DISEÑO DE ESTRUCTURA PALAFÍTICA PARA REDUCIR LA VULNERABILIDAD POR INUNDACIONES EN LA INSTITUCIÓN EDUCATIVA SAULO SÁNCHEZ, CHOCÓ

Autor:

Dalia Magaly Timote Briñez

Director de tesis:

Andrés Horacio Clavijo Rincón

Monografía para optar al título de

Ingeniera Civil

Facultad Tecnológica

Proyecto Curricular de Ingeniería Civil

Bogotá D.C.

Abril 2026

AGRADECIMIENTOS:

A mis padres, a mis hermanos, a mis perritos por ser un motor en mi vida, pero sobre todo a mi mamá que ha sido el apoyo más hermoso del mundo.

A mi tutor de trabajo de grado y a mis amigos que me han acompañado en este transitar.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 9

PLATEAMIENTO DEL PROBLEMA 10

JUSTIFICACIÓN 11

OBJETIVOS 12

Objetivo General 12

Objetivos Específicos 12

ESTADO DEL ARTE 13

ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y CONCEPTUALES DE LAS ESTRUCTURAS PALAFÍTICAS 15

CASOS DE ESTUDIO EN COLOMBIA 16

BASES TEÓRICAS DEL DISEÑO PALAFÍTICO 18

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN 20

MARCO REFERENCIAL 23

MARCO CONTEXTUAL 27

Ubicación geográfica y características del territorio 27

Condiciones climáticas e hídricas de la región 28

Problemática de inundaciones en Riosucio, Chocó 29

Impacto social y educativo de la problemática 30

ANÁLISIS GEOTÉCNICO PRELIMINAR 31

Revisión crítica del estudio de suelos referenciado 31

Ensayos geotécnicos de laboratorio y de campo considerados 33

Correlaciones utilizadas y análisis del tipo de suelo 35
DISEÑO DE LA ESTRUCTURA PALAFÍTICA 52
Cimentación profunda 53
Avalúo de cargas de la superestructura 53
Carga muerta 54
Carga viva 56
Metodología para el cálculo de capacidad de carga de pilotes 56
Capacidad de carga 56
Resistencia por fuste (método α) 57
Resistencia por punta 57
Resistencia de diseño del pilote 57
Numero de pilotes 58
Comparación de diámetros pilote 58
CONDICIONES TÉCNICAS PARA PILOTES DE MADERA HINCADOS 59
MODELO ESTRUCTURA PALAFÍTICA 61
ANÁLISIS DEL PROYECTO Y VIABILIDAD DE LA PROPUESTA 68
CONCLUSIONES 69
RECOMENDACIONES 71
REFERENCIAS 72
ANEXOS 78

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Localización zona de estudio Riosucio, Choco, Colombia 10

Ilustración 2 Características constructivas de la vivienda palafítica en Riosucio, Chocó. 18

Ilustración 3 - Ubicación Riosucio, Choco, Colombia. 28

Ilustración 4 - Zona de estudio, Riosucio, Choco, Colombia 28

Ilustración 5. Lote de la zona de estudio 30

Ilustración 6. Modelo aula-1 de la IE. 62

Ilustración 7. Modelo aula-2 de la IE. 62

Ilustración 8. Modelo zona recreativa-1 de la IE. 63

Ilustración 9. Modelo zona recreativa-2 de la IE. 63

Ilustración 10. Modelo sala de profesores-1 de la IE. 64

Ilustración 11. Modelo sala de profesores-2 de la IE. 64

Ilustración 12. Modelo coordinación-1 de la IE. 65

Ilustración 13. Modelo coordinación-2 de la IE. 65

Ilustración 14. Modelo preliminar estructura palafítica-1. 66

Ilustración 15. Modelo preliminar estructura palafítica-2. 66

Ilustración 16. Modelo preliminar estructura palafítica-3. 67

Ilustración 17. Esquema ubicación de los pilotes. 67

TABLA DE GRAFICAS

Grafica 1. Granulometría 41

Grafica 2. SPT 42

Grafica 3. Limite Liquido (%) 43

Grafica 4. Limite Plástico 44

Grafica 5, Índice de Plasticidad 45

Grafica 6. Carta de Plasticidad de Casagrande 46

Grafica 7. Humedad Natural (%) 47

Grafica 8. Expansividad 48

Grafica 9. Su (kPa) 49

Grafica 10. ES (MPa) 50

Grafica 11. Peso Unitario (kN/m3) 50

Grafica 12. Relación de diámetros pilote 59

TABLA DE TABLAS

Tabla 1. Antecedentes técnicos y conceptuales sobre estructuras palafíticas en zonas inundables 14

Tabla 2. Resultados de ensayos de laboratorio y de campo del estudio de suelos referenciado ... 33

Tabla 3. Densidades típicas y otras propiedades de los suelos 35

Tabla 4. Datos promedios recopilados 36

Tabla 5. Valores típicos de los suelos en general 36

Tabla 6. Resultados de ensayos CU y UU para estimación de la resistencia al corte no drenada 37

Tabla 7. Correlaciones resistencia al corte No Drenada 37

Tabla 8. Rangos de resistencia al corte No Drenada 38

Tabla 9. Correlaciones modulo elástico 38

Tabla 10. Tablas de rangos de modulo elástico 39

Tabla 11. Módulo de elasticidad (MPa) (Bardet, 1997). 39

Tabla 12. Clasificación suelos expansivos 41

Tabla 13. Relación diámetros pilote con cantidad 58

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones recurrentes que afectan el departamento del Chocó, particularmente en zonas ribereñas como el municipio de Riosucio, han generado problemáticas significativas en términos de accesibilidad, habitabilidad y continuidad de servicios básicos. En el ámbito educativo, estas condiciones representan un desafío estructural y social, ya que dificultan el desarrollo académico normal de los estudiantes, comprometiendo su bienestar y derecho a una educación continua y segura (CLOPAD, 2011).

En la Institución Educativa Saulo Sánchez se han desarrollado previamente intervenciones estructurales para mitigar los efectos de las inundaciones. No obstante, existe una zona de la institución que permanece expuesta, lo cual constituye la zona de intervención específica de esta investigación. Dicha área, al mantenerse al nivel del terreno natural, está sujeta a afectaciones recurrentes por crecientes del río, por lo que se hace necesario plantear una solución técnica apropiada a sus condiciones físicas y geotécnicas.

En este contexto, las estructuras palafíticas, entendidas como sistemas constructivos elevados mediante palafitos, generalmente construidos en madera, se consideran una alternativa eficiente para enfrentar condiciones de anegamiento permanente o estacional. Este sistema, históricamente empleado en territorios húmedos y de suelos blandos, permite elevar el punto de apoyo de una edificación sin modificar significativamente el entorno natural. Para efectos de esta investigación, la estructura palafítica se entiende como el sistema estructural de soporte basado en palafitos, sin abarcar elementos arquitectónicos ni componentes de superestructura.

Este trabajo consiste en un diseño palafítico estructural preliminar de tipo palafítico mediante madera, orientado a determinar el tipo de solución más adecuada para la zona de intervención, con base en el análisis del comportamiento geotécnico del terreno. Para ello, se

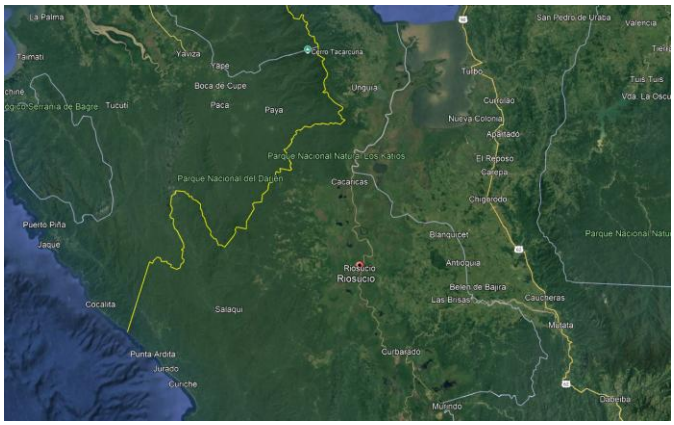
hace uso de información de laboratorio y de campo proveniente de un estudio de suelos cercano a la zona de estudio, además del uso de herramientas normativas y analíticas que permitan justificar técnica y estructuralmente la viabilidad del sistema propuesto.

Esta investigación surge ante la necesidad de plantear alternativas constructivas que respondan adecuadamente a las condiciones particulares del territorio, buscando garantizar la continuidad del servicio educativo en escenarios de riesgo y servir como referencia preliminar para situaciones con condiciones comparables.

PLATEAMIENTO DEL PROBLEMA

El municipio de Riosucio, ubicado en el departamento del Chocó, enfrenta constantes afectaciones por inundaciones debido a su ubicación en una zona de alta pluviosidad y la influencia directa de varios cuerpos hídricos. Riosucio, como parte de la zona del Bajo Atrato, está expuesto a los efectos de los ríos Atrato, Sucio, Salaquí y Truandó, los cuales modifican constantemente las condiciones del terreno debido a procesos de sedimentación y erosión fluvial, lo que incrementa la inestabilidad de la infraestructura y eleva la vulnerabilidad de las edificaciones ante inundaciones (CLOPAD, 2011, p. 8).

Ilustración 1. Localización zona de estudio Riosucio, Choco, Colombia



Nota: Tomado de Google Earth (earth.google.com)

Esta situación ha generado impactos sobre la infraestructura educativa, particularmente en la Institución Educativa Saulo Sánchez, donde parte de sus instalaciones ya se encuentran elevadas con medidas que buscan mitigar el impacto de las crecientes. Sin embargo, una sección del plantel aún permanece al nivel del terreno natural, lo que la hace susceptible a anegaciones y afectaciones funcionales. Esta condición representa una vulnerabilidad estructural evidente, que compromete el desarrollo normal de las actividades académicas, así como la seguridad de los espacios educativos y sus ocupantes.

JUSTIFICACIÓN

El municipio de Riosucio, ubicado en el departamento del Chocó, presenta una alta susceptibilidad a inundaciones debido a su ubicación geográfica, su topografía plana y su cercanía a múltiples cuerpos de agua como los ríos Atrato, Sucio, Salaquí y Truandó. Esta condición de amenaza natural genera un contexto de alta vulnerabilidad de las edificaciones, especialmente aquellas destinadas a servicios esenciales como la educación (CLOPAD, 2011).

En particular, la Institución Educativa Saulo Sánchez se ha visto afectada por esta problemática. Si bien una parte del plantel ya ha sido elevada para mitigar el riesgo de inundación, existe una zona específica que no ha sido intervenida y que permanece expuesta a anegaciones. Esta situación pone en riesgo la continuidad de las actividades académicas y el bienestar de la comunidad educativa.

Ante este escenario, resulta pertinente analizar alternativas de intervención que se ajusten tanto a las condiciones físicas del sitio como a las limitaciones propias del contexto regional. En este sentido, el presente proyecto surge con el propósito de desarrollar una propuesta preliminar

adaptada a las condiciones geotécnicas del terreno, que considere la viabilidad de su aplicación en zonas con acceso limitado y que cumpla con los lineamientos normativos aplicables.

El estudio se enfoca específicamente en el diseño preliminar de una estructura palafítica (fundación sobre pilotes) como estrategia para reducir la vulnerabilidad frente a eventos de inundación en la zona no intervenida del plantel. Este enfoque se fundamenta en el análisis del estudio de suelos realizado por MHD Ingeniería S.A.S. (2022) en el municipio de Riosucio, Chocó, el cual incluyó ocho sondeos geotécnicos con profundidades de hasta 6 m, cercanos a la zona de estudio, así como en metodologías técnicas reconocidas y en los lineamientos del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) y del Código Colombiano de Puentes (INVIAS, 2018).

De esta manera, el proyecto se plantea como una alternativa, orientada a contribuir a la reducción de la vulnerabilidad de la infraestructura educativa frente a inundaciones y a fortalecer las condiciones de seguridad y permanencia del servicio educativo en la región.

OBJETIVOS

Objetivo General

Proponer un diseño preliminar de estructura palafítica como solución para reducir la vulnerabilidad por inundaciones en la Institución Educativa Saulo Sánchez de Riosucio, Chocó.

Objetivos Específicos

- Analizar proyectos de estructuras palafíticas en contextos similares como referencia para la propuesta de diseño.

- Caracterizar las condiciones reales de la institución educativa mediante recopilación de datos específicos, incluyendo el estudio de suelos, el análisis de planos de referencia, con el propósito de establecer una base sólida que facilite la propuesta del diseño.
- Diseñar una solución basada en estructuras palafíticas, cumpliendo con la normativa NSR-10, que esté adaptada tanto a las condiciones del entorno como a las necesidades específicas de la Institución Educativa.

ESTADO DEL ARTE

Las estructuras palafíticas han sido empleadas tradicionalmente como una estrategia constructiva para mitigar los efectos de las inundaciones en zonas ribereñas del litoral Pacífico colombiano. Diversos estudios han documentado su implementación en este contexto, entre ellos investigaciones sobre Vivienda y Arquitectura Tradicional en el Pacífico Colombiano (2014), Arquitectura Tradicional como Sistema Pasivo de Aprovechamiento Energético (2016), La Vivienda Palafítica del Pacífico: Expresión y Persistencia de una Forma de Ver el Mundo (2016), Características Bioclimáticas de la Arquitectura Palafítica del Barrio Puente Cali, Guapi, Cauca (2016) y los Lineamientos para la Construcción de Vivienda Palafítica (2016) (ver Tabla 1), además, destacando su adaptación al entorno, sus beneficios en condiciones climáticas adversas y su pertinencia cultural en las comunidades donde se desarrollan.

Entre los antecedentes revisados se encuentran investigaciones que exponen las tipologías constructivas tradicionales del Pacífico, el aprovechamiento energético pasivo de estas viviendas, así como criterios técnicos para su diseño y adaptación en regiones con alta exposición a inundaciones. Si bien estos estudios no se centran específicamente en edificaciones educativas, aportan elementos conceptuales y técnicos para el diseño preliminar de la estructura palafítica

entre ellos: lineamientos de aplicación de proyectos tipo para vivienda palafítica y la necesidad de ajustar el modelo a las condiciones específicas del sitio, referencias tipológicas del Pacífico que orientan la solución estructural, pautas bioclimáticas básicas útiles para la ubicación y la selección de materiales y otros que permiten sustentar la propuesta estructural en contextos similares.

Tabla 1. Antecedentes técnicos y conceptuales sobre estructuras palafíticas en zonas inundables

Nombre de la Investigación	Descripción	Autor	Año
Materiales alternativos para la vivienda palafítica en zonas inundables en los meandros del río Atrato	Analiza la vivienda palafítica en municipios de la cuenca del río Atrato (Murindó, Vigía del Fuerte y Riosucio), describiendo su función frente a inundaciones, el uso de pilotes de madera como soporte estructural y su relación con las condiciones ambientales del territorio.	Hidalgo Granada, Murillo Macías y Villota Chitán	2020
Vivienda y Arquitectura Tradicional en el Pacífico Colombiano	Presenta tipologías del hábitat del Pacífico e incluye la vivienda palafítica, con materiales y técnicas tradicionales que sustentan la base elevada sobre pilotes.	Mosquera Torres	2014
Características bioclimáticas de la arquitectura palafítica del barrio Puerto Cali, Guapi, Cauca	Examina las estrategias bioclimáticas en viviendas palafíticas y propone mejoras en los diseños para adaptarse a las condiciones climáticas de la región, y sugiere criterios de adaptación al clima que influyen en la configuración espacial y constructiva de la vivienda.	Garcés Viáfara & Hurtado Pérez	2016
Arquitectura Tradicional como Sistema Pasivo de Aprovechamiento Energético	Analiza cómo la arquitectura palafítica en Colombia se comporta frente a diferentes condiciones climáticas, optimizando el aprovechamiento energético.	Martín Díaz	2016

Nombre de la Investigación	Descripción	Autor	Año
Materiales alternativos para la vivienda palafítica en zonas inundables en los meandros del río Atrato	Analiza la vivienda palafítica en municipios de la cuenca del río Atrato (Murindó, Vigía del Fuerte y Riosucio), describiendo su función frente a inundaciones, el uso de pilotes de madera como soporte estructural y su relación con las condiciones ambientales del territorio.	Hidalgo Granada, Murillo Macías y Villota Chitán	2020
Lineamientos para la Construcción de Vivienda Palafítica	Proporciona un modelo que define una vivienda palafítica elevada para zonas inundables; detalla el proceso constructivo de la cimentación en pilotes.	DNP	2016
La Vivienda Palafítica del Pacífico: Expresión y Persistencia de una Forma de Ver el Mundo	Estudia las características socioculturales de la vivienda palafítica en la región del Pacífico y su impacto en la identidad de las comunidades.	Osorio Garcés	2016

Nota: Elaboración propia.

ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y CONCEPTUALES DE LAS ESTRUCTURAS PALAFÍTICAS

Las estructuras palafíticas constituyen una tipología arquitectónica desarrollada como respuesta a contextos caracterizados por alta humedad, suelos saturados y presencia permanente o cíclica de cuerpos de agua. En el caso del litoral Pacífico colombiano y, particularmente, en la cuenca del río Atrato, esta tipología se ha consolidado como una estrategia para mitigar las afectaciones derivadas de inundaciones frecuentes, permitiendo elevar la edificación por encima del nivel del agua durante eventos extremos (Hidalgo Granada et al., 2020).

En este contexto, las viviendas palafíticas ubicadas sobre los meandros del río Atrato en municipios como Murindó, Vigía del Fuerte y Riosucio se encuentran constantemente expuestas

a riesgos asociados a inundaciones, lo cual ha llevado al desarrollo de sistemas constructivos elevados apoyados sobre estacas o pilotes, generalmente de madera, que permiten reducir la afectación directa del agua sobre la estructura y el espacio habitable (Hidalgo Granada et al., 2020).

La vivienda palafítica constituye una forma de hábitat ancestral ampliamente presente en el litoral Pacífico colombiano, particularmente en departamentos como Chocó, Cauca y Nariño. Esta forma de habitar ha persistido durante más de cinco siglos como respuesta adaptativa a ecosistemas con alta humedad, suelos saturados y presencia constante o cíclica de inundaciones (Osorio Garcés, 2016).

Según este autor, la vivienda palafítica expresa un conocimiento local detallado sobre los factores climáticos, los ciclos del agua y los recursos del entorno selvático, consolidándose como una tecnología cultural que articula territorio, ambiente y forma de habitar, más allá de una simple solución constructiva.

Mosquera Torres (2014) documenta que estas arquitecturas tradicionales incorporan materiales locales, técnicas transmitidas intergeneracionalmente y una lógica constructiva coherente con las condiciones ambientales del Pacífico colombiano, lo que explica su persistencia histórica y su adaptación territorial.

CASOS DE ESTUDIO EN COLOMBIA

En Colombia, la vivienda palafítica se ha desarrollado en diversas regiones caracterizadas por alta humedad, presencia permanente o cíclica de cuerpos de agua y suelos inundables. Esta tipología ha sido utilizada históricamente como una estrategia de adaptación frente a las

condiciones hidrológicas del territorio, particularmente en zonas ribereñas, lacustres y costeras del país (DNP, 2016).

El Departamento Nacional de Planeación (2016) reconoce la vivienda palafítica como una alternativa habitacional adecuada para zonas inundables, siempre que su diseño se adapte a las condiciones específicas del suelo, el clima y la disponibilidad de materiales de cada región. En este sentido, el modelo palafítico no responde a una única configuración, sino que presenta variaciones según el contexto territorial donde se implanta.

Una de las regiones donde esta tipología ha tenido mayor presencia es el litoral Pacífico colombiano, especialmente en los departamentos de Chocó, Cauca y Nariño. En estos territorios, la vivienda palafítica ha sido utilizada como respuesta frente a condiciones de inundabilidad permanente o cíclica, configurando asentamientos adaptados a los cursos de agua y a la dinámica hidrológica del territorio (Osorio Garcés, 2016).

En la cuenca del río Atrato, específicamente en municipios como Murindó, Vigía del Fuerte y Riosucio, se ha documentado la presencia de viviendas palafíticas como estrategia de adaptación frente a inundaciones frecuentes. Estas construcciones se apoyan sobre estacas o pilotes, generalmente de madera, y responden directamente a las condiciones físicas del territorio y a la relación permanente con el agua (Hidalgo Granada et al., 2020).

Estos casos muestran que la tipología palafítica ha sido utilizada en distintos contextos del país como una forma de adaptación a entornos inundables, manteniendo una relación estrecha entre las condiciones ambientales del territorio y la forma constructiva adoptada.

Como se observa en la Figura X, las viviendas palafíticas en Riosucio se construyen principalmente sobre pilotes de madera labrada, lo cual evidencia la adaptación del sistema constructivo a condiciones de inundación permanente (Hidalgo Granada et al., 2020).

Ilustración 2 Características constructivas de la vivienda palafítica en Riosucio, Chocó.



Fuente: adaptado de Hidalgo Granada, Murillo Macías y Villota Chitán (2020, p. 24).

BASES TEÓRICAS DEL DISEÑO PALAFÍTICO

El diseño de estructuras palafíticas se fundamenta en principios de adaptabilidad frente a entornos caracterizados por alta humedad, suelos saturados y presencia permanente o cíclica de cuerpos de agua. En este sentido, Cardozo Cifuentes, Flechas Mejía y Romero Camacho (2023) señalan que este tipo de edificación permite mitigar los efectos negativos de las inundaciones al elevar la estructura sobre el nivel del agua, reduciendo el deterioro de los materiales y la interrupción de las actividades dentro del espacio construido.

Los elementos fundamentales de una estructura palafítica incluyen:

- **Pilotes:** elementos verticales que conforman la cimentación del sistema, transmitiendo las cargas al terreno y permitiendo elevar la edificación sobre el nivel del suelo o del agua (Martín Díaz, 2016; Departamento Nacional de Planeación, 2016).
- **Plataforma elevada:** sistema horizontal soportado sobre los pilotes, que estructura el suelo de la edificación y soporta el volumen construido (Martín Díaz, 2016; Casallas & Ramírez, 2021).
- **Materiales resistentes a la humedad:** seleccionados en función de las condiciones ambientales del sitio, generalmente maderas locales, guadua u otros materiales con buen comportamiento frente a la humedad (Martín Díaz, 2016; Garcés Viáfara & Hurtado Pérez, 2016).

Desde el punto de vista técnico, diversas especies forestales provenientes del bosque natural colombiano presentan características de resistencia mecánica, durabilidad natural y trabajabilidad que permiten su uso en elementos estructurales como postes, cercas, durmientes y componentes de construcción pesada y liviana (Blanco, 2020). Entre estas especies se encuentran Hymenaea oblongifolia (algarrobo), Carapa guianensis (güino) y Prioria copaifera (cativo), las cuales han sido ampliamente movilizadas y utilizadas en procesos constructivos a nivel nacional.

Adicionalmente, el uso de la madera en proyectos constructivos debe realizarse bajo esquemas de legalidad, trazabilidad y manejo sostenible del recurso forestal, promovidos por instrumentos como el Pacto Intersectorial por la Madera Legal en Colombia y los programas de compra responsable de madera (Rueda Tocarruncho et al., 2016). Estos

mecanismos buscan asegurar que la extracción, transformación y comercialización de productos maderables se realicen conforme a criterios ambientales, sociales y legales, fortaleciendo la sostenibilidad del sector forestal.

- **Sistemas de drenaje y ventilación:** dispuestos para permitir la circulación de aire bajo la plataforma y favorecer la disipación de humedad, reduciendo el deterioro de los materiales (Martín Díaz, 2016; Garcés Viáfara & Hurtado Pérez, 2016).

Normativa aplicable (NSR-10, regulaciones ambientales y urbanísticas)

El diseño de edificaciones en zonas expuestas a amenaza de inundación en Colombia debe ajustarse a los lineamientos establecidos en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente — NSR-10, el cual define los criterios técnicos para garantizar la seguridad estructural de las edificaciones frente a diferentes acciones y amenazas naturales (Consejo Colombiano de Construcción Sismo Resistente, 2010)

Adicionalmente, la intervención en zonas inundables, humedales y rondas hídricas se encuentra condicionada por la normativa ambiental y de ordenamiento territorial vigente, la cual establece restricciones y criterios para minimizar impactos ambientales y garantizar la compatibilidad del proyecto con el entorno natural y el uso del suelo, conforme a lo dispuesto en la legislación ambiental y en los instrumentos de ordenamiento territorial aplicables al municipio.

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Enfoque y tipo de investigación: El presente estudio corresponde a una investigación de tipo descriptiva, en tanto analiza las condiciones físicas, geotécnicas e hidrológicas del área de intervención, con el fin de formular una propuesta de diseño estructural de tipo palafítico para un

sector de la Institución Educativa Saulo Sánchez, en el municipio de Riosucio, Chocó. El enfoque adoptado es cualitativo, complementado con elementos cuantitativos para la estimación de parámetros geotécnicos y la caracterización de amenazas naturales.

Recolección y análisis de información: Se realizó una revisión documental de normativas técnicas, antecedentes académicos y estudios especializados relacionados con estructuras palafíticas y con las condiciones del sitio de estudio. En particular, se consultaron el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), el Código Colombiano de Puentes (INVIAS, 2014), estudios geotécnicos cercanos al área de intervención y el estudio hidrológico e hidráulico desarrollado por Cruz Díaz y Ropero Triviño (2024) para el municipio de Riosucio.

Análisis del contexto físico del sitio:

- **Amenaza por inundación:** La amenaza por inundación se reconoció a partir del estudio hidrológico e hidráulico realizado por Cruz Díaz y Ropero Triviño (2024), en el cual se delimitó la cuenca del río Atrato, se estimaron caudales para diferentes períodos de retorno y se identificaron manchas de inundación mediante modelación hidráulica. Dicho estudio muestra que la lámina de agua durante eventos de crecida puede alcanzar valores entre aproximadamente 2.14 m y 3.88 m, lo anterior dependiendo del lugar exacto y el periodo de retorno, evidenciando una amenaza significativa por inundación en el área urbana de Riosucio, lo cual justifica la adopción de una solución estructural elevada sobre pilotes como criterio principal de diseño.
- **Condiciones topográficas:** Las condiciones topográficas del área de estudio corresponden a una planicie aluvial asociada al cauce del río Atrato, caracterizada

por una pendiente extremadamente baja. Cruz Díaz y Ropero Triviño (2024) calcularon una pendiente promedio del orden de 0.010 % en el tramo del río analizado, lo cual confirma la presencia de una topografía esencialmente plana que favorece la expansión lateral y la permanencia del agua durante eventos de crecida.

- **Amenaza sísmica:** La amenaza sísmica del sitio se identificó a partir del Mapa de Zonas de Amenaza Sísmica de Colombia incluido en el Capítulo A.2 del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente — NSR-10. De acuerdo con dicho mapa, el municipio de Riosucio se localiza en una zona de amenaza sísmica alta.
- **Análisis geotécnico:** El diseño de la cimentación se realizó con base en un estudio de suelos existente en un sector cercano al área de intervención, empleando correlaciones empíricas para la estimación de parámetros geotécnicos relevantes. A partir de estos parámetros se establecieron criterios para la selección de un sistema de cimentación profunda mediante pilotes, considerando la baja capacidad portante de los estratos superficiales y la necesidad de transferir cargas a profundidades mayores.
- **Consideraciones sobre durabilidad y tratamiento del material:** Dado que el sistema estructural propuesto emplea pilotes de madera en un entorno caracterizado por alta humedad y contacto frecuente con el suelo y el agua, se consideraron criterios básicos de durabilidad, tales como la selección de especies con resistencia natural, con el fin de reducir el riesgo de deterioro prematuro de los elementos, contemplando las especies de la región.

MARCO REFERENCIAL

Para comprender el desarrollo de este estudio, es fundamental definir algunos términos clave relacionados con la investigación:

- **Estructura palafítica:** La estructura palafítica es un sistema de cimentación que se caracteriza por la utilización de pilotes verticales, los cuales se introducen en el terreno con el objetivo de transferir las cargas de la edificación a estratos más profundos y competentes. Este tipo de solución se emplea en zonas propensas a inundaciones o con presencia de niveles freáticos elevados, donde no es viable el uso de cimentaciones superficiales. En contextos de riesgo hídrico, las estructuras palafíticas ofrecen una alternativa técnica eficiente para elevar edificaciones y reducir su vulnerabilidad ante eventos climáticos extremos (INVIAS, 2018; Coduto, 2016).

- **Vulnerabilidad por inundaciones:** La vulnerabilidad es entendida como el grado en que una comunidad, infraestructura o ecosistema es susceptible de sufrir daños o pérdidas ante la ocurrencia de una amenaza específica, en este caso, inundaciones (IDEAM, s.f.-a). Desde el contexto de infraestructuras educativas en zonas inundables, esta vulnerabilidad hace referencia no solo a la susceptibilidad física de las edificaciones, sino también a la incapacidad de estas para mantener su funcionalidad durante y después de los eventos climáticos adversos. En particular, una alta vulnerabilidad estructural puede generar interrupciones prolongadas en los procesos educativos, pérdidas económicas significativas y poner en riesgo la seguridad física de estudiantes y personal docente, evidenciando la necesidad urgente de implementar soluciones adaptativas como las estructuras palafíticas, que reduzcan el impacto y garanticen la continuidad educativa (Banco Mundial, 2021; Cardona et al., 2020).

- **Resiliencia estructural:** Capacidad de una edificación para resistir y recuperarse de impactos ambientales adversos, como inundaciones o sismos, minimizando daños y garantizando su funcionalidad (López, Romero, & León, 2018).
- **Adaptabilidad arquitectónica:** Diseño de edificaciones que pueden ajustarse a condiciones cambiantes del entorno, asegurando su funcionalidad y durabilidad a largo plazo (Rodríguez & Pérez, 2020).
- **Normativa NSR-10:** Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente que establece los requisitos técnicos y científicos para el diseño y construcción de edificaciones seguras en Colombia (Consejo Colombiano de Construcción Sismo Resistente, 2010).

  La NSR-10 no usa el término palafito; trata estas soluciones como cimentaciones profundas con pilotes/pilas. Se emplean cuando se requiere apoyar la estructura en estratos más competentes o elevarla por condiciones del sitio, como por inundabilidad, el diseño se rige por el Título H de la NSR-10.
- **Resistencia al corte no drenado (Su):** Es la capacidad que tiene un suelo cohesivo saturado para resistir esfuerzos cortantes cuando no hay disipación de presiones de poro. Este parámetro es fundamental en análisis de estabilidad a corto plazo en suelos finos. (Das, 2010, *Principios de ingeniería geotécnica*, p. 174)
- **Ángulo de fricción interna efectiva (φ′):** Representa la fricción entre partículas de suelo bajo esfuerzos cortantes drenados. Es uno de los parámetros más relevantes en suelos granulares, especialmente para evaluar la resistencia al corte. (Coduto, Yeung & Kitch, 2011, *Geotechnical Engineering: Principles and Practices*, p. 185)

- **Cohesión drenada (c′):** Corresponde a la parte de la resistencia al corte que no depende del esfuerzo normal, atribuida a la atracción entre partículas en suelos cohesivos. (Das, 2011, *Fundamentals of Geotechnical Engineering*, p. 167)
- **Módulo de elasticidad (Es):** Es una medida de la rigidez del suelo frente a deformaciones axiales. Puede estimarse indirectamente a partir del ensayo SPT mediante correlaciones empíricas. (Bardet, 1997, *Experimental Soil Mechanics*, p. 126)
- **Presión vertical efectiva (σ′v):** Es el esfuerzo total aplicado al suelo menos la presión de poros. Controla fenómenos como la consolidación y la fricción lateral, especialmente en cimentaciones profundas. (Terzaghi, Peck & Mesri, 1996, *Soil Mechanics in Engineering Practice*, p. 55)
- **Capacidad Portante:** Es la resistencia que puede transmitir la cimentación al suelo sin falla ni asentamientos inadmisibles. La NSR-10 define que la capacidad admisible de diseño es el menor valor entre la carga de falla del suelo reducida por el factor de seguridad y la que produce los asentamientos máximos permitidos; además, exige que este valor quede claramente establecido en el informe geotécnico (*NSR-10, Título H, H.4.2.3*).
- **Capacidad de carga:** La capacidad de carga de una cimentación profunda corresponde a la carga total que puede resistir un elemento como un pilote, sin provocar falla del suelo ni del elemento estructural. Se obtiene como la suma de la fricción lateral desarrollada a lo largo del fuste del pilote y la resistencia por punta. El diseño debe realizarse bajo criterios de estados límite de resistencia, utilizando coeficientes de reducción según el

tipo de análisis realizado (INVIAS, 2014, *Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes – Sección 10: Cimentaciones*, Sección 10.7.3.8).

- **Cimentación superficial:** Las cimentaciones superficiales transmiten las cargas estructurales directamente a los estratos superiores del terreno. Se consideran adecuadas cuando estos estratos tienen suficiente capacidad portante y condiciones estables. Su diseño debe verificar el cumplimiento de estados límite últimos y de servicio, considerando asentamientos, deslizamientos y volcamiento (INVIAS, 2014, *Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes – Sección 10: Cimentaciones*, Sección 10.2.1).
- **Cimentación profunda:** Una cimentación profunda se emplea cuando los estratos superficiales no son adecuados para soportar cargas estructurales. Estas cimentaciones, como los pilotes o pozos, transmiten las cargas a través de la fricción entre el suelo y el fuste del elemento, o mediante la resistencia por punta en una capa competente a mayor profundidad (INVIAS, 2014, *Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes – Sección 10: Cimentaciones*, Sección 10.2.2).
- **Método α (Alpha):** El método α es una metodología empírica utilizada para estimar la fricción lateral movilizada en pilotes que atraviesan suelos cohesivos. Esta fricción se calcula como el producto entre la resistencia al corte no drenada del suelo (Su) y un coeficiente de adherencia α, que depende de la consistencia del suelo. La resistencia por punta se obtiene con el valor de Nc multiplicado por Su. Este método es especialmente útil en arcillas blandas, normalmente consolidadas, y permite aproximaciones razonables en etapas de diseño preliminar (INVIAS, 2014, *Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes – Sección 10: Cimentaciones*, Artículo 10.7.3.8.6b).

- **Método β (Beta):** El método β se emplea para estimar la fricción lateral desarrollada por pilotes en suelos granulares, como arenas y gravas. Esta resistencia se relaciona directamente con la presión vertical efectiva del suelo, multiplicada por un coeficiente empírico β que varía según el tipo de suelo y profundidad. Aunque es útil en suelos friccionantes, su aplicación en suelos cohesivos blandos puede subestimar la resistencia real (INVIAS, 2014, *Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes – Sección 10: Cimentaciones*, Artículo 10.7.3.8.6c).

MARCO CONTEXTUAL

Ubicación geográfica y características del territorio

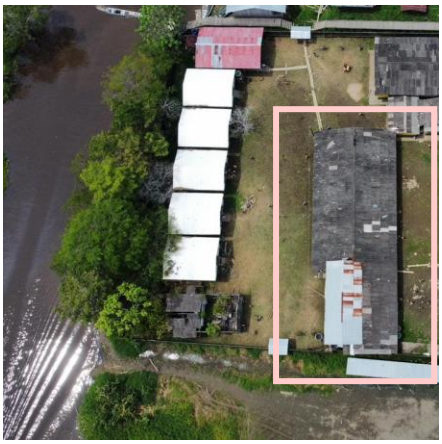
Riosucio, Chocó, se encuentra en la región del Bajo Atrato, una zona caracterizada por su baja altitud y la proximidad con el río Atrato. Esta ubicación lo convierte en un área propensa a inundaciones recurrentes, principalmente durante las temporadas de lluvias intensas (IDEAM, s.f.-b). El terreno predominante es de origen sedimentario, con suelos de baja capacidad portante que dificultan la estabilidad de estructuras convencionales (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2019).

Ilustración 3 - Ubicación Riosucio, Choco, Colombia.



Nota: Tomado de Google Earth (earth.google.com)

Ilustración 4 - Zona de estudio, Riosucio, Choco, Colombia



Nota: Tomado de Google Earth (earth.google.com)

Condiciones climáticas e hídricas de la región

El clima en Riosucio es tropical húmedo, con precipitaciones constantes a lo largo del año y un alto índice de humedad relativa. Las lluvias torrenciales generan desbordamientos del

río Atrato y sus afluentes, lo que provoca anegamientos en gran parte del municipio, afectando especialmente las zonas bajas donde se ubican comunidades vulnerables y centros educativos (IDEAM, s.f.-b).

El nivel freático en la región es superficial, lo que significa que la saturación del suelo ocurre con rapidez, reduciendo la efectividad de métodos de cimentación tradicionales (Ministerio de Vivienda, 2022). Estas condiciones exigen soluciones constructivas adaptadas a la dinámica hídrica del territorio.

Problemática de inundaciones en Riosucio, Chocó

La dinámica hídrica de Riosucio ha representado históricamente un desafío para el desarrollo urbano y social del municipio. Las frecuentes crecidas del río Atrato, junto con las limitaciones naturales del terreno sedimentario y la alta pluviosidad, generan condiciones recurrentes de anegamiento, especialmente en sectores planos y sin adecuadas soluciones de drenaje (CLOPAD, 2011; IGAC, 2019). Estas condiciones afectan no solo a las viviendas, sino también a los equipamientos públicos como las instituciones educativas.

La zona de intervención del presente estudio, correspondiente a una sección aún no elevada de la Institución Educativa Saulo Sánchez, como se observa en la ilustración 4 (zona de contorno rojo), se encuentra expuesta a estas condiciones de riesgo hídrico. A diferencia de otros bloques que ya han sido adaptados mediante soluciones constructivas elevadas, esta parte del plantel permanece al nivel del terreno natural, lo cual incrementa su vulnerabilidad estructural y funcional frente a eventos de inundación. La saturación rápida del suelo y la imposibilidad de evacuar eficientemente el agua acumulada comprometen la durabilidad de las instalaciones y su seguridad durante épocas de lluvia intensa (IDEAM, s.f.-a; Ministerio de Vivienda, 2022).

Ilustración 5. Lote de la zona de estudio



Nota: Tomado de Google Earth (earth.google.com)

Impacto social y educativo de la problemática

La recurrencia de eventos de inundación no solo afecta la infraestructura física de las instituciones educativas, sino que también genera consecuencias significativas sobre la calidad y continuidad de los procesos pedagógicos. En comunidades como Riosucio, donde la movilidad depende en gran medida del transporte fluvial y el acceso terrestre se ve interrumpido con facilidad, las condiciones climáticas extremas pueden conllevar a la suspensión prolongada de clases y a la reducción de la cobertura educativa (UNESCO, 2022; Banco Mundial, 2021).

Esta situación incrementa las brechas educativas y limita las oportunidades de desarrollo para niños y jóvenes en contextos rurales. La inestabilidad de las instalaciones, junto con el temor a posibles afectaciones durante las crecientes, también repercute en la percepción de seguridad y en la confianza de la comunidad educativa. En este sentido, se evidencia la necesidad de incorporar soluciones estructurales que respondan a las particularidades del territorio y contribuyan a la resiliencia del entorno escolar.

ANÁLISIS GEOTÉCNICO PRELIMINAR

Revisión crítica del estudio de suelos referenciado

Para el desarrollo de la propuesta del diseño de la estructura palafítica en la Institución Educativa Saulo Sánchez en Riosucio, Chocó, se tomó como referencia el estudio geotécnico elaborado por MHD Ingeniería S.A.S (2022), correspondiente al proyecto de construcción de 9 aulas y obras complementarias ubicado adyacente al área propuesta para la intervención. La proximidad entre ambas áreas justifica razonablemente el uso de este estudio como base para realizar estimaciones iniciales, debido a las similitudes geográficas y condiciones generales del terreno.

Como se observa en la Ilustración 4, el polígono rojo corresponde al área de estudio del presente análisis y el polígono amarillo delimita la zona cubierta por el estudio geotécnico referenciado, lo que evidencia su adyacencia. En todo caso, los parámetros de diseño se deben verificar y ajustar con el estudio de suelos específico del área en rojo.

La revisión técnica del estudio aporta los siguientes aspectos relevantes:

- **Caracterización Geotécnica:** De acuerdo con los resultados del análisis granulométrico, se observa que en la mayoría de los estratos evaluados el porcentaje de partículas que pasa por el tamiz No. 200 supera el 50%. Según la clasificación del sistema unificado de suelos (USCS), y de acuerdo con lo establecido por la norma ASTM D2487-17, este valor indica un comportamiento predominantemente cohesivo. Además, los valores del índice plástico (IP) se encuentran entre el 8% y el 18%, correspondientes a plasticidad baja–media.

  En ese sentido, la caracterización general del suelo debe abordarse considerando un comportamiento cohesivo, lo cual será fundamental para los análisis que se desarrollarán

en los siguientes apartados. Cabe resaltar que esta información tiene un carácter preliminar y será complementada mediante el uso de correlaciones empíricas reconocidas, con el fin de establecer parámetros de diseño representativos para el sistema estructural propuesto.

- **Nivel Freático:** El estudio señala un nivel freático superficial, ubicado aproximadamente a un metro de profundidad. Esta información es consistente con la proximidad al río Atrato y confirma la idoneidad de soluciones constructivas adaptadas a condiciones de saturación frecuentes y posibles inundaciones periódicas.
- **Capacidad Portante y Capacidad de Carga:** El informe proporciona recomendaciones para cimentaciones superficiales, sugiriendo una capacidad portante admisible aproximada de 7,8 ton/m². Dadas las características de saturación y susceptibilidad a inundaciones, es aconsejable complementar estas recomendaciones con análisis específicos para cimentaciones profundas, como pilotes, para garantizar una mejor adecuación y seguridad del diseño preliminar propuesto.
- **Recomendaciones adicionales:** El estudio aporta información útil y consistente sobre las condiciones generales del suelo. Aun así, por no corresponder exactamente al punto de estudio, se recomienda realizar sondeos y ensayos puntuales en el sitio para evitar incertidumbre.

En concordancia, el estudio geotécnico revisado es un insumo adecuado para la fase preliminar del diseño. Sin embargo, es necesario complementarlo con ensayos en el área exacta de intervención para obtener datos propios del terreno. Con esa información se ajustarán los parámetros de cálculo y se reducirá la incertidumbre.

Ensayos geotécnicos de laboratorio y de campo considerados

En el estudio de suelos referenciado se llevaron a cabo ensayos básicos tanto de campo como de laboratorio, cuyos resultados permitieron realizar una caracterización inicial del perfil geotécnico. Estos ensayos constituyen la base para estimar los parámetros necesarios en el análisis conceptual del sistema de cimentación profunda.

Entre los ensayos de campo, se realizó el Standard Penetration Test (SPT) a distintas profundidades, registrando el número de golpes por intervalos de penetración y permitiendo determinar la resistencia relativa del suelo. Además, se documentó la profundidad de los estratos y su clasificación visual y táctica, asignando grupos del sistema USCS (Unified Soil Classification System).

Los ensayos de laboratorio incluyeron la determinación del contenido de humedad natural (w), granulometría (% de finos F) y límites de consistencia (LL, LP e IP) en algunas muestras representativas. Estos datos resultan fundamentales para inferir el comportamiento del suelo frente a cargas y para aplicar correlaciones empíricas.

La siguiente tabla resume los resultados obtenidos en los sondeos realizados:

Tabla 2. Resultados de ensayos de laboratorio y de campo del estudio de suelos referenciado

Sondeo	tipo	Profundidad			SPT			w (%)	Granulometría	Límites de consistencia			USCS
		Inicio	Fin	Hprom	0-15	15-30"	12-18"		F(%)	LL	LP	IP	
1	SPT	0,00	1,50	0,75	2	2	3	23,3	37,9	NL	NP	NP	SM
1	SPT	1,50	3,00	2,25	2	3	3	24,6	38,9	NL	NP	NP	SM
1	SPT	3,00	4,50	3,75	2	3	4	24,9	41,7	NL	NP	NP	SM
1	SPT	4,50	6,00	5,25	2	3	4	25,2	89,1	25,9	20,6	5,3	ML
2	SPT	0,00	1,50	0,75	2	3	3	17,4	70,0	30,2	27,7	2,5	ML
2	SPT	1,50	3,00	2,25	2	3	3	17,6	67,9	31,1	27,4	3,7	ML

Sondeo	tipo	Profundidad			SPT			w (%)	Granulometría	Límites de consistencia			USCS
		Inicio	Fin	Hprom	0-15	15-30"	12-18"		F(%)	LL	LP	IP	
2	SPT	3,00	4,50	3,75	2	3	5	33,0	35,3	NL	NP	NP	ML
2	SPT	4,50	6,00	5,25	2	4	5	34,3	35,9	NL	NP	NP	ML
3	SPT	0,00	1,50	0,75	2	3	3	21,7	94,1	38,1	32,1	6,0	ML
3	SPT	1,50	3,00	2,25	2	3	4	22,1	93,2	38,1	33,2	4,9	ML
3	SPT	3,00	4,50	3,75	2	3	5	16,0	98,7	48,5	34,3	14,2	ML
3	SPT	4,50	6,00	5,25	2	4	5	30,9	91,9	26,7	25,4	1,4	ML
4	SPT	0,00	1,50	0,75	2	2	3	18,5	97,6	36,1	29,5	6,7	ML
4	SPT	1,50	3,00	2,25	2	3	5	19,1	96,4	36,9	30,1	6,9	ML
4	SPT	3,00	4,50	3,75	2	4	5	16,2	97,1	35,2	25,6	9,6	ML
4	SPT	4,50	6,00	5,25	2	4	7	17,2	96,8	35,2	25,3	9,9	ML
5	SPT	0,00	1,50	0,75	2	3	3	28,3	95,4	47,8	34,9	12,9	ML
5	SPT	1,50	3,00	2,25	2	3	5	27,9	94,1	47,7	35,0	12,7	ML
5	SPT	3,00	4,50	3,75	2	4	6	21,6	95,9	38,0	27,3	10,6	ML
5	SPT	4,50	6,00	5,25	2	4	8	22,5	95,3	38,8	28,8	10,0	ML
6	SPT	0,00	1,50	0,75	2	3	4	22,7	76,0	40,7	32,1	8,6	ML
6	SPT	1,50	3,00	2,25	2	3	5	23,1	76,5	41,7	32,3	9,5	ML
6	SPT	3,00	4,50	3,75	2	4	5	22,5	77,0	32,9	27,6	5,3	ML
6	SPT	4,50	6,00	5,25	2	4	6	23,2	77,1	32,7	28,2	4,5	ML
7	SPT	0,00	1,50	0,75	2	3	3	17,1	48,8	NL	NP	NP	SM
7	SPT	1,50	3,00	2,25	2	4	5	17,6	49,7	NL	NP	NP	SM
7	SPT	3,00	4,50	3,75	2	4	6	17,8	48,8	NL	NP	NP	SM
7	SPT	4,50	6,00	5,25	2	4	8	17,7	49,6	NL	NP	NP	SM
8	SPT	0,00	1,50	0,75	2	3	4	18,3	69,2	43,0	30,7	12,3	ML
8	SPT	1,50	3,00	2,25	2	3	4	18,8	67,8	43,2	31,1	12,1	ML
8	SPT	3,00	4,50	3,75	2	4	5	36,0	91,8	38,8	30,0	8,8	ML
8	SPT	4,50	6,00	5,25	2	4	5	35,9	91,0	38,6	30,4	8,2	ML

Nota. Adaptado del estudio de suelos de MHD Ingeniería S.A.S. (2022).

Cabe aclarar que, aunque estos ensayos son limitados en cuanto a cobertura y profundidad, son suficientes para establecer rangos preliminares de parámetros que se emplearán en apartados posteriores.

Correlaciones utilizadas y análisis del tipo de suelo

Para la estimación de los parámetros geotécnicos fundamentales del perfil evaluado, se aplicaron correlaciones empíricas reconocidas en la literatura técnica, las cuales permiten inferir propiedades a partir de ensayos de campo y laboratorio como el SPT, la granulometría y los límites de consistencia. A continuación, se presentan las correlaciones utilizadas:

- **Peso unitario húmedo:** El cálculo del peso unitario húmedo se realizó a partir de los valores de humedad natural, índice de vacíos (e) y gravedad específica de los sólidos(Gs), los cuales fueron tomados de las Tablas 3, 4 y 5, respectivamente. Para ello, se aplicó la siguiente expresión:

$$\gamma = \frac{(1+w)G_s\,\gamma_w}{1+e}$$

Tabla 3. Densidades típicas y otras propiedades de los suelos

Table 3.3 Typical densities and other properties of soils

Soil type	*Moisture content w* (%)	*Bulk density* ρ (Mg/m^3)	*Dry density* ρ_D (Mg/m^3)	*Voids ratio* e	*Porosity* n (%)	*Degree of saturation* S (%)
Dry uniform sand, loose	0	1.36	1.36	0.95	49	0
Well-graded sand	7.5	1.95	1.81	0.46	32	43
Soft clay	54	1.67	1.07	1.52	60	99.5
Firm clay	22	1.96	1.61	0.68	41	87
Stiff glacial till	9.5	2.32	2.12	0.27	21	95
Peat	220*	0.98	0.31	3.67	78	85

Nota. Tomado de Head (2006).

Tabla 4. Datos promedios recopilados

Description	USCS	min	max	Ave	Reference
Poorly graded sands, gravelly sands, with little or no fines	SP-SM	0,38	0,84	0,61	[1], [2]
Poorly graded sands, gravelly sands, with little or no fines	SW-SM	0,38	0,79	0,59	[1], [2]
Silty sands	SM	0,33	0,98	0,66	[1], [2]
Sandy silt	SC-SM	0,33	0,9	0,62	[1], [2]
Inorganic silts, silty or clayey fine sands, with slight plasticity	ML	0,26	1,28	0,77	[1]
Uniform inorganic silt	(ML)	0,4	1,1	0,75	[3]
Inorganic clays, silty clays, sandy clays of low plasticity	CL-ML	0,48	0,72	0,60	[1]

Nota. Datos tomados de 1. Swiss Standard SN 670 010b (n.d.); 2. Das (2008) y 3. Hough (1969).

Tabla 5. Valores típicos de los suelos en general

Specific Gravity	Average for clays	2,72
	Average for sands	2,67

Nota. Datos tomados referencias tabla anterior

- **Resistencia al corte no drenada:** La resistencia al corte no drenada se determinó a partir de los rangos propuestos por Chen y Kulhawy (1993), los cuales se encuentran citados en el libro *Experimental Soil Mechanics* de J.P. Bardet (1997). Asimismo, se consideraron las correlaciones presentadas en las Tablas 7 y 8, como complemento a los valores de referencia utilizados en la estimación.

Tabla 6. Resultados de ensayos CU y UU para estimación de la resistencia al corte no drenada

Database for undrained shear strength of various clays from CU and UU tests (Chen and Kulhawy, 1993)

Site	Soil description	LL (%)	PL (%)	w (%)	Total unit weight (kN/m³)	Sensitivity	Depth (m)	OCR	S_u (kPa)	$S_u(UU)/S_u$	S_u/σ'_0
Boston	Medium blue clay	49	25	35	18.7		12.2	4	106	0.74	0.8
		49	26	38	18.4		18.3	1.8	86.6	0.77	0.48
		39	21	36	19.3		27.4	1	84.5	0.58	0.32
Lagunillas	High plasticity clay	61	24				6.2	1.3	23.5	0.75	0.4
		61	24				6.4	1.3	24.3	0.64	0.41
Kawasaki	High plasticity clay	65	34		15.1		20.5	1.2	76.6	0.64	0.49
		68	32		15.1		25	1.2	82.8	0.58	0.45
		70	27		15.6		35	1.2	118.7	0.57	0.48
Beaumont	High plasticity clay with fissures and slickensides	61	21	25	19.8		0–8	7.5	75	1.2	1.58
Montgomery	Light grey sandy clay with dessication	31	15	20	20.9		9–17		162	0.74	1.14
Hamilton	Firm to stiff grey silty clay	32	18	30			3–6	3.2	47.8	0.82	1.16
		44	24	31			6–9	2.2	50.2	0.93	0.73
		39	22	33			11	1.2	78.9	0.55	0.78
Lackland	Expansive black to gray clay	60	18				0–3	5	57.4	0.84	1.48
		73	24	30			3–6	4.8	86.	0.95	1.12
	Fissured expansive Clay shale	86	28	29			6–9	6.5	160	1.13	1.6
		95	27	29			9–12	8.5	211	0.96	1.47
Rio de Janero	Soft gray clay	135	50	170	13.2	2.6	2–4	2.1	6.2	0.83	0.62
Guanabara bay		125	60	140	13.2	2.6	4–6	2	8.1	0.73	0.1
		110	45	125	13.2	2.6	6–8	1.7	13.5	0.69	0.46
		90	35	110	13.2	2.6	8–10	1.7	13.2	0.65	0.44
South Padre	Medium to stiff clay	57	26	29			6–12	1.2	86.1	0.61	0.6

Nota. Recopilación de resistencia al corte no drenada tomada de Chen & Kulhawy (1993), citados en Bardet (1997).

Tabla 7. Correlaciones resistencia al corte No Drenada

ID	Autor	Correlación
1	Budhu (2010)	Ver tabla adyacente
2	US Dep. of interior (2010)	Ver tabla adyacente
3	Hara et al. (1971)	$S_U = \sigma'_V * 0.29 * (N_{60})^{0.72}$
4	Terzaghi & Peck (1967)	$S_U = \sigma'_V * 0.06 * N_{60}$
5	Stroud-A (1974)	Ver tabla adyacente
6	Stroud (1974)	$S_U = 0.42 * N$
7	BS5930 (1981)	Ver tabla adyacente
8	Nixon (1982)	$S_U = 0.5 * 24 * N$
9	Decourt (1982)	$S_U = 15 * N_{60}$
10	Ajayi & Balogun (1998)	$S_U = 1.39 * N + 74.2$
11	Sivrikaya & Togrol (2002)	$S_U = 4.93 * N_{60}$
12	Sivrikaya (2009)	$S_U = 4.43 * N_{60} - 1.29 * w_n + 1.06*LL + 1.02*IP$
13	Sivrikaya (2009)	$S_U = 3.24 * N_{60} - 0.53 * w_n - 0.43 * LL + 2.14*IP$
14	Sivrikaya (2009)	$S_U = 1.5 * N - 0.1 * w_n - 0.9 * LL + 2.4*IP + 21.1$

Nota. Tabla de correlaciones propuestas por diversos autores, como se indica en la misma

Tabla 8. Rangos de resistencia al corte No Drenada

Budhu (2010)

N_{60}		Descripción	S_U (kPa)	
0	2	Muy blanda	< 10	
3	5	Blanda	10	25
6	9	Media	25	50
10	15	Media - Dura	50	100
15	30	Dura	100	200
> 30		Muy Dura	> 200	

US Department of interior (2010)

N_{60}		Descripción	S_U (kPa)	
0	2	Muy blanda	< 12.5	
2	4	Blanda	12.5	25
4	8	Media	25	50
8	15	Media - Dura	50	100
15	30	Dura	100	200
> 30		Muy Dura	> 200	

Stroud (1974)

IP		S_U (kPa)
< 20		(6 - 7) * N
20	30	5 * N
> 30		4.2 * N

BS5930 (1981)

N_{60}		Descripción	S_U (kPa)	
0	2	Muy blanda	< 10	
2	4	Blanda	10	25
4	8	Media	20	50
8	15	Media - Dura	40	100
15	30	Dura	75	150
> 30		Muy Dura	> 150	

Nota. Tabla de correlaciones propuestas por diversos autores, como se indica en la tabla 7

- **Módulo de elasticidad:** Su valor se determinó a partir de los resultados de los ensayos de campo, apoyándose en las correlaciones presentadas en las Tablas 5.8 y 5.9.

Tabla 9. Correlaciones modulo elástico

ID	Autor	Correlación
1	Bowles (1986)	$E_S = (4200 - 142.54*IP + 1.73*IP^2 - 0.0071*IP^3) * S_U$
2	Bowles (1986)	$E_S = 200 * S_U$
3	AASHTO (2006)	Ver tabla adyacente
4	USACE	Ver tabla adyacente
5	Obrzud (2006)	Ver tabla adyacente

Nota. Tabla de correlaciones propuestas por diversos autores, como se indica en la misma

Tabla 10. Tablas de rangos de modulo elástico

AASHTO (2004)

	Descripción	E_S (kPa)	
Arcilla	Muy blanda	2500	5000
	Blanda	5000	20000
	Media	20000	50000
	Dura	50000	100000
Arena	Suelta	8000	12000
	Media	12000	20000
	Densa	20000	50000

USACE

	Descripción	E_S (kPa)	
Arcilla	Muy blanda	500	5000
	Blanda	5000	20000
	Media	20000	50000
	Dura	50000	100000
Arena	Suelta	10000	15000
	Densa	15000	20000
	Con gravas	20000	200000

Obrzud (2012)

	Descripción	E_S (kPa)	
Arcilla	Muy blanda	500	5000
	Blanda	5000	8000
	Media	8000	30000
	Dura	30000	70000
Arena	Suelta	7000	12000
	Media	12000	20000
	Densa	20000	30000

Nota. Tabla de rangos propuestas por diversos autores, como se indica en la tabla 9

Tabla 11. Módulo de elasticidad (MPa) (Bardet, 1997).

Soil group	Soil type	Bowles (1988)	Cernica (1995)	Converse (1962)	Hallam et al. (1978)	Hunt (1986)
Organic soil	Muck	—	—	0.5–3.5	—	—
	Peat	—	—	—	0.4–1	—
		—	—	—	0.8–2	—
Clay	Very soft	2–15	—	—	—	—
	Soft	2–25	3	—	1–3	2–4
	Medium	15–50	7	—	—	—
	Stiff	—	—	—	2.5–5	8–19
	Weak plastic	—	—	1.4–4	—	—
	Stiff plastic	—	—	4.2–8	—	—
	Semi-firm	—	—	—	5–10	—
	Semi-solid	—	—	6.9–14	—	—
	Hard	50–100	14	—	—	8–19
	Sandy	25–250	36	—	—	—
	Boulder clay, solid	—	—	—	30–100	—
Silt	Silt	2–20	—	—	3–10	2–19
	Soft, slightly clayey sea silt	—	—	—	2–5	—
	Soft, very strongly clayey silt	—	—	—	0.5–3	—
	Soft	—	—	—	4–8	—
	Semi-firm	—	—	—	5–20	—
Sand	Loose	10–25	15	10–21	20–80	10–29
	Medium	—	—	—	50–150	29–48
	Dense	50–81	80	52–83	49–78	48–77
	Silty	5–20	—	—	—	—
Gravel	Loose	50–150	100	—	—	29–77
	Dense	100–200	150	102–204	—	96–192
Gravel	Gravel without sand	—	—	—	100–200	—
	Coarse gravel, sharp edged	—	—	—	150–300	—
Loess		14–60	—	—	—	14–58
Glacial till	Loose	10–150	—	—	—	—
	Dense	150–720	—	—	—	—
	Very dense	500–1440	—	—	—	—

Nota. Datos tomados de Bardet (1997).

- Suelos licuables: La licuación es un fenómeno que ocurre en suelos granulares sueltos y saturados, principalmente arenas, cuando una carga cíclica —como la provocada por un sismo— genera un aumento en la presión de poros que no puede disiparse a tiempo, reduciendo el esfuerzo efectivo y provocando una pérdida súbita de resistencia (Seed & Idriss, 1971; Bardet, 1997). Esta condición puede desencadenar deformaciones plásticas significativas, incompatibles con estructuras en superficie.

  El comportamiento esfuerzo-deformación del suelo durante la licuación está fuertemente influenciado por parámetros como la densidad relativa, el número de ciclos de carga, los esfuerzos efectivos de confinamiento y la relación entre los índices de vacíos máximos y mínimos (Boulanger & Idriss, 2014).

  El análisis del potencial de licuación se realiza frecuentemente mediante el método simplificado propuesto por Seed & Idriss (1971), el cual estima un factor de seguridad $FS_{liq} = \frac{CRR}{CSR}$ como la relación entre la resistencia cíclica del suelo (CRR) y la demanda sísmica impuesta (CSR)

  Para que un suelo presente susceptibilidad a la licuación, generalmente deben cumplirse las siguientes condiciones: saturación del 100 %, baja compactación (N<10), nivel freático elevado, contenido de finos menor al 15 %, profundidad de la capa licuable menor a 15 m, magnitud sísmica ≥ 5.5, e índices de plasticidad bajos (IP ≤ 12 con w/LL > 0.85) (Bardet, 1997; Kramer, 1996).
- **Suelos expansivos:** Su evaluación se realiza mediante criterios de caracterización, a fin de determinar su grado de acción. La NSR-10 presenta la Tabla H.9.1-1, en la que se clasifica el potencial expansivo de las arcillas en función de parámetros como el límite líquido y el índice de plasticidad.

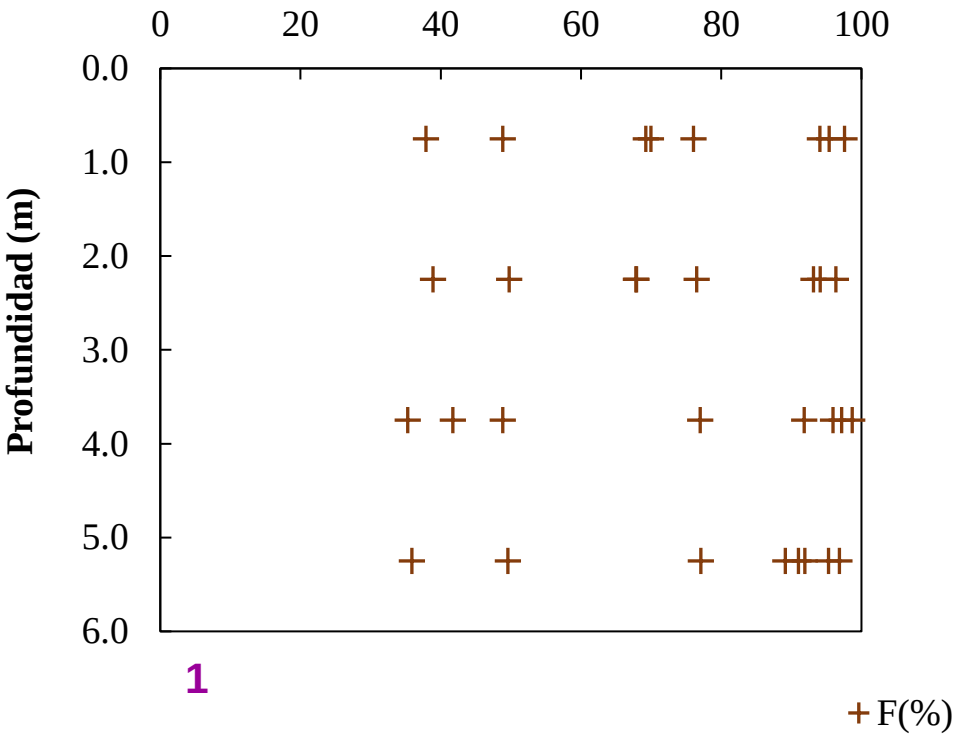
Tabla 12. Clasificación suelos expansivos

Potencial de expansión	Expansión (%) medida en consolidometro bajo presión vertical de 0.07 kgf/cm2	Límite líquido LL en (%)	Límite de contracción en (%)	Índice de plasticidad IP en (%)	Porcentaje de partículas menores de una micra (µ)	Expansión libre EL en (%) medida en probeta
Muy alto	> 30	> 63	< 10	> 32	> 37	> 100
Alto	20-30	50 – 63	6 – 12	23– 45	18 – 37	> 100
Medio	10-20	39 – 50	8 – 18	12 – 34	12 – 27	50 – 100
Bajo	< 10	< 39	> 13	< 20	< 17	< 50

Tabla tomada de NSR-10 (Tabla H.9.1-1)

A continuación, se presentan las gráficas que resumen los parámetros obtenidos a partir de los ensayos de laboratorio referenciados y las correlaciones aplicadas. Estas permiten visualizar las condiciones del suelo:

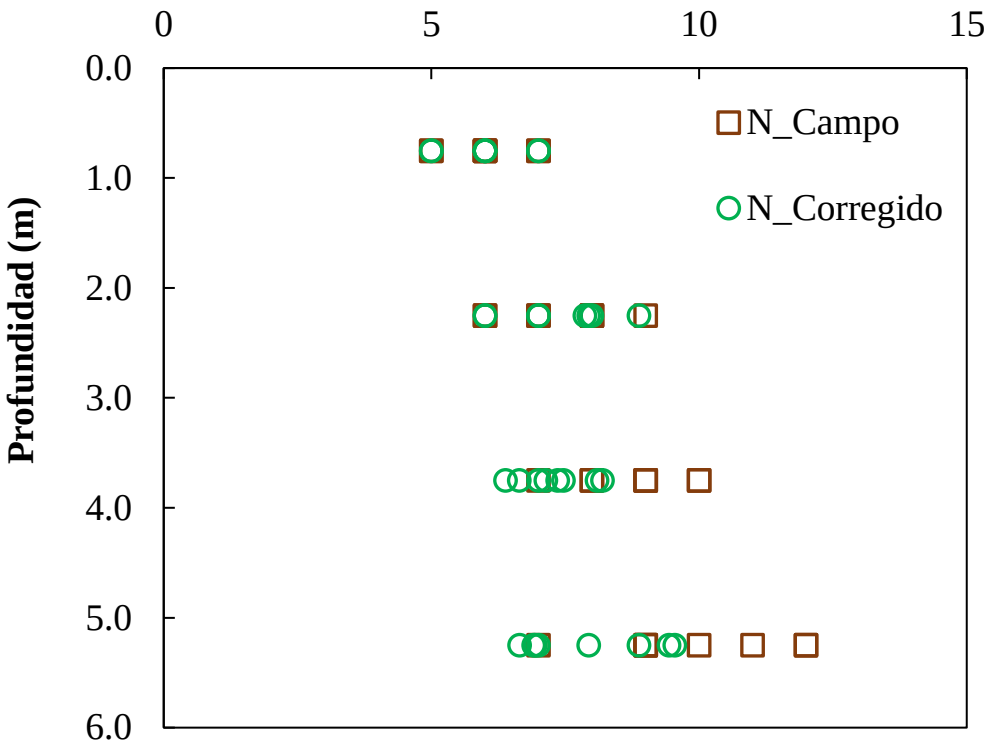
Grafica 1. Granulometría



Nota. Elaboración propia con base en datos del estudio de suelos referenciado

Se gráfica la granulometría, donde se realizó con respecto al tamiz N.º 200, en función de la profundidad (m). Cada cruz representa una muestra por estrato, donde se observa que predominan el porcentaje de finos.

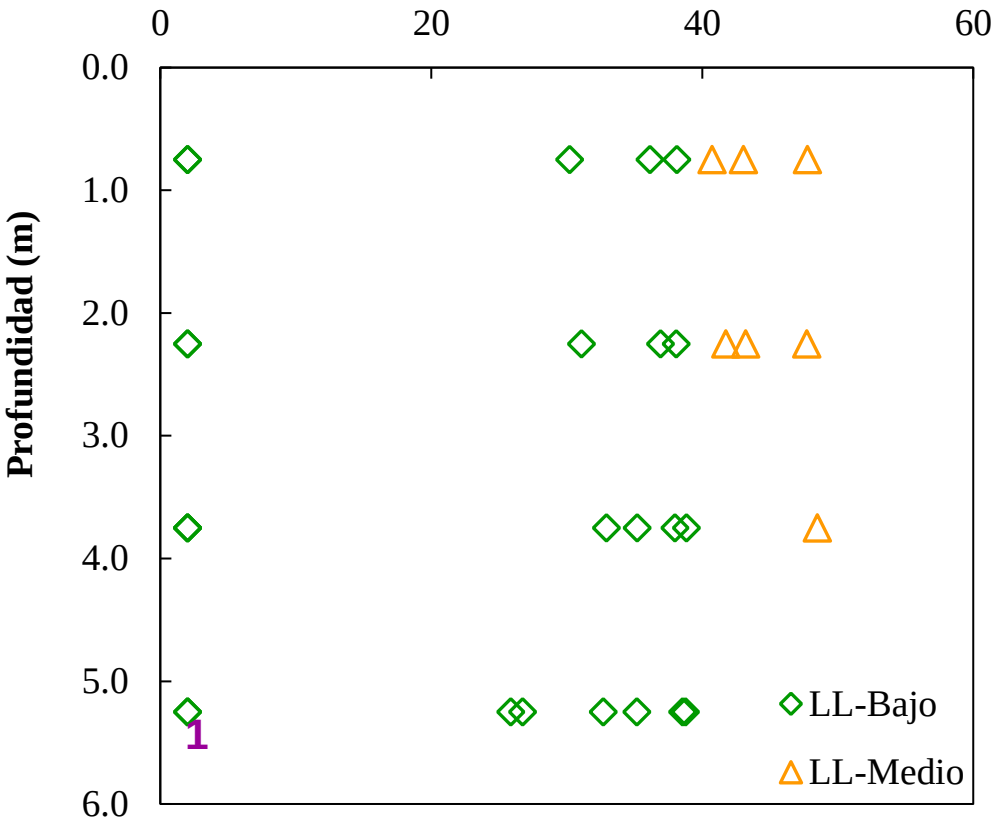
Grafica 2. SPT



Nota. Elaboración propia con base en datos del estudio de suelos referenciado

Se grafican los golpes N campo y corregido del SPT frente a la profundidad (m), los valores se ubican entre 4 y 12 golpes, con predominio de N < 10, indicando resistencia baja a media en los 6 m.

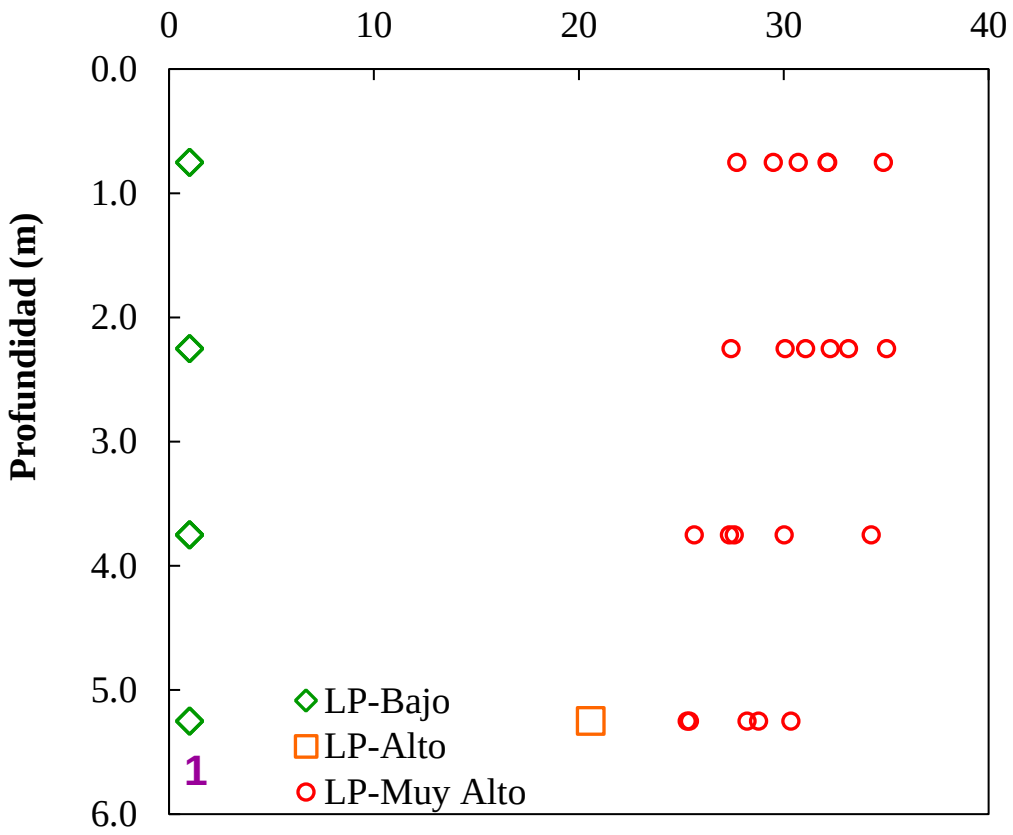
Grafica 3. Limite Liquido (%)



Nota. Elaboración propia con base en datos del estudio de suelos referenciado

Se grafica el Limite liquido (%) en función de la profundidad (m), donde predomina LL bajo, indicando plasticidad baja a media.

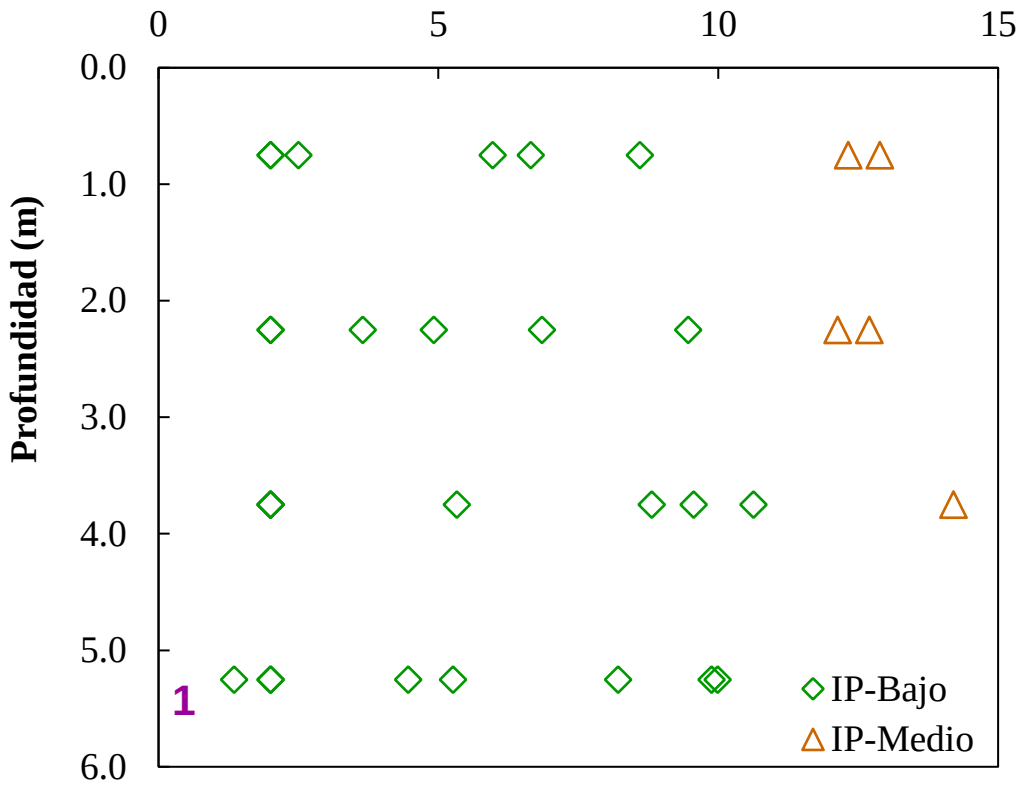
Grafica 4. Limite Plástico



Nota. Elaboración propia con base en datos del estudio de suelos referenciado

Se grafica el límite plástico (%) en función de la profundidad (m). En los estratos de 1–5 m predominan los LP-Muy altos, los LP-Bajos son escasos en comparación y un valor atípico de LP-Alto.

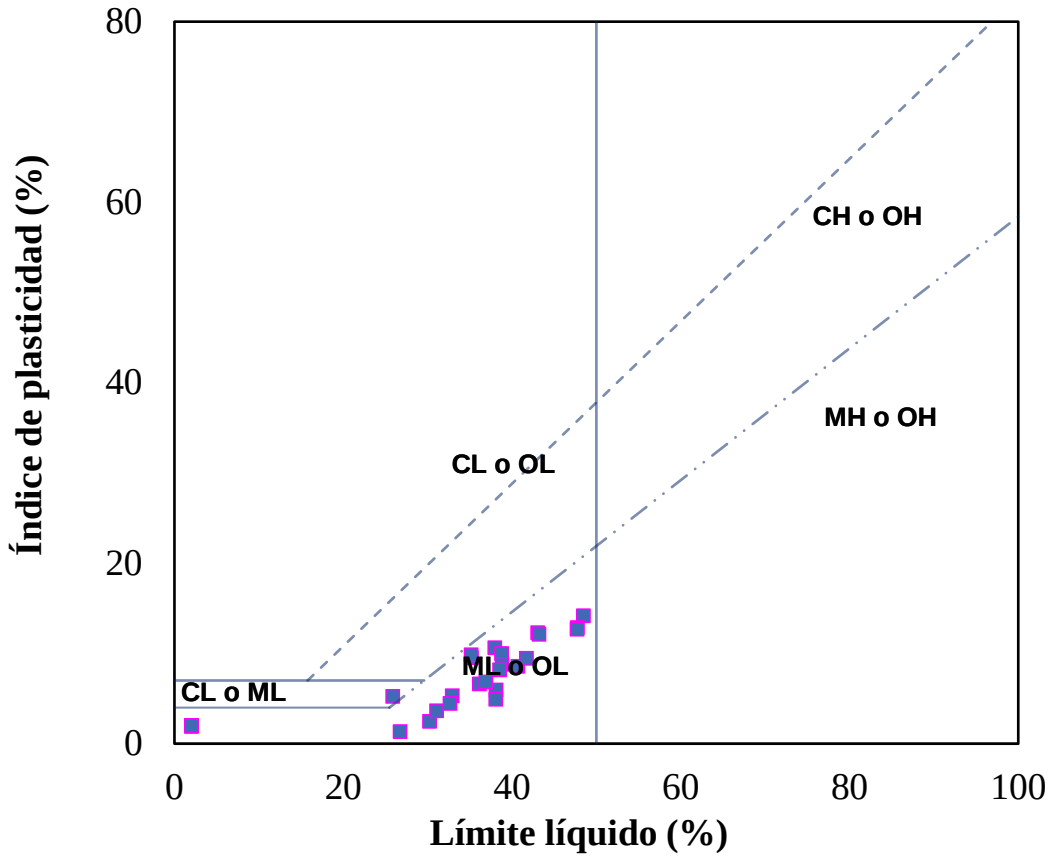
Grafica 5, Índice de Plasticidad



Nota. Elaboración propia con base en datos del estudio de suelos referenciado

Se grafica el índice de plasticidad (%) en función de la profundidad (m), donde predomina IP-Bajo en 0–6 m; aparecen IP-Medio entre 0–4 m, indicando baja plasticidad.

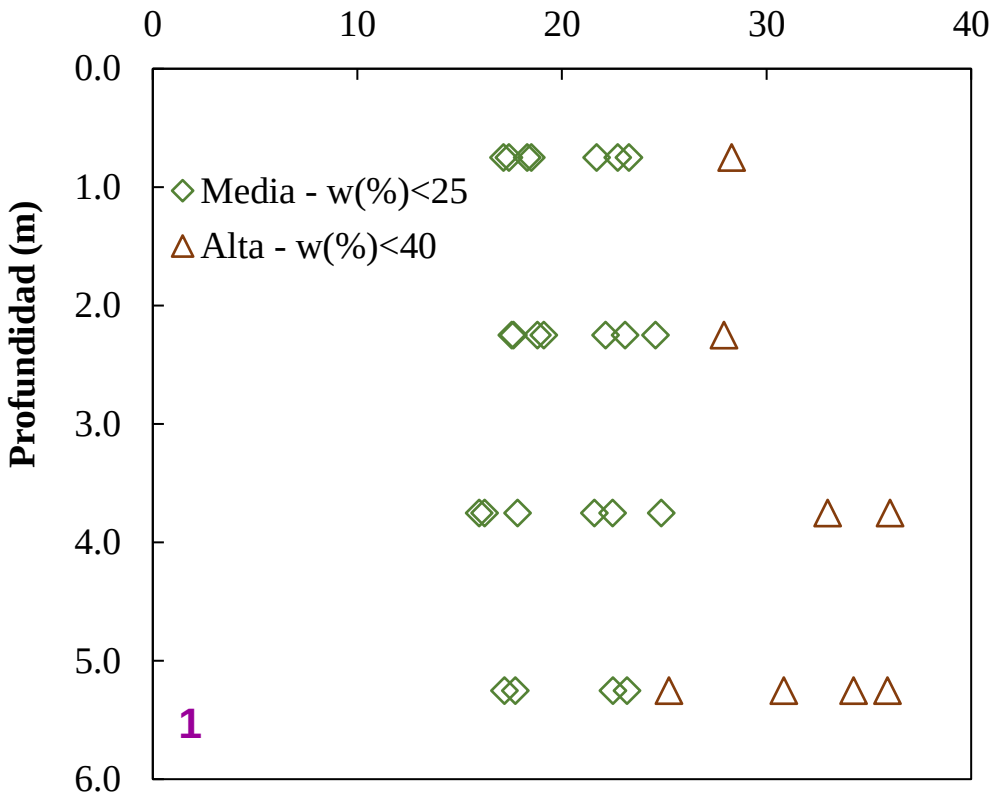
Grafica 6. Carta de Plasticidad de Casagrande



Nota. Elaboración propia con base en datos del estudio de suelos referenciado

Se grafica el IP (%) frente al LL (%). Los puntos se ubican por debajo de la línea A y con LL < 50 %, por lo que corresponden principalmente a ML–OL, en este caso limos de baja plasticidad.

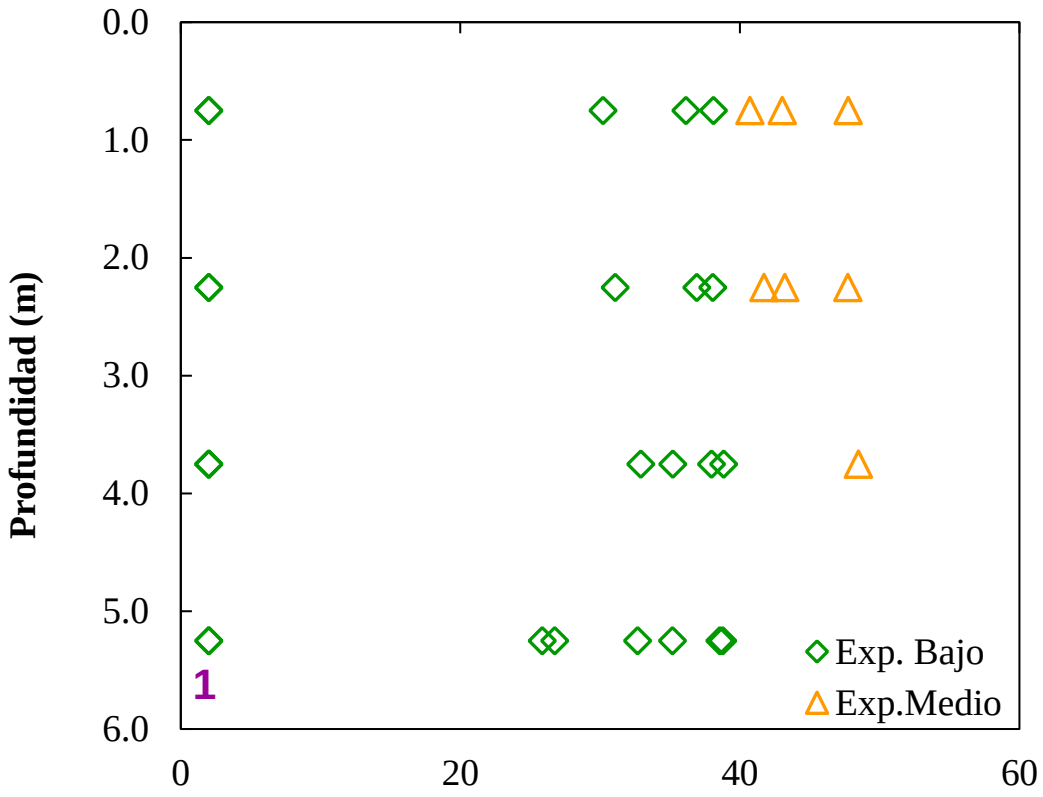
Grafica 7. Humedad Natural (%)



Nota. Elaboración propia con base en datos del estudio de suelos referenciado

Se grafica la humedad (%) en función de la profundidad (m)**,** donde predomina la humedad media; aparecen humedades altas concentradas en 0–3 m y 4–6 m, indicando estratos más saturados en esas profundidades.

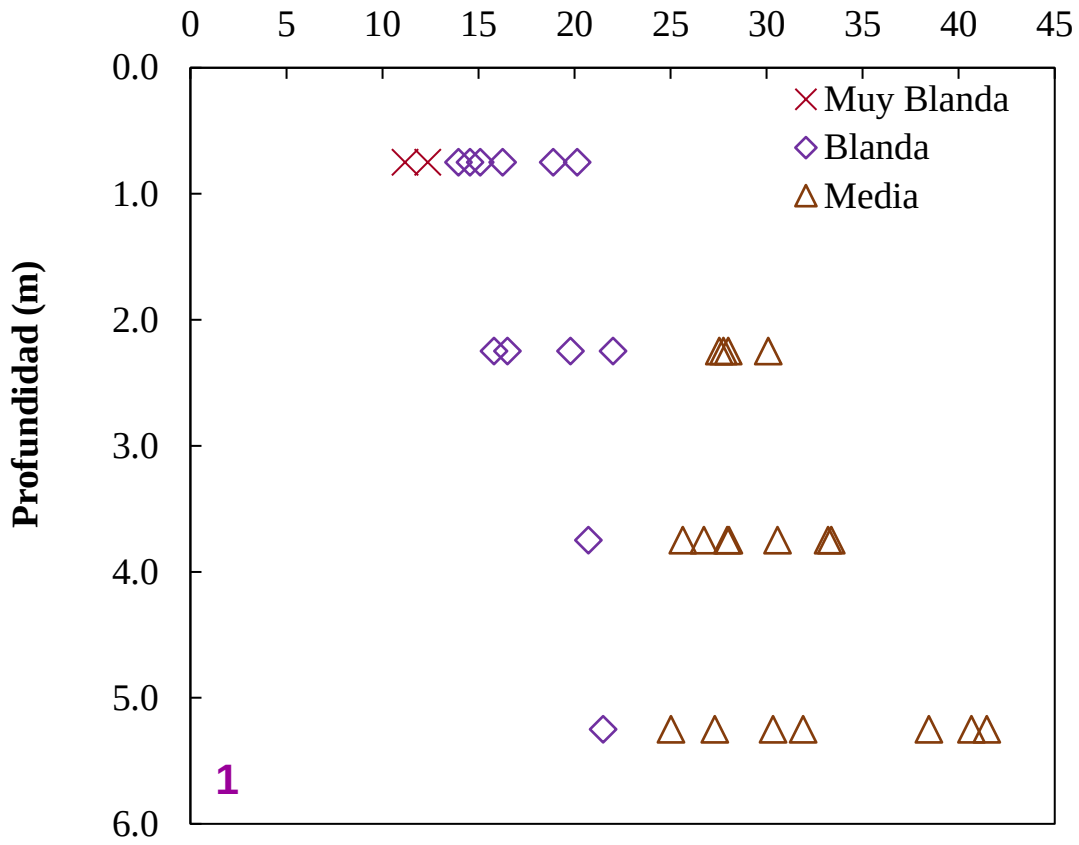
Grafica 8. Expansividad



Nota. Elaboración propia con base en datos del estudio de suelos referenciado

Se grafica la expansividad en función de la profundidad (m), donde predomina la expansividad baja a lo largo de casi todo el perfil (0–6 m), lo que significa que el suelo prácticamente no se hincha ni se encoge con cambios de humedad. Solo aparecen tramos con expansividad media entre 0–3 m y un punto aislado cerca de 4 m.

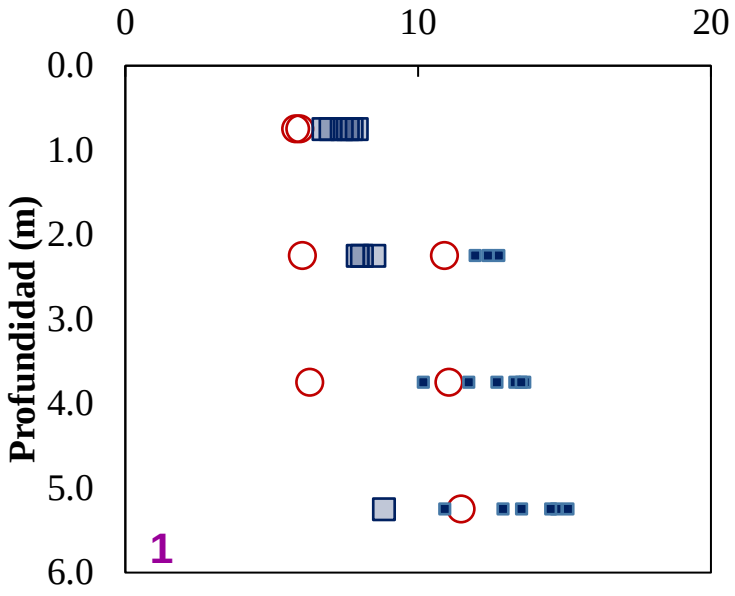
Grafica 9. Su (kPa)



Nota. Elaboración propia con base en datos del estudio de suelos referenciado

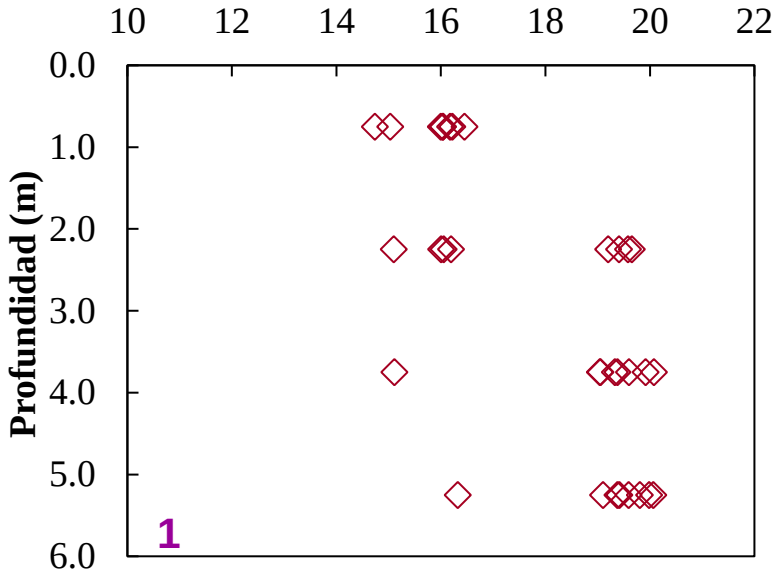
Se grafica la resistencia no drenada (Su) con la profundidad (m). Se observa estratos muy blandos entre 0–1 m, seguido de estratos blandos entre 0,5–3 m, a partir de 2,5–3 m predominan valores de consistencia media hasta 6 m, mostrando que la resistencia aumenta con la profundidad.

Grafica 10. ES (MPa)



Nota. Elaboración propia con base en datos del estudio de suelos referenciado

Grafica 11. Peso Unitario (kN/m3)



Nota. Elaboración propia con base en datos del estudio de suelos referenciado

Se grafica el peso unitario con la profundidad (m). Los valores se ubican entre 14 y 19 kN/m³. En 0–2 m predominan 15–17 kN/m³; entre 3–6 m se concentran 16–18 kN/m³, con valores cercanos a 19 -20 kN/m³, se observa una ligera tendencia a aumentar con la profundidad, consistente con suelos finos húmedos.

Del análisis de los resultados obtenidos a partir de las correlaciones y las gráficas generadas, se puede inferir que el terreno presenta un comportamiento cohesivo, correspondiente a suelos finos de plasticidad baja a media (ML). La granulometría indica porcentajes de finos mayores al 50 %; la carta de plasticidad ubica la mayoría de puntos por debajo de la línea A con LL < 50 % y IP bajo, con tramos medios. La humedad natural es media, con tramos más húmedos. Los SPT (N corregido) y la Su muestran consistencias blandas en los primeros metros y aumento de resistencia con la profundidad.

De acuerdo con la NSR-10 (Título H), la selección del sistema de cimentación debe garantizar los estados límite de falla y de servicio. Cuando los estratos superficiales no controlan los asentamientos en especial en suelos cohesivos blandos y con nivel freático alto, la norma contempla el uso de cimentaciones profundas con pilotes, incluyendo pilotes de fricción para control de asentamientos, que transfieren parte de la carga a estratos más profundos (Consejo Colombiano de Construcción Sismo Resistente, 2010, Título H, H.4.4 y H.4.4.3).

También se contempla el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes (INVIAS, 2014, sección 10.2.2), donde se recomienda el uso de cimentaciones profundas cuando los estratos superficiales no ofrecen condiciones adecuadas de soporte. En este contexto, el empleo de pilotes tipo palafítico permite transferir las cargas a capas más competentes en profundidad, evitando asentamientos diferenciales y proporcionando mayor estabilidad frente a fenómenos como socavación o licuación. Esta solución, además de responder a criterios geotécnicos y

normativos, resulta coherente con las condiciones logísticas y de vulnerabilidad del territorio, proponiendo una alternativa estructural resiliente y funcional para el proyecto.

Se resalta que, aunque los materiales corresponden a limos y no arcillas puras, el comportamiento observado a partir de los índices de plasticidad, la granulometría y los valores de Su permite, bajo criterio técnico, considerar aplicable el método α según lo dispuesto en la Sección 10.7.3.8.6b del CCP (INVIAS, 2014).

DISEÑO DE LA ESTRUCTURA PALAFÍTICA

El proyecto se concibe como un sistema de cimentación palafítica compuesto por pilotes de madera hincados en el terreno, cuya función es transferir las cargas de la edificación hacia estratos más competentes del suelo y elevar la estructura por encima del nivel del terreno natural en un entorno caracterizado por alta humedad y amenaza por inundación.

El análisis geotécnico preliminar permite identificar la presencia de estratos superficiales blandos, un nivel freático elevado y una baja capacidad portante inicial del suelo, lo cual justifica técnicamente la adopción de una cimentación profunda mediante pilotes de fricción. Aunque el diseño se plantea como preliminar, este permite definir parámetros fundamentales como el tipo de pilote, el mecanismo resistente predominante, el orden de magnitud de la profundidad requerida y los rangos de resistencia del suelo que gobiernan el diseño.

El modelo tridimensional desarrollado en Autodesk Revit cumple una función ilustrativa y de apoyo técnico, al permitir visualizar la disposición de los pilotes, su separación, su relación con la plataforma elevada y su inserción en el terreno. Este modelo no corresponde a un diseño arquitectónico ni a un proyecto ejecutivo, sino a una herramienta de apoyo para la comprensión y comunicación del sistema de cimentación propuesto.

A partir de esta caracterización general del sistema de cimentación palafítica, a continuación, se desarrolla el análisis y diseño de la cimentación profunda mediante pilotes.

Cimentación profunda

Con base en los resultados presentados en la sección de análisis geotécnico, donde se evidenció que los estratos superficiales presentan baja a media resistencia, se descarta la viabilidad de una cimentación superficial porque la granulometría muestra cantidad > 50 % en el pasa tamiz No.200 en la mayor parte del perfil; la carta de plasticidad ubica la mayoría de puntos por debajo de la línea A con LL < 50 % e IP de bajo a medio (predomina ML); la humedad natural es media con algunos valores altos; y los SPT corregidos y la Su indican consistencias blandas cerca de la superficie con aumento en profundidad. Por estas condiciones y la inundabilidad del sitio, se adopta cimentación profunda en pilotes tipo palafítico para elevar la estructura y relacionar estratos más competentes.

Asimismo, para suelos cohesivos de baja consistencia, como los determinados en el estudio, resulta aplicable el método α para estimar la resistencia por fuste (INVIAS, 2014, Sección 10.7.3.8.6b), lo que facilita un dimensionamiento seguro y ajustado a las normativas vigentes.

Avalúo de cargas de la superestructura

Para el avaluó de cargas preliminar de la superestructura debemos tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Área de la planta:

$$A_{\text{planta}} = 45{,}45\,\text{m} \cdot 15{,}46\,\text{m} = 702{,}66\,\text{m}^2$$

- Área de la cubierta:

$$A_{\text{cubierta}} = 40\,\text{m} \cdot 13\,\text{m} = 520{,}00\,\text{m}^2$$

- Longitud total de muros:

$$L_{\text{muros}} = 9{,}43m \cdot 6 + 12{,}39m \cdot 3 + 6{,}12m + 15{,}21m \cdot 2 + 4m \cdot 3 = 142{,}29\,\text{m}$$

Carga muerta

- **Losa en madera**

$$\rho = 500\,\text{kg/m}^3$$

$$w_{\text{losa}} = \frac{\rho\, e\, g}{1000}$$

$$= \frac{500\,\text{kg/m}^3 \cdot 0{,}10\,\text{m} \cdot 9{,}81\,\text{m/s}^2}{1000}$$

$$= 0{,}4905\,\text{kN/m}^2$$

$$\text{Carga total losa} = A\, w_{\text{Losa}}$$

$$= 702{,}66\,\text{m}^2 \cdot 0{,}4905\,\text{kN/m}^2$$

$$= 344{,}66\,\text{kN}$$

- **Muros en madera**

$$\rho = 850\,\text{kg/m}^3$$

$$w_{\text{muro}} = e\, h\, \rho\, g$$

$$= (0{,}10\,\text{m})(2{,}50\,\text{m})(850\,\text{kg/m}^3)(9{,}81\,\text{m/s}^2)$$

$$= 2{,}08\ \text{kN/m}$$

$$Q_{muros} = L_{muro}\, w_{muro}$$

$$= 142{,}29\ \text{m} \cdot 2{,}0846\ \text{kN/m}$$

$$= 296{,}62\ \text{kN}$$

- **Cubierta**

Panel: 10–12 kg/m²

Correaje metálico ligero y tornillería: 5–6 kg/m²

$$\text{Fab cubierta} = 18\ \text{kg/m}^2 = 0{,}18\text{kN/m}^2$$

$$Q_{cubierta} = A_{cubierta}\, \text{Fab}_{cubierta}$$

$$= 520{,}00\ \text{m} \cdot 0{,}18\ \text{kN/m}$$

$$= 93{,}60\ \text{kN}$$

Carga muerta total

$$CM_{total} = 44{,}66\ \text{kN} + 296{,}62\ \text{kN} + 93{,}60\ \text{kN} = 434{,}88\text{kN}$$

Las densidades utilizadas en el presente avalúo de cargas se seleccionaron con base en información técnica y catálogos especializados. Para el cálculo de la losa en madera contralaminada (CLT), se adoptó un valor de 500 kg/m³, correspondiente al rango típico reportado para tableros de coníferas en manuales técnicos como el *CLT Handbook* (Canadian Wood Council, 2019) y la guía técnica de Swedish Wood (2019). Para los muros en madera nativa (*Hymenaea oblongifolia*), se empleó una densidad de 850 kg/m³, valor medio dentro del rango de 0.80–0.90 t/m³ reportado en el catálogo *Maderas de Colombia* (WWF Colombia, 2016)

y en estudios académicos sobre especies maderables del Chocó (González et al., 2011). En cuanto a la cubierta, se utilizó un peso superficial equivalente de 0.18 kN/m², calculado a partir de fichas técnicas de paneles sándwich de poliuretano (PU) de 30 mm de espesor, suministradas por Metecno Colombia (2021) y TecnoPanel (2021), que reportan pesos entre 9 y 12 kg/m², incluyendo la corrección por correas y herrajes.

Carga viva

Para el cálculo de la carga viva se adoptó el valor de 2,0 kN/m² correspondiente a salones de clase, establecido en la NSR-10, Título B, Tabla B.4.2.1-1 (Consejo Colombiano de Construcción Sismo Resistente, 2010).

$$\mathrm{CV_{Total}} = 2{,}0\,\mathrm{kN/m^2} \cdot 702{,}66\,\mathrm{m^2} = 1405{,}32\,\mathrm{kN}$$

Carga total de diseño

Para la combinación de cargas se empleó la expresión B.2.4-2 de la NSR-10. Dado que en esta verificación no intervienen acciones de viento, sismo, temperatura ni empujes de suelo/agua, se adoptó únicamente: 1.2 CM+1.6 CV (Consejo Colombiano de Construcción Sismo Resistente, 2010).

$$1{,}2C_M + 1{,}6C_V = 1{,}2 \cdot 434{,}88\,\mathrm{kN} + 1{,}6 \cdot 1405{,}32\,\mathrm{kN} = 2770{,}37\mathrm{kN}$$

Metodología para el cálculo de capacidad de carga de pilotes

Capacidad de carga

La capacidad axial última del pilote se obtiene como la suma de la resistencia por fuste y la resistencia por punta:

$$Q_n = Q_s + Q_p$$

Resistencia por fuste (método α)

Dado que, de acuerdo con la caracterización ya presentada, el comportamiento del subsuelo es predominantemente cohesivo en los estratos relevantes, la fricción lateral se estima mediante el método α:

$$Q_s = \alpha\, S_u\, A_s$$

donde Su es la resistencia al corte no drenado representativa del estrato, α es el coeficiente de adherencia definido según consistencia del suelo y As es el área lateral efectiva del fuste dentro del estrato.

Resistencia por punta

La resistencia de punta se expresa como:

$$Q_p = q_p\, A_p$$

$$A_p = \frac{\pi D^2}{4}$$

donde q_p corresponde a la presión de punta del estrato de apoyo. Para arcillas cohesivas saturadas, el CCP14 recoge la relación práctica. Lo anterior se adopta, porque el estrato de apoyo presenta comportamiento cohesivo en condición no drenada y el CCP14 permite esta aproximación para suelos cohesivos (INVIAS, 2014, Secc. 10.7.3.8.6e).

$$q_p \approx 9\, S_u$$

Resistencia de diseño del pilote

A partir de la capacidad última Qn, la resistencia de diseño del pilote se toma con enfoque ASD (criterio del proyecto) como:

$$R_d = \frac{Q_n}{FS}$$

Dado que la verificación corresponde a carga muerta + carga viva normal (sin acciones de viento, sismo ni empujes seudoestáticos), se adopta FS=3,0, tal como establece la NSR-10 en el Título H, Sección H.4.7 (Tabla H.4.7-1) para esta condición (Consejo Colombiano de Construcción Sismo Resistente, 2010).

Numero de pilotes

Conociendo la carga de diseño de la superestructura y la resistencia de diseño del pilote, el número teórico de pilotes se estima como:

$$N_u = \frac{Carga\ de\ diseño\ de\ la\ superestructura}{R_d}$$

Comparación de diámetros pilote

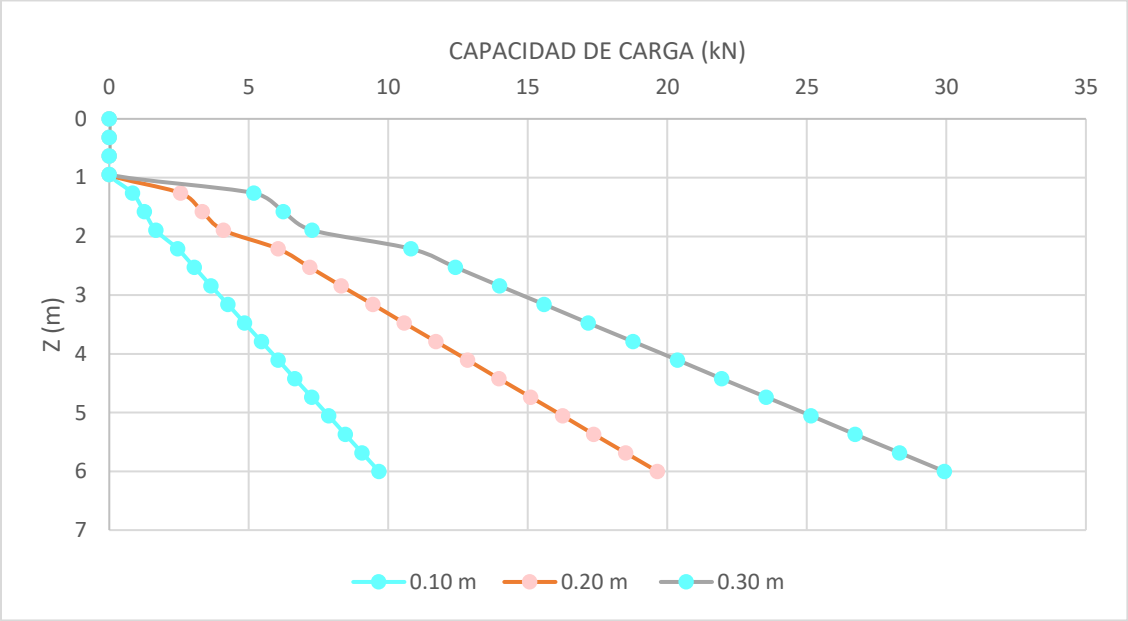
Para efectos de evaluación entre los diámetros Ø0,10, Ø0,20 y Ø0,30 m, la Tabla 13 y la Grafica 15, resume los resultados obtenidos de acuerdo con la metodología anterior (para mayor apreciación de cada uno de los datos ver al Anexo C).

Tabla 13. Relación diámetros pilote con cantidad

Diámetro (m)	Carga Pilote (kN)	No. Pilotes
0,1	10	287
0,2	20	141
0,3	30	93

Nota. Elaboración propia

Grafica 12. Relación de diámetros pilote



Nota. Elaboración propia

Del análisis se observa que la alternativa Ø0,30 m ofrece el menor número de pilotes en relación con los otros diámetros; en consecuencia, se adopta Ø0,30 m como diámetro de diseño.

De acuerdo con la metodología anterior y la combinación de cargas NSR-10 B.2.4-2 (1.2 CM + 1.6 CV), así como con la comparación de alternativas por diámetro (Grafica 15), se adoptan pilotes de madera de Ø 0,30 m y longitud de 6,00 m.

Esta elección cumple la resistencia de diseño Rd con FS = 3, reduce el número de pilotes Nu dentro del diseño, y asegura la penetración en estratos más competentes.

CONDICIONES TÉCNICAS PARA PILOTES DE MADERA HINCADOS

Este documento presenta un alcance preliminar del diseño; sin embargo, resulta pertinente señalar las siguientes condiciones técnicas para pilotes hincados, conforme al Título H de la NSR-10, aplicadas al proyecto (pilotes de madera Ø 0,30 m; L = 6,00 m; Riosucio, Chocó):

- Verticalidad previa al hincado.

  “Antes de proceder al hincado, se verificará la verticalidad… La desviación de la vertical no deberá ser mayor de 3/100 de su longitud para pilotes por punta ni de 6/100 en los otros casos.” (H.8.4.2).

- Tolerancia de posición final de la cabeza.

  “La posición final de la cabeza… no deberá diferir respecto a la de proyecto en más de 20 cm ni de la cuarta parte del ancho del elemento.” (H.8.4.2).

- Registro de hinca (obligatorio).

  “Se llevará un registro… ubicación, longitud, nivel del terreno, protección de la cabeza, peso del martinete, energía por golpe, golpes por metro… y por cada 10 cm en el estrato de apoyo…” (H.8.4.2).

- Emersión por hinca de adyacentes y re-hinca.

  “Se verificará… emersión por la hinca de pilotes adyacentes y, en caso afirmativo, se volverán a hincar hasta la elevación especificada.” (H.8.4.2).

- Orden de hincado en grupos.

  “Los pilotes se hincarán en orden, desde la parte central del grupo hacia fuera…” (H.8.4.2).

- Revisión por pandeo (aplica a Ø 0,30 m < 40 cm).

  La fórmula H.8.4-1 exige verificar pandeo con SF = 3,0 (H.8.4.2).

- Impermeabilización y preservación de la madera

  Dado el ambiente saturado y la oscilación del nivel de agua en Riosucio, se exige tratamiento preservante e impermeabilización en la franja expuesta (cabeza y fuste cercano a la lámina de agua), con sellado en tapa y detalles de drenaje para evitar ciclos

humedad–sequedad. (Esta condición se incluye como criterio técnico del proyecto para durabilidad del material de madera.)

MODELO ESTRUCTURA PALAFÍTICA

El modelo propuesto corresponde a una edificación educativa de carácter preliminar, diseñada bajo un sistema de cimentación palafítica mediante pilotes hincados en madera, adaptados a las condiciones geotécnicas e hidrológicas de la zona de estudio. Este sistema busca elevar la estructura principal sobre el nivel del terreno natural para mitigar los efectos de inundaciones.

En cuanto a su organización, la propuesta de la edificación contempla la disposición de cuatro aulas de clase, complementadas con una zona administrativa destinada a rectoría, un espacio para sala de profesores y un área destinada a actividades recreativas. Los cerramientos se plantean en muros de madera de especie local, seleccionados por su disponibilidad y adaptación al entorno, mientras que la cubierta liviana tipo zinc, que contribuye a reducir cargas y facilitar el control climático interior.

El modelo se desarrolló en el software Autodesk Revit, herramienta que permitió representar de manera gráfica la propuesta planteada, a partir de la información del estudio geotécnico y de los cálculos realizados.

A continuación, se presentan las vistas del modelo generado en Revit, donde se ilustran tanto la distribución de los espacios arquitectónicos como el modelo de estructura palafítica planteada.

Ilustración 6. Modelo aula-1 de la IE.



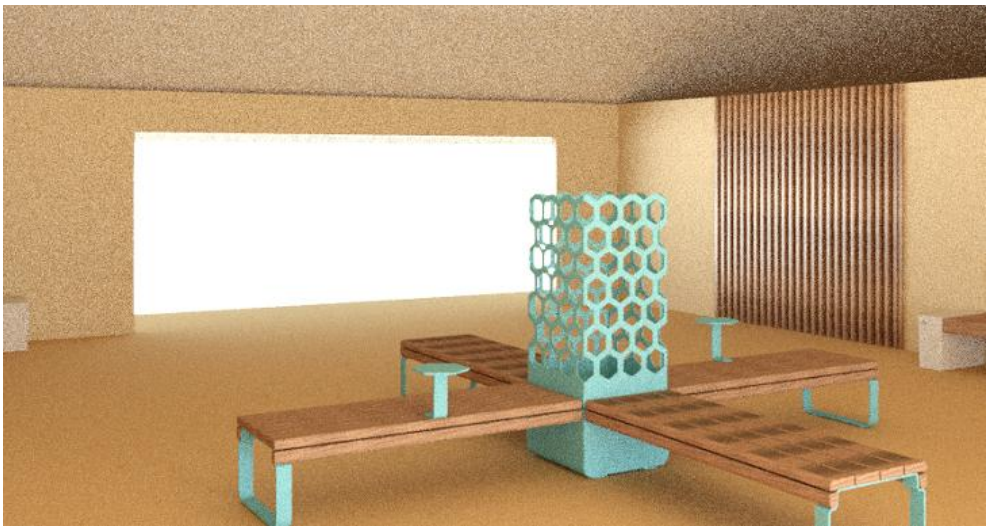
Nota: Elaboración propia.

Ilustración 7. Modelo aula-2 de la IE.



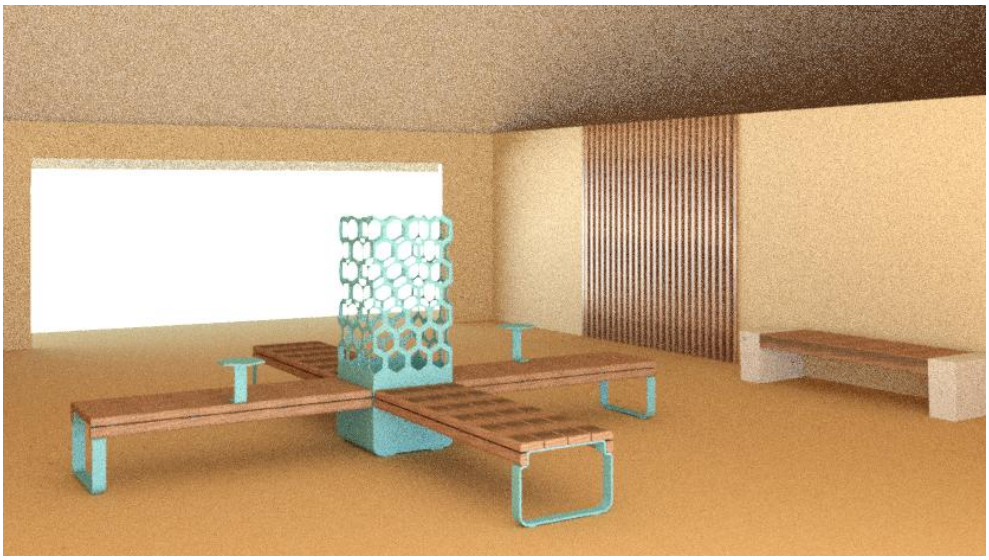
Nota: Elaboración propia.

Ilustración 8. Modelo zona recreativa-1 de la IE.



Nota: Elaboración propia.

Ilustración 9. Modelo zona recreativa-2 de la IE.



Nota: Elaboración propia.

Ilustración 10. Modelo sala de profesores-1 de la IE.



Nota: Elaboración propia.

Ilustración 11. Modelo sala de profesores-2 de la IE.



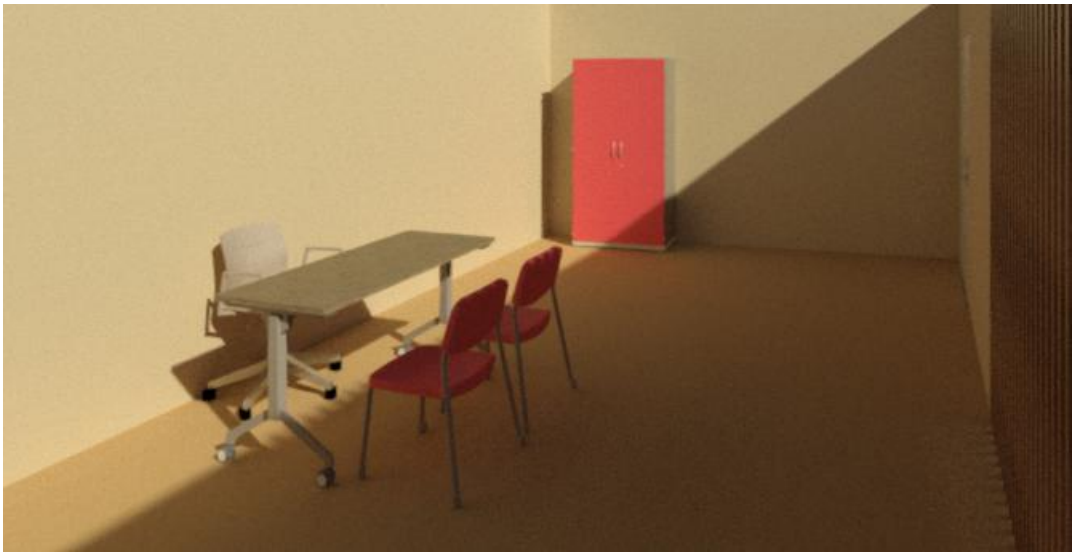
Nota: Elaboración propia.

Ilustración 12. Modelo coordinación-1 de la IE.



Nota: Elaboración propia.

Ilustración 13. Modelo coordinación-2 de la IE.



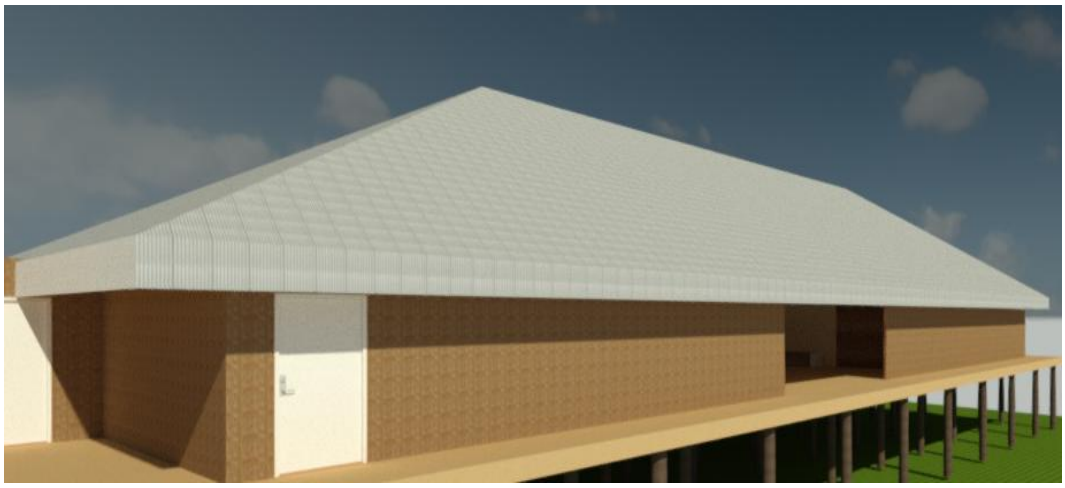
Nota: Elaboración propia.

Ilustración 14. Modelo preliminar estructura palafítica-1.



Nota: Elaboración propia.

Ilustración 15. Modelo preliminar estructura palafítica-2.



Nota: Elaboración propia.

Ilustración 16. Modelo preliminar estructura palafítica-3.



Nota: Elaboración propia.

Ilustración 17. Esquema ubicación de los pilotes.



Nota: Elaboración propia.

ANÁLISIS DEL PROYECTO Y VIABILIDAD DE LA PROPUESTA

La propuesta desarrollada en este proyecto se fundamenta en la adopción de un sistema de cimentación palafítica mediante pilotes de madera hincados, como respuesta técnica a las condiciones geotécnicas, hidrológicas y territoriales del municipio de Riosucio, Chocó. Esta elección no corresponde únicamente a un criterio estructural, sino a un enfoque de adaptación al medio que reconoce las limitaciones físicas del territorio y las prácticas constructivas locales.

En la cuenca del río Atrato, particularmente en municipios como Murindó, Vigía del Fuerte y Riosucio, se ha documentado que las viviendas palafíticas se apoyan sobre estacas o pilotes, generalmente de madera, como mecanismo para reducir la afectación directa de las inundaciones sobre la edificación y el espacio habitable (Hidalgo Granada et al., 2020). Este sistema permite elevar la construcción sobre el nivel del agua durante eventos extremos y responder a suelos saturados con nivel freático superficial, donde las soluciones convencionales de cimentación superficial resultan poco eficientes o inviables.

Adicionalmente, el uso de pilotes hincados presenta ventajas técnicas relevantes en contextos como el de Riosucio, en la medida en que reduce la necesidad de grandes movimientos de tierra, excavaciones extensas o el uso intensivo de maquinaria pesada, aspectos que resultan especialmente limitantes en territorios con difícil acceso, alta humedad y baja capacidad logística. En este sentido, el sistema palafítico permite una implementación progresiva, adaptable y compatible con las condiciones físicas y sociales del territorio.

El estudio de Hidalgo Granada, Murillo Macías y Villota Chitán (2020) plantea como objetivo central la repotenciación de técnicas constructivas nativas, integrando materiales alternativos y sistemas tradicionales para mejorar el desempeño de la vivienda palafítica en

zonas inundables, lo cual respalda el enfoque adoptado en este proyecto de fortalecer el sistema palafítico desde una perspectiva técnica y contextual.

Por su parte, el Departamento Nacional de Planeación (2016) reconoce la vivienda palafítica como una alternativa habitacional adecuada para zonas inundables, siempre que su diseño se ajuste a las condiciones específicas del suelo, el clima y la disponibilidad de materiales del lugar, lo cual coincide con el enfoque adoptado en este proyecto al proponer un diseño de pilotes ajustado a las condiciones geotécnicas del sitio.

En este sentido, el proyecto aporta tanto el dimensionamiento preliminar de los pilotes como la estructuración de una solución de cimentación del sitio, junto con la disponibilidad regional del material estructural y su compatibilidad con las prácticas constructivas locales, demostrando la viabilidad técnica del sistema palafítico.

CONCLUSIONES

- El análisis de antecedentes y casos de estudio sobre estructuras palafíticas en el Pacífico colombiano y en la cuenca del río Atrato permitió establecer que este sistema constituye una respuesta técnica adecuada frente a condiciones de inundación recurrente, suelos saturados y limitaciones para la ejecución de cimentaciones superficiales. En particular, se evidenció que el uso de pilotes de madera hincados ha sido una solución tradicionalmente empleada en estos contextos, lo cual respalda la pertinencia de estudiar y adaptar este sistema desde una perspectiva de ingeniería.
- El análisis de antecedentes y casos de estudio sobre estructuras palafíticas en el Pacífico colombiano y en la cuenca del río Atrato permitió establecer que este sistema constituye una respuesta técnica adecuada frente a condiciones de inundación recurrente, suelos

saturados y limitaciones para la ejecución de cimentaciones superficiales. En particular, se evidenció que el uso de pilotes de madera hincados ha sido una solución tradicionalmente empleada en estos contextos, lo cual respalda la pertinencia de estudiar y adaptar este sistema desde una perspectiva de ingeniería estructural y geotécnica.

- La alternativa palafítica mediante pilotes de madera hincados resulta pertinente para suelos con altos contenidos de finos y comportamiento cohesivo no drenado en ambientes saturados, en tanto permite elevar la superestructura, reducir la exposición a anegamientos y transferir las cargas hacia estratos más competentes del subsuelo.
- Se desarrolló un modelo preliminar de cimentación palafítica para la I.E. Saulo Sánchez (Riosucio, Chocó), coherente con el entorno y la caracterización geotécnica incorporada en el documento. El diseño adopta pilotes de madera hincados de Ø 0,30 m y L = 6,00 m, dimensionados con cargas conforme a NSR-10, Título B y metodología geotécnica del CCP–INVIAS, Sección 10. *(Consejo Colombiano de Construcción Sismo Resistente, 2010; INVIAS, 2014).*
- De acuerdo con las gráficas y correlaciones presentadas, los estratos superficiales no garantizan capacidad ni control de asentamientos para una solución somera; por tanto, se descarta la cimentación superficial y se adopta cimentación profunda con pilotes de madera, en línea con los criterios del CCP–INVIAS para suelos de baja resistencia en superficie (INVIAS, 2014).
- La comparación por diámetros Ø 0,10 / 0,20 / 0,30 m mostró que Ø 0,30 m maximiza Rd y minimiza Un, cumpliendo factores constructivos. Con la carga de diseño obtenida, el cálculo arrojó Nu=92,5; para regularidad de retícula y simetría, se adoptan 94 pilotes (redondeo hacia arriba y número par).

- El presente corresponde a un modelo preliminar que fija criterios, metodología y configuración base (Ø 0,30 m; L = 6,00 m; 94 pilotes). Para avanzar a diseño definitivo, se requiere verificación en campo de capacidades (p. ej., pruebas estáticas/dinámicas o análisis de la ecuación de onda) y ajuste de penetración final según condiciones de obra, así como la ejecución de estudios geotécnicos complementarios con ensayos de campo y laboratorio conforme a la NSR-10, Título H, a fin de calibrar parámetros y actualizar el dimensionamiento si corresponde (Consejo Colombiano de Construcción Sismo Resistente, 2010; INVIAS, 2014).

RECOMENDACIONES

- Se recomienda efectuar sondeos, ensayos de campo y laboratorio directamente en el sector exacto de la zona de intervención (área en polígono rojo), con el fin de confirmar los parámetros geotécnicos utilizados en el diseño preliminar, reducir la incertidumbre asociada al uso de información de un estudio cercano y ajustar, de ser necesario, las longitudes, diámetros y capacidades de los pilotes.
- Se recomienda complementar la información hidrológica general con levantamientos topográficos locales y verificación de cotas de inundación históricas en el predio de la institución educativa, con el fin de definir con mayor precisión la altura mínima de la plataforma elevada y garantizar que la estructura quede efectivamente por encima de la lámina de agua durante eventos de crecida.
- Se recomienda verificar en sitio la profundidad y variación estacional del nivel freático, así como la continuidad y espesor de los estratos blandos y más competentes, para asegurar que los pilotes se anclen adecuadamente en los niveles que proporcionan la capacidad resistente requerida.

- Durante la etapa constructiva, se recomienda llevar registros detallados de hincado (energía por golpe, número de golpes, penetración por tramo y profundidad final), conforme a lo establecido en la NSR-10, para verificar que los pilotes alcanzan las condiciones de diseño y detectar posibles anomalías como rechazo prematuro, emersión de pilotes adyacentes o desviaciones de verticalidad.
- Dado el ambiente altamente húmedo y la interacción permanente con el suelo saturado y el agua, se recomienda aplicar tratamientos preservantes adecuados a los pilotes de madera, especialmente en las zonas de transición suelo–aire–agua, con el fin de prolongar su vida útil y reducir riesgos de degradación biológica y física.
- Se recomienda que el sistema propuesto se ejecute siguiendo parámetros normativos y controles técnicos, de manera que se garantice un comportamiento estructural más seguro, durable y predecible frente a cargas y amenazas naturales.
- Si en el futuro se plantea modificar la superestructura, aumentar cargas o cambiar el uso de la edificación, se recomienda realizar una reevaluación del sistema de cimentación para verificar que los pilotes existentes sean suficientes frente a las nuevas demandas estructurales.

REFERENCIAS

Consejo Colombiano de Construcción Sismo Resistente. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente – NSR-10*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2014). *Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes (CCP-14). Sección 10: Cimentaciones*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Transporte.

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2018). *Guía de diseño geotécnico para cimentaciones de puentes*. https://www.invias.gov.co

Swiss Standard SN 670 010b. (s. f.). *Characteristic coefficients of soils*. Association of Swiss Road and Traffic Engineers.

Alcaldía de Riosucio – CLOPAD. (2011). *Plan local de gestión del riesgo del municipio de Riosucio, Chocó*. Comité Local para la Prevención y Atención de Desastres.

IGAC. (2019). *Caracterización del suelo en zonas de riesgo por inundación en el Chocó*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. https://www.igac.gov.co

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2022). *Lineamientos técnicos para construcción en zonas con nivel freático alto*. https://www.minvivienda.gov.co

MHD Ingeniería S.A.S. (2022). *Estudio geotécnico para la construcción de aulas educativas en la Institución Educativa Saulo Sánchez, Riosucio – Chocó*.

Bardet, J.-P. (1997). *Experimental soil mechanics*. Prentice Hall.

Bowles, J. E. (1986). Foundation analysis and design. McGraw-Hill.

Bowles, J. E. (1996). *Foundation analysis and design* (5.ª ed.). McGraw-Hill.

Chen, W. F., & Kulhawy, F. H. (1993). *Foundation engineering handbook*. Springer.

Coduto, D. P. (2016). *Foundation design: Principles and practices* (3rd ed.). Pearson.

Coduto, D. P., Yeung, M. R., & Kitch, W. A. (2011). *Geotechnical engineering: Principles and practices* (2nd ed.). Pearson.

Das, B. M. (2008). *Advanced soil mechanics* (3rd ed.). Taylor & Francis.

Das, B. M. (2010). *Principios de ingeniería geotécnica* (7.ª ed.). Cengage Learning.

Das, B. M. (2011). *Fundamentals of geotechnical engineering* (7th ed.). Cengage Learning.

Hough, B. K. (1969). *Basic soil engineering*. Ronald Press.

Sivrikaya, O. (2009). Correlation of SPT-N value with shear strength parameters of soils. *Scientific Research and Essays, 4*(11), 1289–1292.

Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice* (3rd ed.). Wiley.

Banco Mundial. (2021). *Invertir en sistemas educativos resilientes en América Latina y el Caribe*. https://www.bancomundial.org/

Cardona, O. D., van Aalst, M. K., Birkmann, J., Fordham, M., McGregor, G., Rosa, P., … & Davis, I. (2020). *Marco conceptual de vulnerabilidad y resiliencia para la gestión del riesgo de desastres*. Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). https://www.ipcc.ch

López, M., Romero, L., & León, F. (2018). Diseño resiliente de infraestructuras educativas en zonas vulnerables: Caso Pacífico colombiano. *Revista Ingeniería y Territorio, 10*(2), 35–48.

Rodríguez, D., & Pérez, J. (2020). Arquitectura adaptativa: Nuevas estrategias para enfrentar el cambio climático. *Hábitat Sustentable, 10*(1), 55–64.

UNESCO. (2022). *Educación y riesgo de desastres en América Latina*. https://unesdoc.unesco.org

Canadian Wood Council. (2019). *CLT handbook: Cross-laminated timber* (2nd ed.). https://www.cwc.ca/publications/clt-handbook/

Swedish Wood. (2019). *Cross-laminated timber handbook*. Swedish Forest Industries Federation. https://www.swedishwood.com/publications/

WWF Colombia. (2016). *Maderas de Colombia: Fichas técnicas de 15 especies*. https://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/maderas_de_colombia_15_version_aprobada.pdf

González, L. A., Mosquera, J., & Mosquera, J. (2011). *Especies maderables del Chocó: Propiedades físicas y mecánicas*. Universidad Tecnológica del Chocó.

Metecno Colombia. (2021). *Ficha técnica panel sándwich PU 30 mm*. https://www.metecno.com.co/

TecnoPanel S.A.S. (2021). *Ficha técnica panel de poliuretano (PU) 30 mm*. https://www.tecnopanel.com.co/

Hidalgo Granada, F., Murillo Macías, L. H., & Villota Chitán, J. M. (2020). *Materiales alternativos para la vivienda palafítica en zonas inundables en los meandros del río Atrato*. Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia.

Mosquera Torres, G. (2014). *Vivienda y arquitectura tradicional en el Pacífico colombiano*. Programa Editorial Universidad del Valle.

Osorio Garcés, C. E. (2016). *La vivienda palafítica del Pacífico: Expresión y persistencia de una forma de ver el mundo*. Banco de la República – Biblioteca Luis Ángel Arango.

Cardozo Cifuentes, R. M., Flechas Mejía, L., & Romero Camacho, D. P. (2023). *Propuesta de diseño de una vivienda palafítica sostenible en el municipio de Riosucio del departamento del Chocó* [Proyecto de grado, Universidad Piloto de Colombia].

Cruz Díaz, E. S., & Ropero Triviño, H. Y. (2024). *Estudio hidrológico e hidráulico para la determinación de manchas de inundación en el municipio de Riosucio a causa de un posible desborde del río Atrato* [Proyecto de grado, Universidad Católica de Colombia].

Blanco, J. (2020). *Caracterización de las 30 especies forestales maderables más movilizadas en Colombia provenientes del bosque natural*. FAO – Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – Unión Europea.

Rueda Tocarruncho, A. M., Moreno Orjuela, R. D., & Zúñiga Gallego, J. K. (2016). *Guía de compra y consumo responsable de madera en Colombia*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, FAO, GIZ, CARDER.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (s. f.-a). *Inundaciones: vulnerabilidad*. http://www.ideam.gov.co/web/siac/inundaciones

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (s. f.-b). *Amenazas inundación*. http://www.ideam.gov.co/web/agua/amenazas-inundacion

Departamento Nacional de Planeación [DNP]. (2016). *Lineamientos para la construcción de vivienda palafítica* (Proyectos Tipo, No. 19, Versión 1.0). https://proyectostipo.dnp.gov.co/images/pdf/palafiticas/PTpalafitica.pdf

Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). *Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97(SM9), 1249–1273.

Boulanger, R. W., & Idriss, I. M. (2014). *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures* (Report No. UCD/CGM-14/01). Center for Geotechnical Modeling, University of California, Davis.

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall.

Head, K. H. (2006). *Manual of soil laboratory testing* (3rd ed.). Whittles Publishing.

Martín Díaz, J. N. (2016). *Arquitectura tradicional colombiana como sistema pasivo de aprovechamiento energético* [Trabajo de fin de máster, Universidad Politécnica de Valencia]. RiuNet. https://riunet.upv.es/handle/10251/86235

Garcés Viáfara, D. A., & Hurtado Pérez, G. A. (2016). *Características bioclimáticas de la arquitectura palafítica en el barrio Puerto Cali, Guapi, Cauca* [Trabajo de grado, Universidad Católica de Manizales].

Casallas Guarín, L. M., & Ramírez Flechas, J. A. (2021). *Modelo de vivienda palafítica sostenible aplicada al municipio de Bahía Solano en el departamento de Chocó* [Trabajo de grado, Universidad La Gran Colombia].

ANEXOS

Anexo A. Modelo Preliminar Estructura Palafítica

Se incluye imágenes de referencia del modelo desarrollado, con el fin de ilustrar el sistema palafítico.

Anexo B. Propuesta Localización de Pilotes.

Se presenta el plano de propuesta de localización de pilotes (Ejes de referencia, separaciones centro a centro) (Ø 0,30 m; L = 6,00 m).

Anexo C. Cálculo capacidad de carga en relación con los diámetros (PDF).

Se anexa el documento en formato PDF que compila los cálculos para los diámetros Ø 0,10 m, Ø 0,20 m y Ø 0,30 m

Nota: El material aquí anexado es de carácter ilustrativo y corresponde al modelo preliminar del proyecto; no reemplaza los planos constructivos ni las especificaciones definitivas que deberán emitirse en la etapa de diseño definitivo.