.; Mylonakis, G.; Lavorato, D.; Pagliaroli, A.; Carlucci, G.; Sabetta, F.; della Monica, G.; Lanzo, G.; Aprile, V.; et al. Seismic Reassessment of the Leaning Tower of Pisa: Dynamic Monitoring, Site Response, and SSI. *Earthquake Spectra* **2019**, *35*, 703–736, doi:10.1193/021518EQS037M. 607
608
609
86. Wolter, A.; Stead, D.; Ward, B.C.; Clague, J.J.; Ghirotti, M. Engineering Geomorphological Characterisation of the Vajont Slide, Italy, and a New Interpretation of the Chronology and Evolution of the Landslide. *Landslides* **2016**, *13*, 1067–1081, doi:10.1007/s10346-015-0668-0. 610
611
612
87. van Baars, S. *100 Year Prandtl's Wedge-Intermediate Report*; University of Luxembourg, 2016; 613