



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Determinación de la resistencia
de pilas y pilotes mediante el
uso de Redes Neuronales**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Karim Andree Jiménez Martínez

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Silvia Raquel García Benítez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

By far, the greatest danger of Artificial Intelligence is that people conclude too early that they understand it.

- *Eliezer Yudkowsky, Machine Intelligence Research Institute*

Agradecimientos

A Dios, la roca sobre la que me fundamento.

A mis padres, a mi hermana, a mi familia y amigos por su apoyo incondicional.

A la Dra. Silvia Raquel García Benítez por guiarme en el desarrollo de este trabajo con paciencia y empeño; agradezco su tiempo y confianza al compartir sus conocimientos de manera profesional e invaluable.

A la Universidad y la educación pública, por brindarme herramientas para servir a la sociedad.

Índice

Introducción	1
Objetivo	2
Alcances.....	2
Organización del estudio	2
Capítulo I. Cimentaciones Profundas.....	3
1.1 Categorías de cimentaciones profundas	4
1.2 Capacidad de carga de pilas / pilotes.....	7
1.2.1 Capacidad de carga en el fuste, Q_f	10
1.2.2 Capacidad de carga en la punta, Q_p	13
1.2.3 Pruebas de carga a pilotes / pilas	16
Capítulo II. Redes Neuronales.....	19
2.1 Descripción de una neurona	21
2.2 Topologías neuronales	25
2.2.1 Perceptrón monocapa	25
2.2.2 Perceptrón multicapa	26
2.3 Regla de entrenamiento- aprendizaje	26
2.4 Algoritmo de aprendizaje: Backpropagation.	27
Capítulo III. Análisis de Resultados.....	28
3.1 Descripción de la base de datos	28
3.1.1 Madera.....	31
3.1.2 Concreto	33
a) Base de pila/pilote sección circular	33
b) Base de pila/pilote sección cuadrada.....	38
3.1.3 Acero.....	43
a) Base de pilote sección Perfil I	43
b) Base de pilote sección tubular.....	48
3.2 RN para la estimación de la Resistencia Máxima ($Q_{m\acute{a}x}$)	52
3.2.1 Madera.....	53
a) MCirCF (Elementos de Madera con sección Circular a Compresión en suelos Finos)	53
3.2.2 Concreto	56

a) CCirCF (Elementos de Concreto con sección Circular a Compresión en suelos Finos).....	56
b) CCirCG	58
c) CCirCR.....	59
d) CCdCF (Elementos de Concreto con sección Cuadrada a Compresión en suelos Finos).....	61
e) CCdCG	63
3.2.3 Acero.....	64
a) AICF (Elementos de Acero con sección I a Compresión en suelos Finos)	64
b) AICG	66
c) ACirCF (Elementos de Acero con sección Circular a Compresión en suelos Finos)	67
d) ACirCG	69
3.3 Pruebas de afirmación	71
Capítulo IV. Conclusiones	80
Referencias	82

Índice de Figuras

Figura I.1 Tipos de pilas de acuerdo con su funcionamiento (tomado de IDC, 2023).....	4
Figura I.2 Pilote de madera (modificado de Budhu, 2011).....	4
Figura I.3 Pilas y pilotes de concreto (modificado de Budhu, 2011).....	5
Figura I.4 Pilotes de acero (modificado de Budhu, 2011).....	6
Figura I.5 Pilotes mixtos o compuestos (tomado de Deloney, 2023).....	6
Figura I.6 Cimentaciones profundas (tomado de Paniagua <i>et al</i> , 2017)	7
Figura I.7 Resistencia del fuste y punta de la pila (modificado de Budhu, 2011)	8
Figura I.8 Curvas carga/desplazamiento típicas para pruebas de carga compresiva (combinado de Das, 2012, y Gavidia, 2019).....	9
Figura I.9 Factor de capacidad de carga N_q^* propuesto por diferentes autores (modificado de Paniagua <i>et al</i> , 2017)	15
Figura I.10 Tipos de pruebas de carga en pilas/pilotes (modificado de Paniagua <i>et al</i> , 2017)	16
Figura I.11 Diagrama esquemático de la configuración de la prueba de carga en un pilote (modificado de FHWA, 2016)	17
Figura I.12 Procedimientos de carga recomendado por las normas ASTM D1143/D1143M-07 2013 (modificado de Paniagua <i>et al</i> , 2017).....	18
Figura I.13 Resultados típicos de pruebas de carga (modificado de Peck, 1982).....	19

Figura II.1 Neurona del cerebro (A); perceptrón simple (B) (modificado de Mitchell, 2019)	21
Figura II.2 Modelo genérico de neurona (modificado de Martín, 2007)	21
Figura II.3 Funciones de activación en redes neuronales (tomado de Jooper, 2021)	24
Figura II.4 Esquema de capas de RN (tomado de Pons, 2022)	25
Figura II.5 Arquitectura básica del perceptrón (modificado de Aggarwal, 2018)	25
Figura II.6 Esquema de perceptrón multicapa (modificado de ACP, 2015)	26
Figura II.7 Esquemización del algoritmo Backpropagation (modificado de Datawow, 2020)	28
Figura III.1 Organización de la Base de Datos (modificado de FHWA, 2017)	29
Figura III.2 Arreglo de las matrices de datos para su uso y estudio con redes neuronales.	30
Figura III.3 Rama del árbol para pilas/pilotes de madera.	31
Figura III.4 Histogramas de las variables Diámetro, Longitud y Resistencia para pilotes de Madera.	32
Figura III.5 Rama del árbol para pilas/pilotes de concreto con sección circular.	33
Figura III.6 Histograma de las variables Diámetro, Módulo de Young, Longitud y Resistencia, para material Concreto con geometría Circular en suelos finos.	35
Figura III.7 Histograma de las variables Diámetro, Módulo de Young, Longitud y Resistencia, para material Concreto con geometría Circular en suelos gruesos.	36
Figura III.8 Histogramas de las variables Diámetro, Módulo de Young, Longitud y Resistencia, para material Concreto con geometría Circular para medio rocoso.	38
Figura III.9 Rama del árbol para pilas/pilotes de concreto con sección cuadrada.	38
Figura III.10 Histogramas de las variables Ancho, Longitud, Módulo de Young, Peso Longitudinal y Resistencia para material Concreto geometría Cuadrada para suelos finos.	40
Figura III.11 Histograma de las variables Lado, Longitud, Módulo de Young, Peso Longitudinal y Resistencia para material Concreto geometría Cuadrada para suelos gruesos.	42
Figura III.12 Rama del árbol para pilas/pilotes de acero con sección I.	43
Figura III.13 Histogramas de las variables Peralte, Patín Ancho, Patín Espesor, Alma Espesor, Longitud, Área de revestimiento, Peso longitudinal, Resistencia y Desplazamiento para material Acero con sección I en suelos finos.	45
Figura III.14 Histogramas de las variables Peralte, Patín Ancho, Patín Espesor, Alma Espesor, Longitud, Área de revestimiento, Peso longitudinal y Resistencia para material Acero con sección I en suelos gruesos.	47
Figura III.15 Rama del árbol para pilas/pilotes de acero con sección circular.	48
Figura III.16 Histogramas de las variables Diámetro exterior, Espesor de pared, Longitud y Peso longitudinal, Resistencia y Desplazamiento para material Acero con sección Tubular en suelos finos.	49
Figura III.17 Histogramas de las variables Diámetro exterior, Espesor de pared, Longitud, Peso longitudinal, Resistencia y Desplazamiento, para material Acero con sección Tubular en suelos gruesos.	51
Figura III.18 Simbología de las RN (M=Madera, C=Concreto, A=Acero; Cir=Circular, Cd=Cuadrada, I=Sección I; C=Compresión, E=Extensión; F=Fino, G=Grueso, R=Roca).	53

Figura III.19 Topología de RN en MCirCF ($D =$ Diámetro, $L =$ Longitud y $Q_{MCirC} =$ Resistencia máxima).....	54
Figura III.20 Coeficiente de correlación de las RN MCirCF	55
Figura III.21 Gráfica $Q_{máx}$ medido vs. $Q_{máx}$ pronosticado (izquierda) y gráfica de Residuo vs. $Q_{máx}$ pronosticado (derecha) del Modelo 2 – MCirCF	55
Figura III.22 Topología de RN en Concreto sección circular ($D=$ Diámetro, $E=$ Módulo de Young, $L=$ Longitud y $Q_{CCirC}=$ Resistencia Máxima)	56
Figura III.23 Coeficiente de Correlación de las RN CCirCF	57
Figura III.24 Gráfica $Q_{máx}$ medido vs. $Q_{máx}$ pronosticado (izquierda) y gráfica de Residuo vs. $Q_{máx}$ pronosticado (derecha) del Modelo 3 – CCirCF	57
Figura III.25 Coeficiente de Correlación de las RN CCirCG.....	58
Figura III.26 Gráfica $Q_{máx}$ medido vs. $Q_{máx}$ pronosticado (izquierda) y gráfica de Residuo vs. $Q_{máx}$ pronosticado (derecha) del Modelo 3 – CCirCG.....	59
Figura III.27 Coeficiente de correlación de las de RN CCirCR.....	60
Figura III.28 Gráfica $Q_{máx}$ medido vs. $Q_{máx}$ pronosticado (izquierda) y gráfica de residuo vs. $Q_{máx}$ pronosticado (derecha) del Modelo 2 – CCirCR.....	60
Figura III.29 Topología de RN en Concreto sección cuadrada ($b=$ Ancho, $E=$ Módulo de Young, $w=$ Peso Longitudinal, $L=$ Longitud y $Q_{CCdC}=$ Resistencia Máxima)	61
Figura III.30 Coeficiente de correlación de las RN CCdCF.....	62
Figura III.31 Gráfica $Q_{máx}$ medido vs. $Q_{máx}$ pronosticado (izquierda) y gráfica de Residuo vs. $Q_{máx}$ pronosticado (derecha) del Modelo 3 – CCdCF.....	62
Figura III.32 Coeficiente de correlación de la RN CCdCG.....	63
Figura III.33 Gráfica $Q_{máx}$ medido vs. $Q_{máx}$ pronosticado (izquierda) y gráfica de Residuo vs. $Q_{máx}$ pronosticado (derecha) del Modelo 3 – CCdCG	64
Figura III.34 Topología de RN en Acero sección I ($w=$ Peso longitudinal, $d=$ Peralte, $b_f=$ Ancho de patín, $t_f=$ Espesor de patín, $t_w=$ Espesor de alma, $A=$ Área de revestimiento, $L=$ Longitud y $Q_{AIC}=$ Resistencia Máxima)	64
Figura III.35 Coeficiente de correlación de las RN AICF	65
Figura III.36 Gráfica $Q_{máx}$ medido vs. $Q_{máx}$ pronosticado (izquierda) y gráfica de Residuo vs. $Q_{máx}$ pronosticado (derecha) del Modelo 2 – AICF	66
Figura III.37 Coeficiente de correlación de las RN AICG	67
Figura III.38 Gráfica $Q_{máx}$ medido vs. $Q_{máx}$ pronosticado (izquierda) y gráfica de Residuo vs. $Q_{máx}$ pronosticado (derecha) del Modelo 2 – AICG	67
Figura III.39 Topología de RN en Acero sección Circular ($e=$ Espesor de pared, $D=$ Diámetro, $w=$ Peso longitudinal y $L=$ Longitud)	68
Figura III.40 Coeficiente de correlación de las RN ACirCF	69
Figura III.41 Gráfica $Q_{máx}$ medido vs. $Q_{máx}$ pronosticado (izquierda) y gráfica de Residuo vs. $Q_{máx}$ pronosticado (derecha) del Modelo 2 – ACirCF	69
Figura III.42 Coeficiente de correlación de las RN ACirCG.....	70
Figura III.43 Gráfica $Q_{máx}$ medido vs. $Q_{máx}$ pronosticado (izquierda) y gráfica de Residuo vs. $Q_{máx}$ pronosticado (derecha) del Modelo 4 – ACirCG.....	70
Figura III.44 Curva carga-desplazamiento y esquema del pilote en Calzada Ignacio Zaragoza (modificado de Clavellina, 2005). En la imagen, las líneas PPN corresponden a	

parámetros definidos en el estudio original, que representan curvas derivadas del modelo de <i>Principio de Proporcionalidad Natural</i>	71
Figura III.45 Valores de α (tomado de Budhu, 2005).....	72
Figura III.46 Sección geotécnica del sitio Boston (modificado de Hover <i>et al</i> , 1985)	74
Figura III.47 Curva carga-desplazamiento de la prueba de carga Boston (modificado de Hover <i>et al</i> , 1985).....	75
Figura III.48 Estratigrafía y esquema del pilote en la Planta “Campeche” (tomado de Clavellina, 2005)	75
Figura III.49 Curva carga-desplazamiento de la prueba de carga del pilote en la Planta “Campeche” (modificado de Clavellina, 2005). En la imagen, las líneas PPN corresponden a parámetros definidos en el estudio original, que representan curvas derivadas del modelo de <i>Principio de Proporcionalidad Natural</i>	76
Figura III.50 Geometría de pilote IR W12x40 empleado en ESIA Zacatenco (tomado de Flores <i>et al</i> , 2022).....	76
Figura III.51 Estratigrafía del sitio ESIA Zacatenco (modificado de Flores <i>et al</i> , 2022)...	77
Figura III.52 Curvas carga-desplazamiento del pilote en ESIA Zacatenco (modificado de Flores <i>et al</i> , 2022).....	77
Figura III.53 Estratigrafía del sitio a lo largo del puente en Campeche (tomado de Paniagua <i>et al</i> , 2019)	78
Figura III.54 Curvas carga-desplazamiento de los pilotes tubulares en el Golfo de México (tomado de Paniagua <i>et al</i> , 2019).....	79

Índice de Tablas

Tabla I.1 Método Alfa.....	11
Tabla I.2 Método Beta	12
Tabla I.3 Rango de coeficientes β (CGS, 2006).....	13
Tabla III.1 Resumen de información de la subbase para pilotes de madera	31
Tabla III.2 Estadísticos descriptivos de los datos para pilotes de madera	33
Tabla III.3 Resumen de información del primer subconjunto de pilas/pilotes de concreto de sección circular	34
Tabla III.4 Estadísticos descriptivos de los datos para pilas/pilotes de concreto circulares en suelos finos.	34
Tabla III.5 Resumen de información del segundo subconjunto de pilas/pilotes de concreto de sección circular	36
Tabla III.6 Estadísticos descriptivos de los datos para pilas/pilotes circulares de concreto en suelos gruesos.	37
Tabla III.7 Resumen de información del tercer subconjunto para pilas/pilotes sección circular	37
Tabla III.8 Estadísticos descriptivos de los datos para pilas/pilotes circulares de concreto en roca.....	37
Tabla III.9 Resumen de información del primer subconjunto de pilas/pilotes de sección cuadrada.....	39

Tabla III.10 Estadísticos descriptivos de los datos para pilas/pilotes de concreto de sección cuadrada para suelos finos.....	39
Tabla III.11 Resumen de información del segundo subconjunto de pilas/pilotes de sección cuadrada.....	41
Tabla III.12 Estadísticos descriptivos de los datos para pilas/pilotes de concreto de sección cuadrada para suelos gruesos.....	41
Tabla III.13 Resumen de información del primer subconjunto para pilotes de acero perfil I.....	43
Tabla III.14 Estadísticos descriptivos de los datos para pilotes de acero perfil I para suelos finos.....	44
Tabla III.15 Resumen de información del segundo subconjunto para pilotes de acero perfil I.....	46
Tabla III.16 Estadísticos descriptivos de los datos para pilotes de acero perfil I para suelos gruesos.....	46
Tabla III.17 Resumen de información del primer subconjunto para pilotes de acero sección circular.....	48
Tabla III.18 Estadísticos descriptivos de los datos para pilotes de acero tubulares para suelos finos.....	48
Tabla III.19 Resumen de información del segundo subconjunto para pilotes de acero sección circular.....	50
Tabla III.20 Estadísticos descriptivos de los datos para pilotes de acero tubulares para suelos gruesos.....	50
Tabla III.21 Resumen de modelos probados para MCirCF.....	54
Tabla III.22 Resumen de modelos probados para CCirCF.....	56
Tabla III.23 Resumen de modelos probados para CCirCG.....	58
Tabla III.24 Resumen de modelos probados para CCirCR.....	59
Tabla III.25 Resumen de modelos probados para CCdCF.....	61
Tabla III.26 Resumen de modelos probados para CCdCG.....	63
Tabla III.27 Resumen de modelos probados para AICF.....	65
Tabla III.28 Resumen de modelos probados para AICG.....	66
Tabla III.29 Resumen de modelos probados para ACirCF.....	68
Tabla III.30 Resumen de modelos probados para ACircG.....	70
Tabla III.31 Resumen de la prueba y propiedades geotécnicas en Calzada Ignacio Zaragoza (modificado de Clavellina, 2005).....	71
Tabla III.32 Tabla de coeficiente N_c * (tomado de GCDMX, 2023).....	73
Tabla III.33 Estimación de la red CCirCF para pilote de Calzada Ignacio Zaragoza.....	74
Tabla III.34 Estimación de la red CCirCF para la pila de Boston.....	75
Tabla III.35 Estimación de la red CCdCG para el pilote de Planta “Campeche”.....	76
Tabla III.36 Estimación de la red AICG para el pilote de ESIA Zacatenco.....	78
Tabla III.37 Descripción de la estratigrafía del sitio en el Golfo de México (Paniagua <i>et al</i> , 2019).....	78
Tabla III.38 Estimación de la red ACirCF para los pilotes tubulares en el Golfo de México.....	79

Introducción

El uso de las cimentaciones profundas se ha incrementado notablemente en todo el mundo esto por los avances tecnológicos al respecto de su instalación y fabricación y por las mejoras a sus fundamentos técnicos. Los cimientos profundos (pilas y pilotes) tienen ventajas claras por sobre los superficiales o mixtos cuando se aplican en obras de ingeniería como puentes, grandes edificios, mega torres, naves industriales, estructuras costeras, entre otros. Sin embargo, uno de los retos aún no totalmente resuelto es el pronóstico sobre su comportamiento, es decir, sobre su mecanismo de resistencia. Los métodos más comunes (semi-empíricos) que se emplean para la predicción de la resistencia máxima de estos elementos simplifican en exceso o son incapaces de hacer intervenir parámetros complejos por lo que su aplicación implica una incertidumbre considerable.

Las pruebas de carga en pilas y pilotes se mantienen como la mejor forma de acercarnos a los valores de resistencia máxima en condiciones de trabajo naturales. El tiempo y costo de estas pruebas de alguna forma desalienta su rutinaria ejecución ya que, en algunos proyectos, esta actividad puede llegar a ser hasta del 10% del costo total de la cimentación (Paniagua *et al.*, 2017): exige la construcción de un sistema de reacción, la instalación de equipos especiales (de aplicación de carga y medición) y la contratación de personal para la ejecución de la prueba y su posterior interpretación. Esta condición hace que las bases de datos sobre estas pruebas sean fundamentalmente escasas.

Para enfrentar esto, en esta investigación se propone a la inteligencia artificial IA (particularmente a las redes neuronales RN) como la alternativa que mejor se ajusta a la condicionante y oferta las mejores métricas de predicción. La IA es cada vez más popular en las distintas ramas de la ingeniería y cuenta con sobradas muestras sobre sus aptitudes para modelar comportamientos complejos de infraestructuras civiles. Estos algoritmos utilizan técnicas de modelización matemática para extraer información, patrones o relaciones en datos registrados (que pudieran estar contaminados, contener vacíos, o ser limitados) con el propósito de predecir comportamientos futuros. En esta tesis se usa la base de datos de FHWA Deep Foundation Load Test Database que cuenta con 1200 de pruebas en 38 estados de los Estados Unidos de América. Los parámetros que describen al medio se engloban en 3 (finos, gruesos y roca) y a las pilas de 2 a 7. La base se procesó para su análisis con RN y se obtuvieron 10 modelos predictivos. Las correlaciones entre valores medidos en campo y estimados con RN para resistencias máximas en pilas/pilotes están entre 0.75 y 0.99. Con base en estos resultados se concluye que las RN son una atractiva y eficiente herramienta para explotar bases de datos geotécnicas y cuentan con aptitudes predictivas que los modelos convencionales no pueden desarrollar.

Objetivo

Predecir la resistencia máxima de pilas y pilotes para pilas/pilotes de distintos materiales y geometrías colocadas en masas de suelo/roca (suelo muy rígido) con una serie de redes neuronales que se configuran como módulos gemelos.

Alcances

1. Estudiar y categorizar una base de datos, extensa – contaminada- ineficiente.
2. Transformar la información de la base de datos en (1) para su estudio con RN.
3. Construir N modelos neuronales para las particiones de la base de datos obtenida en (2).
4. Probar la eficacia de los modelos neuronales conseguidos en (3).
5. Emitir recomendaciones para el crecimiento estratégico de los módulos probados en (4).

Organización del estudio

Esta tesis se estructura de la siguiente manera:

En el capítulo I se presentan los conceptos generales de las pilas y pilotes, su categorización y los fundamentos teóricos que explican su interacción con el subsuelo. Se incluye una recopilación de métodos semi-empíricos para el cálculo de la capacidad de carga y los diferentes parámetros involucrados. Además, se describen las pruebas de carga y sus etapas generales.

El capítulo II expone los conceptos básicos de las redes neuronales, proporcionando una descripción no exhaustiva de estas y su analogía con los procesos biológicos neuronales. Se analiza la estructura de las redes, así como las bases matemáticas que las sustentan, las reglas de entrenamiento y su capacidad de aprendizaje.

En el capítulo III se aborda la gestión, organización y análisis de la información contenida en la base de datos. Se presenta la metodología para la construcción de los modelos, junto con las etapas de entrenamiento y prueba para la predicción de la resistencia máxima. Además, se demuestra la capacidad de los modelos para enfrentar casos no incluidos en la base de datos, comparándolos con otros métodos para validar su desempeño.

Por último, el capítulo IV se presentan las conclusiones del estudio, destacando las ventajas y particularidades de los modelos para la solución de problemas prácticos en ingeniería.

Capítulo I - Cimentaciones Profundas

Toda construcción de ingeniería, que descansa sobre el terreno, debe ser soportada por algún tipo de elemento intermedio denominado cimentación. Este elemento transmite al suelo o roca subyacente las cargas del edificio y su peso propio (Bowles, 1997). Para elegir el sistema de cimentación más adecuado para cada proyecto se debe conocer:

- Función (tipo de proyecto y uso destinado)
- Tipo de estructura
- Materiales del subsuelo

Cuando el suelo tiene poca capacidad de carga y su compresibilidad es alta para las cargas requeridas de una estructura, los ingenieros geotécnicos deben investigar estratos más profundos que puedan soportar esas solicitaciones, con desplazamientos tolerables, mediante el uso de cimentaciones profundas (Paniagua *et al.*, 2017). Los cimientos superficiales sólo son posibles si el suelo, a poca profundidad, tiene suficiente capacidad portante. La arena densa y la arcilla rígida pueden soportar cimientos superficiales, al igual que rellenos artificiales densos también pueden utilizarse para construir cimentaciones superficiales. La arena suelta, la arcilla blanda, el material orgánico, la turba y el relleno artificial suelto pueden no ser adecuados para cimentaciones superficiales (Rajapakse, 2016).

A pesar del mayor costo en comparación a las cimentaciones superficiales, la elección de las cimentaciones profundas es necesaria para dotar de niveles de seguridad suficientes a la estructura (Das, 2012). De acuerdo con Budhu (2011) una cimentación profunda, o cimentación sobre pilotes, es un miembro estructural “delgado” instalado en el suelo para transferir las cargas estructurales a los suelos a una profundidad significativa por debajo de la base de la estructura; las cargas estructurales incluyen cargas axiales, cargas laterales y momentos. Por otro lado, Paniagua *et al.* (2017) menciona que las cimentaciones profundas son aquellas cuya dimensión transversal es, por lo menos, ocho veces menor que su longitud. Se definen de forma general de la siguiente manera:

- **Pilotes:** Son elementos que se fabrican en el exterior del suelo.
- **Pilas:** Se construyen directamente en el suelo, agregando acero de refuerzo y concreto y sus secciones suelen ser mayores que la de los pilotes.

En la ciudad de México, se emplean comúnmente pilotes de concreto prefabricados o metálicos hincados con o sin perforación previa y pilotes o pilas colados en perforación previa con o sin ademe. Generalmente, se llama pilas a los elementos de más de 60 cm de diámetro colados en perforación previa (GCDMX, 2023).

De acuerdo con la manera en que la carga impuesta por la estructura es transmitida al subsuelo, las cimentaciones profundas se dividen en dos tipos:

- 1) Aquellas en las que la base del cimiento se apoya en un suelo muy resistente y poco compresible y la transmisión de carga se realiza en la punta (**Figura I.1a**), y

- 2) Aquellas en las que el cemento queda embebido dentro del suelo y la carga que recibe de la estructura se equilibra por la fricción que se desarrolla a lo largo de la interfaz suelo-cimiento (**Figura I.1b**).

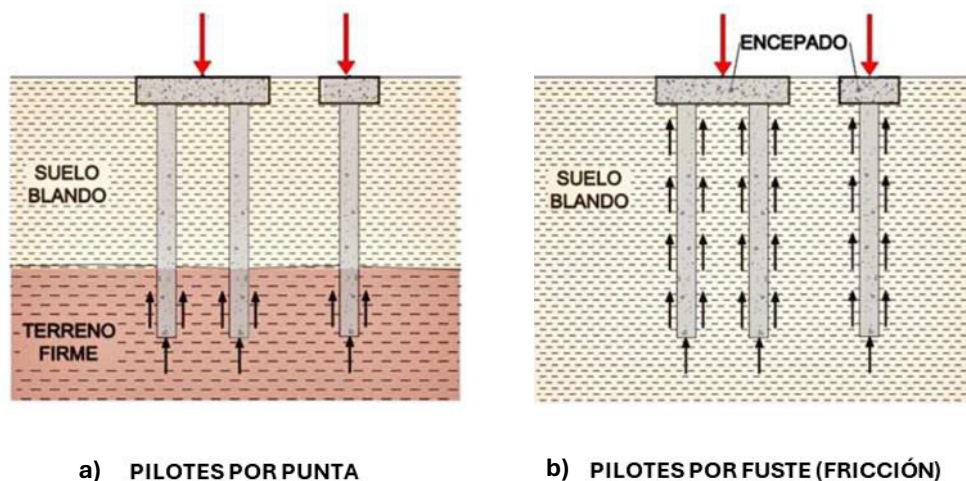


Figura I.1 Tipos de pilas de acuerdo con su funcionamiento (tomado de IDC, 2023)

1.1 Categorías de cimentaciones profundas

Se pueden clasificar de acuerdo con el material de construcción (Budhu, 2011):

a) Madera. Los pilotes de madera (**Figura I.2**) se han utilizado desde la antigüedad. Las longitudes de los pilotes de madera dependen de los tipos de árboles utilizados pero las longitudes habituales rondan los 12 m. Pueden obtenerse longitudes mayores empalmando varios pilotes. Los pilotes de madera son sensibles a las termitas, los organismos marinos y la podredumbre en las zonas expuestas a cambios estacionales. En la actualidad ya no son comunes, aunque llegan a usarse como cimentación provisional.

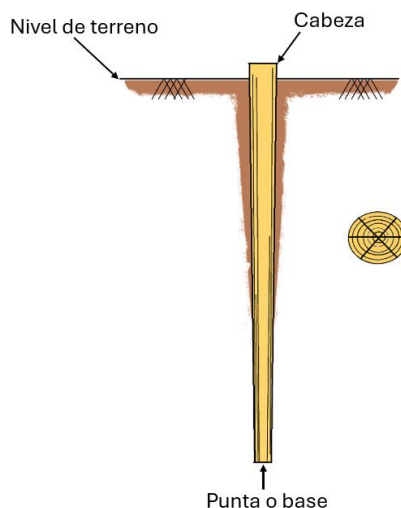


Figura I.2 Pilote de madera (modificado de Budhu, 2011)

b) Concreto. Entre los varios tipos de pilas y pilotes de concreto destacan los colados in situ (cast-in-place), los prefabricados, los perforados (drilled shaft) y las pilas barrette. Las pilas de colados in situ se forman hincando en el suelo una coraza cilíndrica de acero hasta la profundidad deseada y rellenando después la cavidad de la coraza con concreto fluido. El armazón de acero se utiliza para facilitar la construcción y no contribuye a la capacidad de transferencia de carga del pilote. Su finalidad es abrir un hueco en el suelo y mantenerlo abierto para facilitar la construcción del pilote. El concreto simple se utiliza cuando la carga estructural es sólo de compresión. Si hay que transferir momentos y cargas laterales, se utiliza una armadura de acero. Para garantizar la integridad de las pilas colados in situ es necesario un control de calidad riguroso y unas buenas prácticas de construcción. Se muestra ejemplos ilustrativos en la **Figura I.3**.

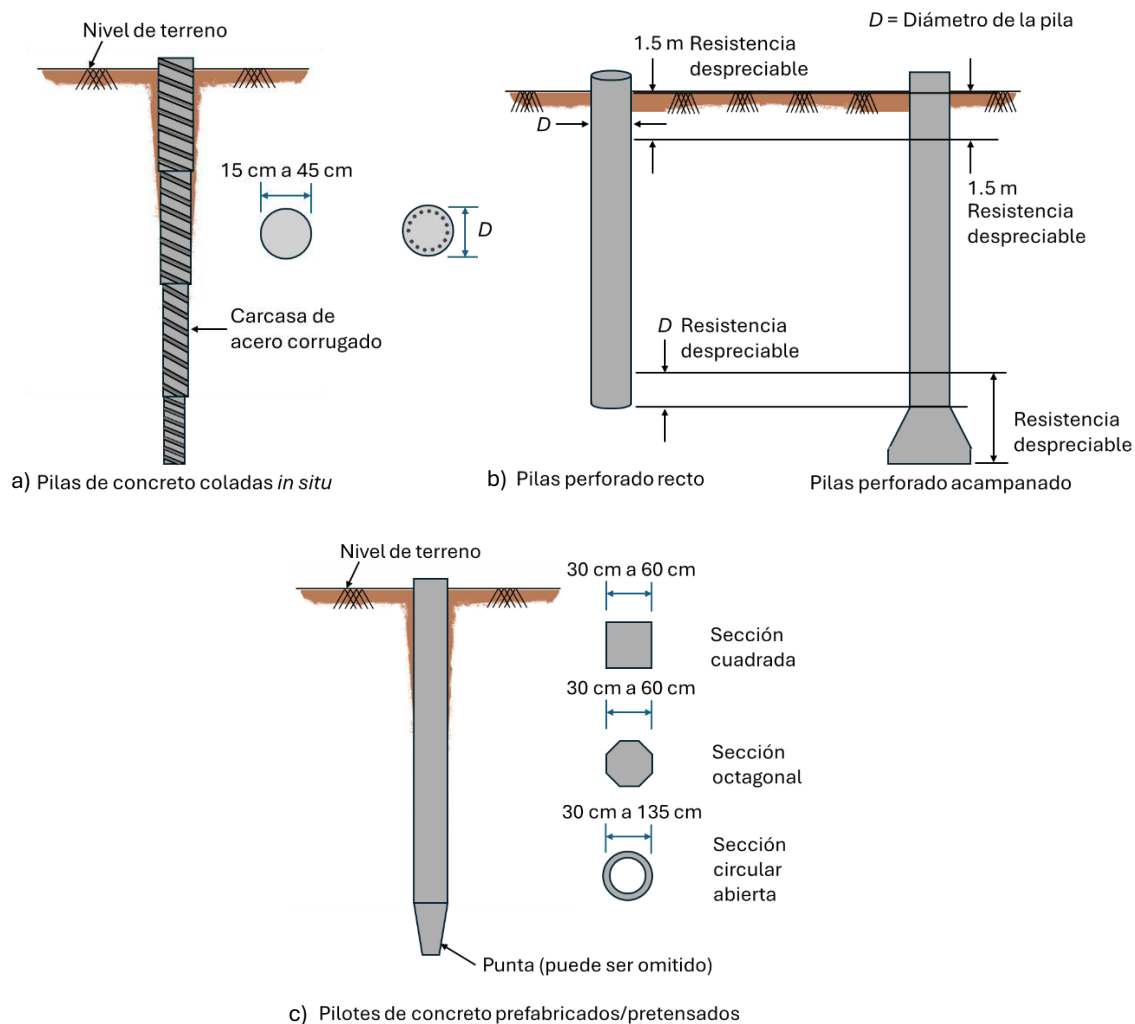


Figura I.3 Pilas y pilotes de concreto (modificado de Budhu, 2011)

Los pilotes prefabricados de concreto (**Figura I.3c**) suelen tener sección cuadrada, circular u octogonal y se fabrican en un astillero o en una fábrica a partir de concreto armado o pretensado. Son preferibles cuando la longitud del pilote se conoce de antemano. Las desventajas de los pilotes prefabricados son los problemas para transportar pilotes largos,

cortarlos y volverlos a unir. También existen micropilotes, que son pilotes tubulares de pequeño diámetro (de 50 mm a 340 mm) empujados o hincados o inyectados -"jet" o "post" o a presión-. Son especialmente útiles para (1) obras con poca altura libre, (2) zonas congestionadas, (3) obras de acceso restringido y (4) reparación o refuerzo de cimientos.

c) Acero. Los pilotes de acero tienen varias formas y tamaños: cilíndricos, cónicos y en H. Los pilotes H de acero (**Figura I.4a**) son perfiles de acero laminado. Los pilotes cilíndricos de acero (**Figura I.4b**) son tubos sin soldadura que pueden alcanzar longitudes de hasta 70 m, suelen clavarse en el suelo con los extremos abiertos. Se utiliza una punta cónica cuando los pilotes tienen que penetrar en rocas.

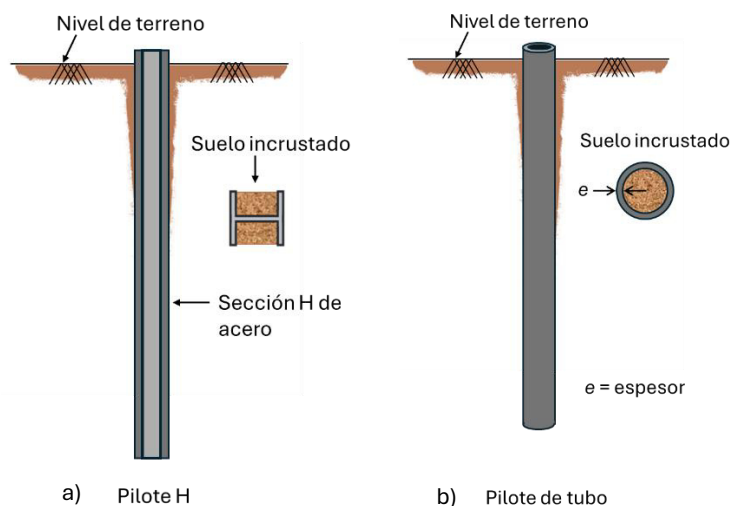


Figura I.4 Pilotes de acero (modificado de Budhu, 2011)

d) Mixtos. El concreto, el acero y la madera pueden combinarse para formar un pilote compuesto. Por ejemplo, la parte de un pilote de madera situada por encima del nivel freático que pueda sufrir deterioro por termitas o podredumbre puede sustituirse por concreto. Del mismo modo, la parte de un pilote de acero situada en un entorno corrosivo puede cubrirse con concreto u otros materiales protectores (**Figura I.5**).

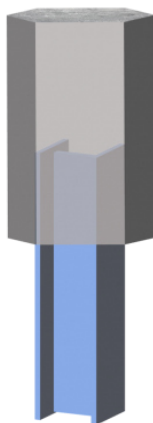


Figura I.5 Pilotes mixtos o compuestos (tomado de Deloney, 2023)

De la misma manera los pilotes se pueden clasificar considerando el desplazamiento del suelo generado durante la instalación de los elementos. De acuerdo con Tomlinson (2008) el Código de Prácticas Estándar Británico para Cimentaciones (British Standard Code of Practice for Foundations) (BS 8004: 1986) clasifica los pilotes en tres categorías. Éstas son las siguientes:

Con gran desplazamiento; comprenden pilotes de sección maciza o pilotes de sección hueca con un extremo cerrado, que se clavan o se introducen con gatos hidráulicos en el terreno y desplazan así el suelo, es decir, cuando los elementos son instalados en el subsuelo sin realizar previamente una perforación sino aplicando energía dinámica y presión. En esta categoría se incluyen todos los tipos de pilotes hincados.

Con poco desplazamiento; son aquellos que se introducen en el suelo mediante hinca o gato hidráulico pero su sección transversal es relativamente pequeña. Incluyen secciones en H o en I de acero laminado y secciones de tubo o caja hincadas con un extremo abierto de forma que el suelo penetra en la sección hueca. Cuando estos tipos de pilotes se taponan con el suelo durante la hinca, se convierten en tipos de gran desplazamiento.

De sustitución se forman retirando primero el suelo mediante perforación y se considera que el subsuelo no registra desplazamientos. El concreto puede colocarse en un agujero sin revestir o revestido, o el revestimiento puede retirarse a medida que se coloca el concreto. En los agujeros perforados pueden colocarse elementos preformados de madera, concreto o acero.

En la **Figura I.6** se muestra un esquema de la clasificación de las pilas y pilotes de acuerdo con el efecto que producen en el suelo.

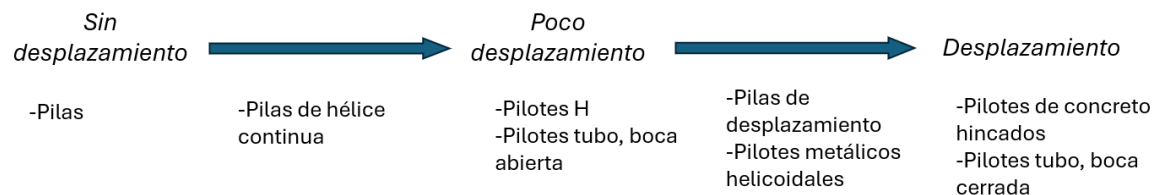


Figura I.6 Cimentaciones profundas (tomado de Paniagua *et al*, 2017)

1.2 Capacidad de carga de pilas / pilotes

La capacidad de carga de una cimentación profunda depende fundamentalmente de la resistencia al corte del suelo y del mecanismo de transferencia de carga al suelo (SMMS, 2001). La capacidad de carga última o carga que produce la rotura o hundimiento de un pilote, Q puede descomponerse, de un modo general, en dos sumandos: uno debido a la fricción lateral del pilote con el terreno lo circunda Q_f , llamado resistencia de fuste, y otro debido a la resistencia de punta Q_p , como se observa en la **Figura I.7**.

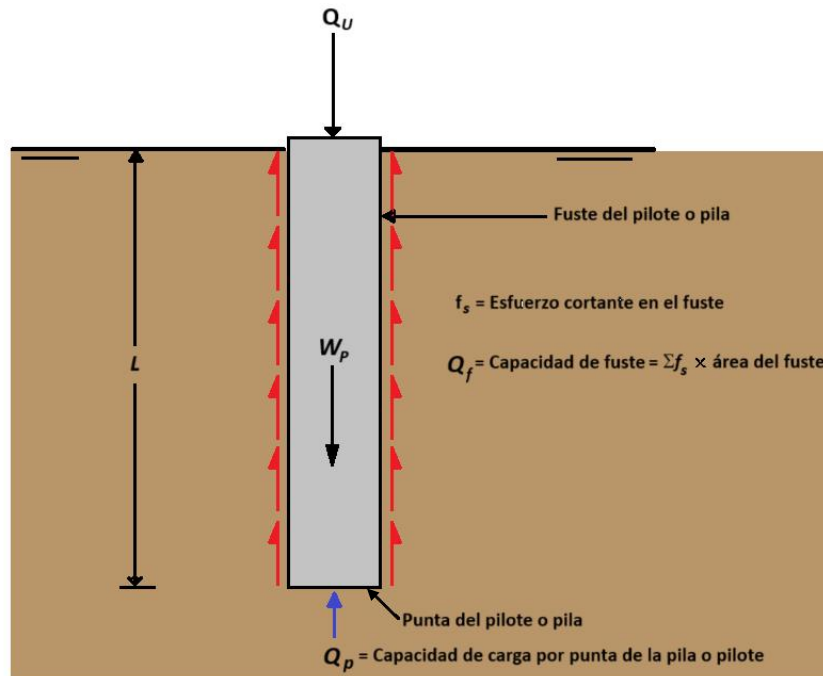


Figura I.7 Resistencia del fuste y punta de la pila (modificado de Budhu, 2011)

Del diagrama de fuerzas se desprende (Ayuso *et al.*, 2005):

$$Q = Q_p + Q_f = q_p A_p + f A_f$$

Donde: q_p = resistencia en la punta
 A_p = área en la punta del pilote
 f = resistencia en el fuste
 A_f = área lateral del pilote

En la **Figura I.8** se muestran las curvas de carga/asentamiento típicas para la carga a compresión del fuste Q_f y la de punta Q_p y la capacidad de carga total Q_t (a) característica en función de las capas del suelo (b) para pilotes de fricción y (c) para pilotes de punta. La capacidad de carga por fuste es muy pequeña en presencia de estratos duros y compactados, y, básicamente, la capacidad de carga de punta constituye la capacidad de carga última del pilote. Mientras que en mayor presencia de estratos estratos blandos, la capacidad de carga por punta es pequeña y es la capacidad de carga por fuste la que representa la capacidad de carga última del pilote.

Entonces, la capacidad de carga depende de (Wrana, 2015):

- 1) Las características de los pilotes, como su longitud, sección transversal y forma
- 2) La configuración del suelo y sus propiedades a corto y largo plazo; y
- 3) El método de instalación de los pilotes

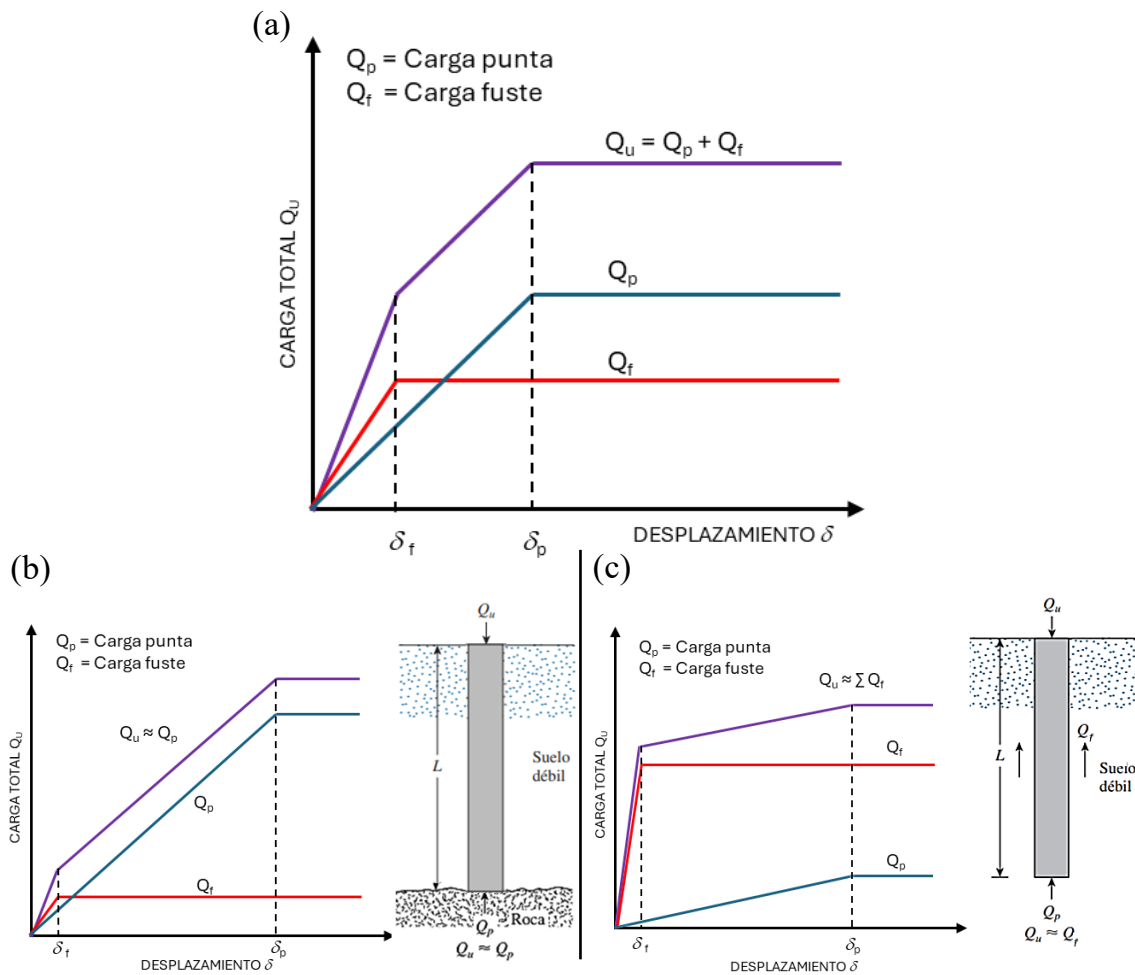


Figura I.8 Curvas carga/desplazamiento típicas para pruebas de carga compresiva (combinado de Das, 2012, y Gavidia, 2019)

La capacidad geotécnica de un pilote cargado axialmente se define como la resistencia última del suelo en el punto en el que el pilote se hunde en el suelo sin que aumente más la carga o el desplazamiento en la cabeza del pilote es demasiado grande para las superestructuras. El uso de ecuaciones estáticas para calcular la capacidad geotécnica de los pilotes está bien establecido y se han sugerido numerosos procedimientos.

Los métodos teóricos o analíticos requieren parámetros fundamentales de la resistencia al esfuerzo cortante y el estado de esfuerzos (c , ϕ , o γ), parámetros que se determinan en laboratorio o mediante correlaciones. Con base en las condiciones del suelo y carga, los métodos analíticos para estimar la resistencia de cimentaciones profundas generalmente son de dos tipos:

➤ Análisis bajo condiciones de esfuerzos totales

Para condiciones no drenadas (cuando las cargas son aplicadas rápidamente en suelos finos saturados) los esfuerzos de presión de poro se presentan en el suelo a esfuerzo efectivo constante y conlleva al análisis conocido como análisis de esfuerzos totales. Con este tipo de

análisis la capacidad del suelo es descrita exclusivamente en términos de la resistencia al corte no drenado (s_u).

➤ Análisis bajo condiciones de esfuerzos efectivos

Cuando un suelo es lo suficientemente granular para que no se desarrollen excesos de presión de poro durante la carga ($\Delta u = 0$) o para condiciones a largo plazo en suelos finos, se prevén condiciones drenadas, por lo que se asume que el comportamiento del suelo será el caso de un material granular (sin cohesión) y los parámetros del suelo fungirán en condiciones de esfuerzo efectivo.

Por otro lado, existen los métodos empíricos (basados en experiencia) que correlacionan directamente valores obtenidos de pruebas efectuadas en campo, como el número de golpes de la prueba de penetración estándar N_{SPT} , con la resistencia cortante unitaria; considerándose la posible incertidumbre que pudiera surgir si no se siguen los procedimientos estándar.

Los métodos semi-empíricos son la combinación datos, experiencia, observación, y fundamentos teóricos -basados en modelos matemáticos- así como principios físicos. La validez de estos métodos suele estar limitada a las regiones donde se llevaron a cabo las experimentaciones, es decir, pruebas de campo. Estos métodos simplifican a los analíticos englobando parámetros que son difíciles de determinar en la práctica. La idea en el gremio, arte y práctica es tener métodos semi-empíricos efectivos para ser aplicados en diferentes territorios que tengan características geotécnicas similares. (Sardón y Sasaki, 2020).

1.2.1 Capacidad de carga en el fuste, Q_f

De acuerdo con Das (2012) la resistencia por fricción, o superficial, de un pilote se puede describir como:

$$Q_f = \sum p \Delta L f$$

donde:

p	perímetro de la sección del pilote
ΔL	longitud incrementada del pilote sobre la cual p y f se consideran constantes
f	resistencia unitaria por fricción a cualquier profundidad z

Como se observa, la capacidad de carga en el fuste está en función de dos factores: la componente geométrica que depende exclusivamente de las dimensiones de la pila y la componente asociada a la resistencia desarrollada entre el suelo y el fuste. La determinación de esta última puede tener niveles de incertidumbre considerables debido al heterogéneo comportamiento de las masas de suelo, razón por la que se han propuesto numerosas ecuaciones y herramientas, cuyo nivel de representatividad varía en función del respaldo o desarrollo teórico que lo sostiene.

Análisis en función de Esfuerzos Totales

El procedimiento que se propuso inicialmente para estimar la resistencia a lo largo del fuste de los pilotes de fricción fue mediante la resistencia no drenada inalterada original del suelo donde estos se hincan, afectada por un factor empírico de adherencia, α , con valores indicativos incluidos en la **Tabla I.1** (Paniagua *et al.*, 2017):

Tabla I.1 Método Alfa

Autores	Formulario								
ALFA. Esfuerzos totales	$f_s = \alpha c_u$								
Tomlinson, 1957	De mediciones en campo, expresa la adherencia como una fracción de la <i>resistencia no-drenada</i> inalterada de la arcilla c_u ; tal fracción es el “factor de adherencia”, α . Los valores de α disminuyen conforme aumenta la rigidez de la arcilla, lo liso de la superficie, y para pilotes metálicos. Los valores de α van de 1.0 en arcillas muy blandas, a 0.2 en arcillas muy duras.								
Zeevaert, 1957 y 1973	$f_s = 0.3 q_u$ q_u es la resistencia a la compresión no confinada en muestras inalteradas de arcilla en su condición original.								
Hansbo y Jendeby, 1983	Solo 70% de c_u . Suelo circundante en condiciones de fluencia.								
Semple y Ridgen, 1984	$f_s = \alpha_1 LE c_u$ $\alpha_1 = 1.0$, para $\Psi = \text{cociente de resistencia} = c_u/\sigma_v \leq 0.35$ $\alpha_1 = 0.365 - 1.392 \log \Psi$, para $0.35 < \Psi < 0.8$ $\alpha_1 = 0.5$, para $\Psi \geq 0.8$ $LE = 1.0$, para $L/B \leq 50$; $L = \text{largo de pilotes}$ $LE = 2.34 - 0.789 \log(L/B)$, para $50 < L/B < 120$ $LE = 0.7$, para $L/B \geq 120$ $B = \text{diámetro o ancho}$ $\sigma_v = \text{esfuerzo efectivo vertical medio}$								
Randolph y Murphy, 1979	$f_s = \alpha c_u$, $\alpha = 0.5[1/\Psi]^{0.5}$, para $0 < \Psi < 1$								
API RP 2A, 2000	$f_s = \alpha LE c_u$ $\alpha = 0.5\Psi^{-0.5}$, para $\Psi \leq 1$; $\alpha = 0.5\Psi^{-0.25}$, para $\Psi > 1$ i) Arcillas de alta compresibilidad (CH) NC: $\alpha = 1.0$ PC: $\alpha = 1.0$, pero $f_{m\acute{a}x} = \max[48 \text{ kPa}, c_u(\text{NC})]$ ii) Arcillas de mediana a baja compresibilidad (CL) <table style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border-bottom: 1px solid black; padding: 0 10px;">c_u, kPa</td> <td style="border-bottom: 1px solid black; padding: 0 10px;">α</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px 10px;">< 24</td> <td style="padding: 5px 10px;">1.0</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px 10px;">24 a 72</td> <td style="padding: 5px 10px;">$0.5 + (72 - c_u)(0.0104)$</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px 10px;">< 72</td> <td style="padding: 5px 10px;">0.5</td> </tr> </table>	c_u , kPa	α	< 24	1.0	24 a 72	$0.5 + (72 - c_u)(0.0104)$	< 72	0.5
c_u , kPa	α								
< 24	1.0								
24 a 72	$0.5 + (72 - c_u)(0.0104)$								
< 72	0.5								

Análisis en función de Esfuerzos Efectivos

La falla en el fuste de un pilote está gobernada por la ley de resistencia de Coulomb en términos de esfuerzos efectivos; los análisis de este tipo se conocen como “Método Beta”. En la siguiente **Tabla I.2** se presentan algunas ecuaciones propuestas por diferentes autores (Paniagua *et al.*, 2017):

Tabla I.2 Método Beta

Método y Autores	Formulación
BETA. Esfuerzos efectivos	$\tau_s = K f(\delta) \sigma_v = \beta \sigma_v$ <p>K = cociente entre esfuerzos efectivos horizontal y vertical δ = ángulo de fricción en la interfaz suelo-pilote σ_v = esfuerzo vertical efectivo</p>
Zeevaert, 1973	$K = (1 - \text{sen}^2 \phi)(1 + \text{sen}^2 \phi)$ $f(\delta) = \tan \phi$ <p>ϕ, obtenido en ensayos drenados con material remoldeado-reconsolidado</p>
Burland, 1973	$K = 1 - \text{sen} \phi$ $f(\delta) = \tan \phi$ <p>ϕ = ángulo efectivo de fricción interna</p>
Kerisel, 1976	$K f(\delta) = \frac{(2 - \text{sen} \phi)(\text{sen} 2\phi)}{4} = \beta$
Meyerhof, 1976	<p>Arcillas PC: $\beta = 1.5(1 - \text{sen} \phi) \tan \phi \sqrt{OCR}$ OCR = cociente de preconsolidación</p>
Flaate y Selnes, 1977	$\tau_s = 0.4\sqrt{OCR} \mu_L \sigma_v$ $\mu_L = \frac{L+65.6}{2L+65.6}, L \text{ en pies}$

La contribución a la capacidad de carga última en un pilote o pila por fuste en un medio granular, se calcula con:

$$P_{fu} = p \sum_{i=1}^{n=\text{estrato}} \beta_i \sigma'_{vi} \Delta z$$

El parámetro β esta definido de la siguiente forma:

$$\beta = K \tan \delta$$

En este se considera el tipo de suelo en donde se construirá la cimentación, el procedimiento constructivo y el material de la cimentación. En el manual Canadiense de Ingeniería de Cimentaciones se presentan los rangos de valores β que se presentan en la **Tabla I.3**.

Tabla I.3 Rango de coeficientes β (CGS, 2006)

Tipo de suelo	Pilotes hincados
Limo	0.3-0.5
Arena suelta	0.3-0.8
Arena medianamente compacta	0.6-1.0
Arena densa	0.8-1.2
Grava	0.8-1.5

Esta ecuación fue resultado de mediciones realizadas en gravas densas arenosas; y dada la naturaleza de las pruebas se debe emplear con mesura. Existe una gran cantidad de valores en tablas y ecuaciones para definir las variables, por tanto, siempre debe utilizarse la experiencia y el buen juicio antes de emplearlos. La mayor dificultad en la aplicación del método estriba en la adopción del valor del coeficiente K que relaciona al esfuerzo lateral con el vertical, y en todo caso, del producto $K \tan \delta$ (Paniagua *et al.*, 2017).

1.2.2 Capacidad de carga en la punta, Q_p

De acuerdo con las ecuaciones de Terzaghi en cimentaciones superficiales, la ecuación general de la capacidad de soporte de carga última se puede expresar como (Das, 2012):

$$q_u = c'N_c^* + qN_q^* + \gamma BN_\gamma^*$$

donde N_c^* , N_q^* y N_γ^* son los factores de capacidad de carga que incluyen los factores de forma y profundidad necesarios. La resistencia última por área unitaria desarrollada en la punta de un pilote, q_p , se puede expresar con esta ecuación, cambiando los valores de N_c^* , N_q^* y N_γ^* . Debido a que el ancho de un pilote es relativamente pequeño, el término γBN_γ^* se puede omitir sin introducir un error considerable

$$q_p = q_u = c'N_c^* + qN_q^*$$

Por lo tanto, la capacidad de punta de los pilotes es

$$Q_p = A_p q_p = A_p (c'N_c^* + q'N_q^*)$$

donde

- A_p área de la punta del pilote.
- c' cohesión del suelo que soporta la punta del pilote.
- q_p resistencia unitaria de punta.
- q' esfuerzo vertical efectivo al nivel de la punta del pilote.
- N_c^*, N_q^* factores de capacidad de carga.

Al igual que la capacidad de carga en el fuste, la capacidad de carga en la punta está en función de dos factores: la componente geométrica que depende exclusivamente de las dimensiones de la pila y la componente asociada a la resistencia ejercida en el suelo bajo la punta.

Análisis en función de Esfuerzos Totales

La resistencia unitaria última de la punta puede expresarse (Meyerhof, 1976), como:

$$q_p = c_u N_c + p_v N_q \leq q_m$$

donde:

- c_u cohesión unitaria no drenada media cerca y debajo de la punta del pilote;
- p_v esfuerzo vertical total en la punta,
- N_c y N_q factores adimensionales de capacidad de carga;
- q_m es un valor límite de la resistencia unitaria de punta

Para la condición no drenada ($\phi_u = 0$), $N_q = 1$, y el valor N_c frecuentemente usado para pilotes hincados en arcilla es de 9, aunque se reconocen valores de 10 para arcillas PC insensitivas, y de 5 para arcillas NC, frágiles y sensitivas. Según lo propuesto por Skempton (1951) el factor de capacidad de carga N_c tiene un valor de 9 para cimentaciones profundas con una relación profundidad entre base mayor o igual a 4. Este valor es el más utilizado a nivel mundial (Paniagua *et al.*, 2017).

Budhu (2011) propone usar la siguiente expresión de N_c :

$$N_c = 9 \text{ para } \frac{L}{D} \geq 3; (s_u)_b > 25 \text{ kPa}$$

$$N_c = 6 \text{ para } (s_u)_b \leq 25 \text{ kPa}$$

donde $(s_u)_b$ es la resistencia no drenada del suelo cohesivo debajo de punta de la pila. Puede demostrarse, utilizando la ecuación de capacidad de carga de Terzaghi, que la resistencia unitaria de la base del pilote es

$$Q_p = N_c (s_u)_b A_b$$

Análisis en función de Esfuerzos Efectivos

Para obtener la capacidad de carga última por punta se debe multiplicar la capacidad de carga unitaria por punta por el área transversal de la misma:

$$P_{pu} = A_b q_{pu}$$

donde:

- A_b área de la base de la pila,
- q_{pu} capacidad de carga unitaria por punta definida por la siguiente ecuación:
 $q_{pu} = \sigma_{vb} \cdot N_q^*$

Los valores propuestos por algunos autores del factor N_q^* se presentan en la **Figura I.9**. Empotrar la cimentación profunda en el estrato resistente puede llevar a perforarlo por completo, llevando a no tener el apoyo suficiente. Por eso, durante la campaña de exploración, se debe verificar el espesor del estrato resistente. Es preciso asegurarse que el mecanismo de la resistencia por punta se desarrolle totalmente dentro del estrato resistente (Paniagua *et al.*, 2017).

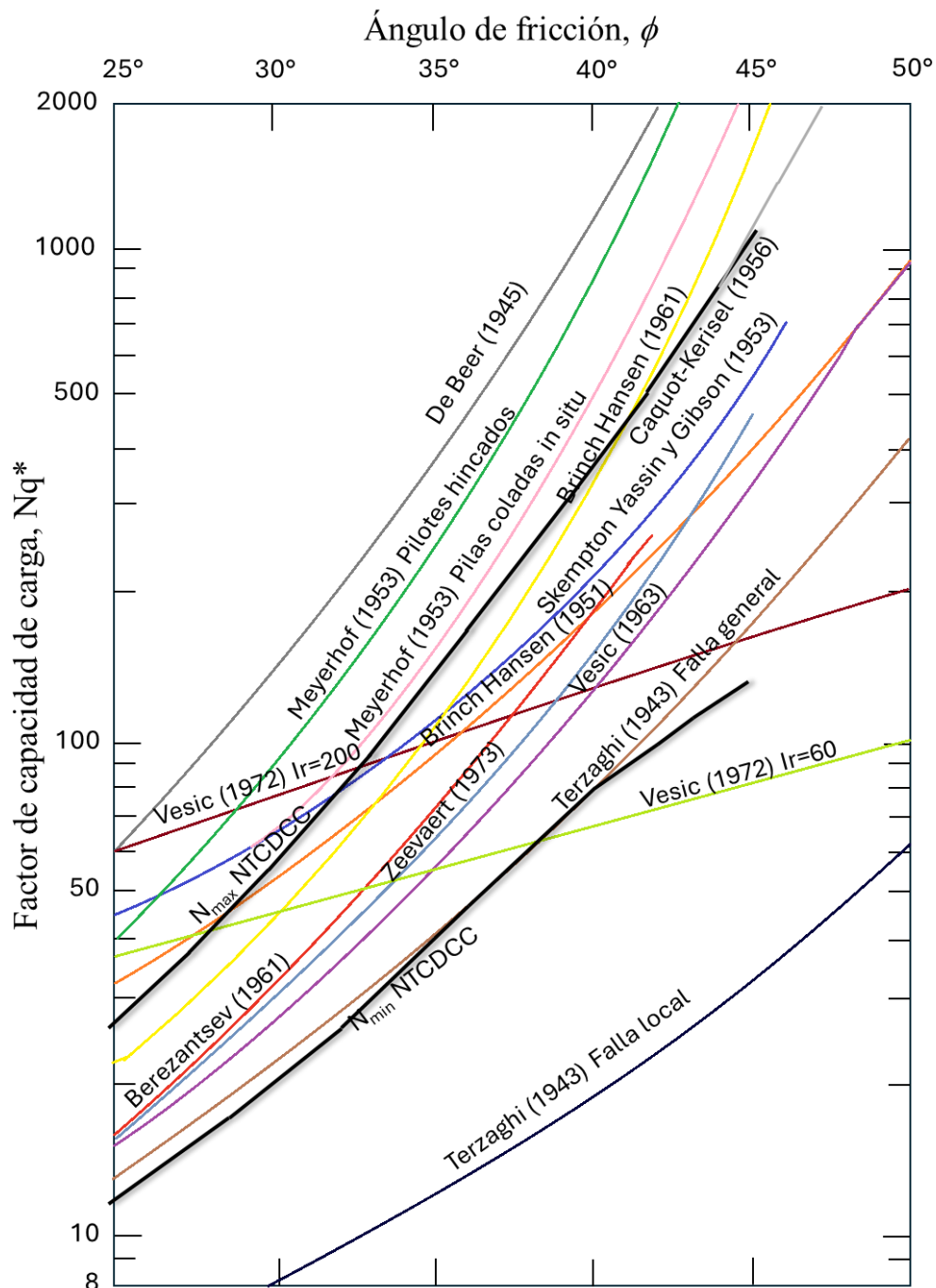


Figura I.9 Factor de capacidad de carga N_q^* propuesto por diferentes autores (modificado de Paniagua *et al.*, 2017)

1.2.3 Pruebas de carga a pilotes / pilas

Una alternativa para determinar con mayor precisión la capacidad de carga y desplazamientos de pilas o pilotes en un sitio específico es realizar una prueba de carga a escala real. Dependiendo del tamaño del proyecto y de otras variables propias del mismo, estas pruebas pueden llevarse a cabo durante la fase de diseño o en la fase de construcción (FHWA, 2016).

Los propósitos de una prueba de carga son (Budhu, 2011):

- Determinar la capacidad de carga de un pilote o de un grupo de pilotes, especialmente cuando el diseño requiere métodos que están fuera de la práctica aceptada.
- Determinar el asentamiento de un único pilote bajo cargas.
- Verificar la capacidad de carga estimada.
- Para obtener información sobre la transferencia de carga en la superficie de fricción y en la punta.
- Para cumplir con la normativa.

Resultan un recurso muy justificado porque en el cálculo teórico de la capacidad de carga y de los desplazamientos, se adoptan parámetros e hipótesis de diseño que conlleva diferentes grados de incertidumbre, como la caracterización geotécnica de los suelos y especialmente la influencia del proceso constructivo en la respuesta del cimiento; es con una prueba de carga que estas condiciones inciertas pueden ser minimizadas o entendidas totalmente (Paniagua *et al*, 2017). Existe varias pruebas de carga y cada una persigue objetivos diferentes, en la **Figura I.10** se muestra un diagrama de los tipos de pruebas.

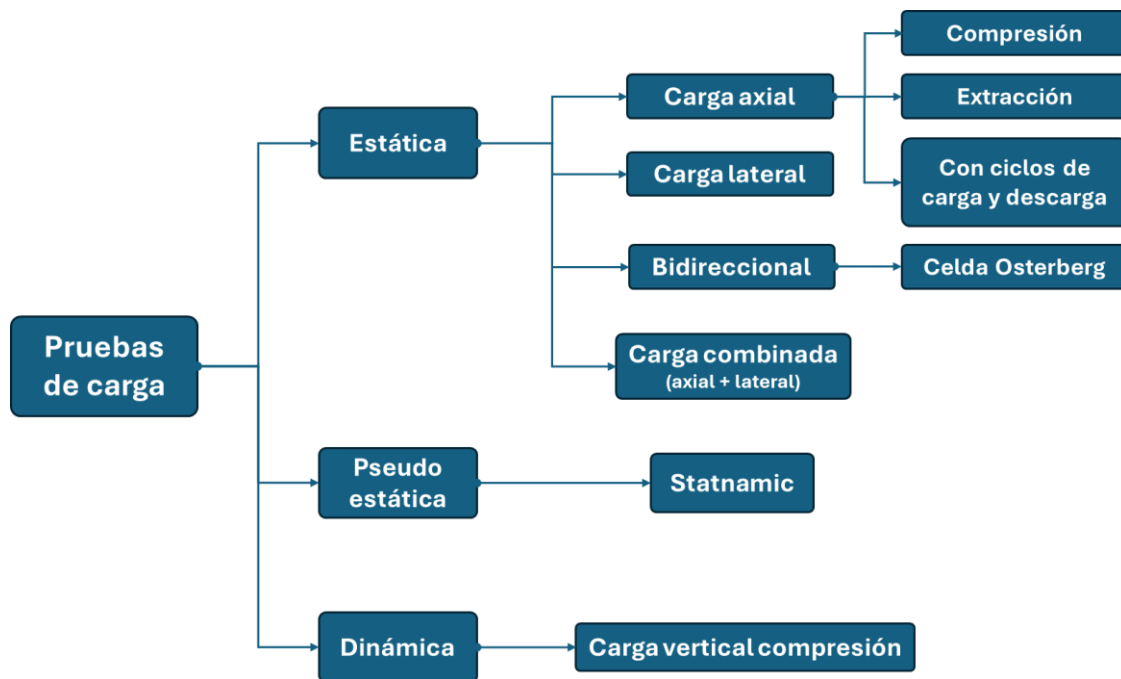


Figura I.10 Tipos de pruebas de carga en pilas/pilotes (modificado de Paniagua *et al*, 2017)

Una prueba de carga convencional es aquella en donde la carga se aplica directamente sobre la cabeza de la pila, en la **Figura I.11** se muestra un diagrama esquemático de la configuración de carga del pilote para la prueba de compresión axial en campo. La carga se aplica al pilote mediante un gato hidráulico que reacciona contra un marco de carga. Se aplican cargas, en etapas incrementales, al pilote y se deja transcurrir tiempo suficiente después de cada incremento de manera que ocurra una cantidad pequeña de asentamiento. La cantidad de carga que se aplicará en cada etapa variará, dependiendo de los reglamentos de construcción locales (Das, 2011). Después de cada incremento, se observa el hundimiento de la cabeza del pilote en función del tiempo; se aplica otro incremento hasta que la rapidez del hundimiento sea muy pequeña. Al aproximarse a la capacidad de carga se reduce el tamaño de los incrementos para definir con mayor exactitud la capacidad de carga del pilote. Finalmente, la altura de la cabeza del pilote se mide al remover la carga (Peck *et al*, 1982).

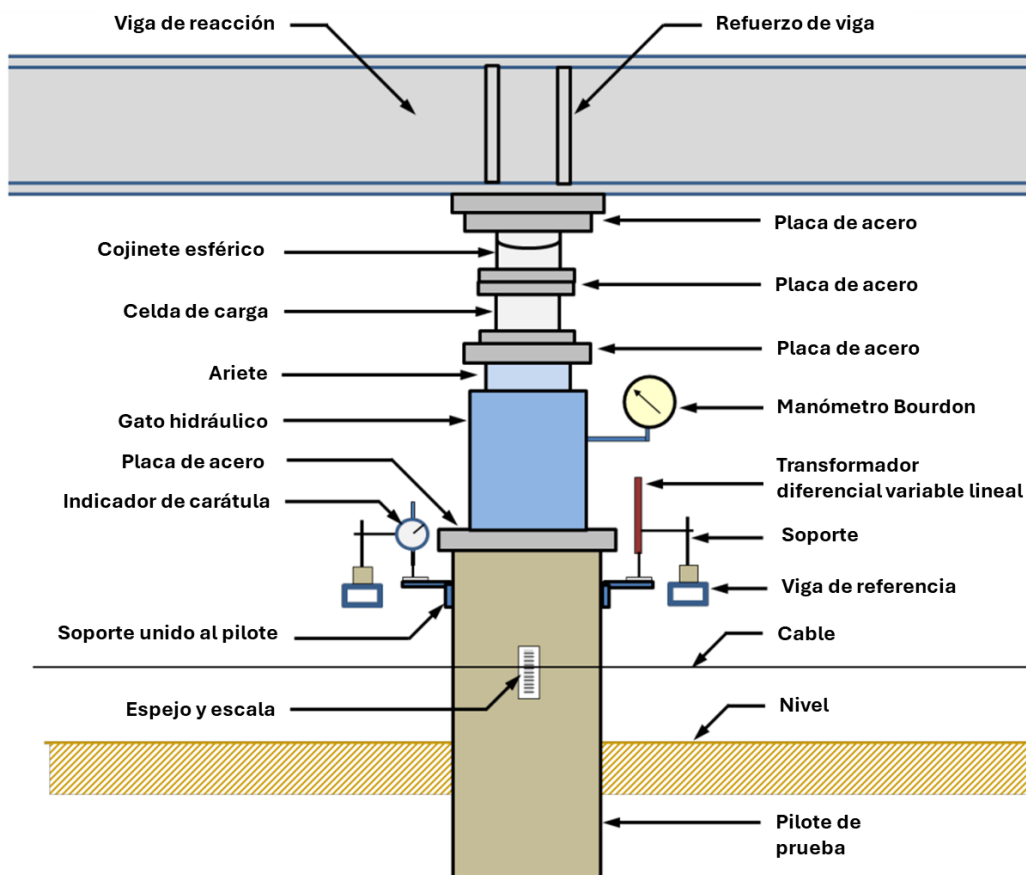


Figura I.11 Diagrama esquemático de la configuración de la prueba de carga en un pilote (modificado de FHWA, 2016)

Quizás las referencias de uso más extendido para definir los procedimientos de prueba de carga axial a compresión o a extensión, sean las normas ASTM D1143 (2013) y ASTM D3689 (2013), respectivamente. En la **Figura I.12** se resume de manera esquemática los siete procedimientos para realizar pruebas de carga estática en compresión refiere la norma ASTM D1143.

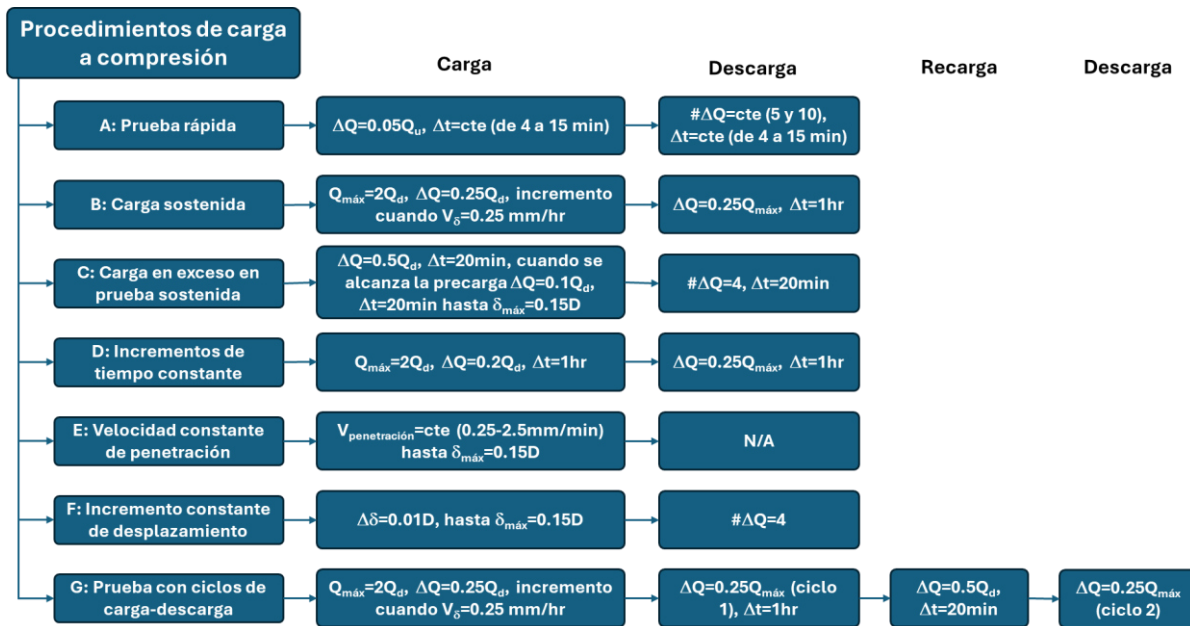


Figura I.12 Procedimientos de carga recomendado por las normas ASTM D1143/D1143M-07 2013 (modificado de Paniagua *et al*, 2017)

Muchos de los métodos que se utilizan actualmente para calcular la capacidad de carga de los pilotes se basan en bases de datos de experimentos y pruebas de carga. El procedimiento que más se utiliza para presentar resultados de prueba es la gráfica de carga en la cabeza del pilote contra desplazamiento. Otros resultados que pueden graficarse incluyen el tiempo de cabeza de pilote contra desplazamiento y transferencia de carga (de instrumentación a lo largo del fuste del pilote). Las formas de las gráficas de carga/desplazamiento varían considerablemente, al igual que los procedimientos para evaluarlas para calcular la carga límite.

En la **Figura I.13** se muestran los resultados de una prueba de carga en campo típica, en la que la carga total se dibuja en función del hundimiento de la cabeza del pilote. La curva "a" representa un pilote que se hundió súbitamente cuando la carga alcanzó un valor definido llamado carga última o capacidad del pilote. Por otra parte, las curvas "b" y "c" no muestran quiebres bien definidos; en consecuencia, la determinación de la carga máxima del pilote es en cierto grado cuestión de interpretación (Peck *et al*, 1982).

Aparecen problemas en la interpretación de datos por la falta de una definición universalmente reconocida de falla. Para un pilote que tiene una capacidad sustentadora mayor que la del suelo, se puede considerar que ocurre una falla cuando el desplazamiento del pilote continúa bajo carga sostenida o ligeramente creciente (pilote se hunde). En general, el término carga de falla debe sustituirse con carga interpretada de falla para evaluaciones de gráficas de carga versus desplazamiento de pilotes. La definición de carga interpretada de falla debe estar basada en reglas matemáticas para producir resultados repetibles sin estar influidos por interpretación subjetiva del ingeniero (Merritt *et al*, 2008).

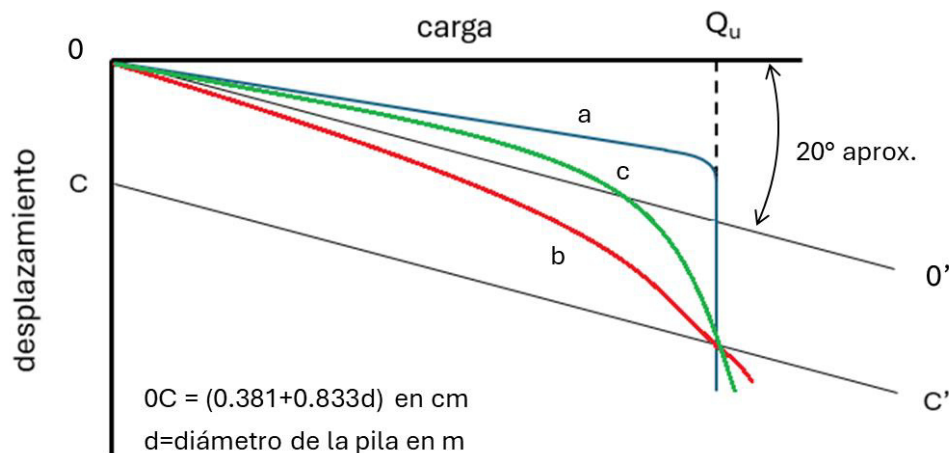


Figura I.13 Resultados típicos de pruebas de carga. De acuerdo con el método de Davisson (1972), la línea 00' representa la deformación elástica del pilote, descrita con la expresión PL/AE , la línea auxiliar CC' que es paralela a la línea 00' se encuentra a una distancia 0C, que corresponde al asentamiento en la punta necesario para que adquiriera la capacidad de carga (modificado de Peck, 1982)

A lo largo de los años diferentes investigadores han propuesto métodos para definir la carga última a partir de los resultados de una prueba de carga. Algunos métodos que se encuentran en la literatura técnica están Vander Veen (1953), Brinch Hansen (1963), De Beer (1967), Chin (1970), Davisson (1972), Mazurkiewicz (1972), y Butler & Hoy (1977) (Fellenius, 1980).

Capítulo II - Redes Neuronales

Las redes neuronales (RN) son técnicas populares de la Inteligencia Artificial (IA) que simulan el mecanismo de aprendizaje de los organismos biológicos (Aggarwal, 2018). Las RN mimetizan el modo en que el cerebro humano procesa la información, es decir, trabajan mediante la simulación de una gran cantidad de unidades de procesamiento interconectadas que representan versiones abstractas de neuronas (IBM, 2021). Son procesos algorítmicos que tienen una arquitectura informática novedosa en relación con los ordenadores convencionales. Utilizan operaciones computacionales muy sencillas (suma, multiplicaciones y elementos lógicos fundamentales) para resolver problemas complejos, no lineales o estocásticos. Un algoritmo convencional empleará conjuntos complejos de ecuaciones y se aplicará sólo a un problema determinado y exactamente a él. Una RN será a) computacional y algorítmicamente muy sencilla y b) tendrá una característica de autoorganización que le permitirá valerse para una amplia gama de problemas (Graupe, 2019).

De acuerdo con Sánchez (2006) las RN ofrecen ventajas como:

- **No linealidad.** El procesador neuronal es básicamente no lineal y, por consecuencia, la red neuronal también.
- **Transformación entrada-salida.** El proceso de aprendizaje consiste básicamente en presentar a la red un ejemplo y modificar sus pesos sinápticos de acuerdo con sus respuestas. Aprende, por lo tanto, una transformación entrada/salida.
- **Adaptabilidad.** La red tiene la capacidad de adaptar sus parámetros, en tiempo real.
- **Uniformidad en el análisis y el diseño.** Esto permite garantizar características precisas.
- **Analogía con las redes biológicas.** Esto permite la utilización mutua del conocimiento de las dos áreas.

Algunas de las aplicaciones más tradicionales de las RN son (Masters, 1993):

- **Clasificación** – Las RN pueden utilizarse para determinar tipos de cultivos a partir de fotografías por satélite, distinguir un submarino de una roca a partir de su retorno sonar e identificar enfermedades del corazón a partir de electrocardiogramas. Cualquier tarea que pueda realizarse mediante un análisis discriminante tradicional puede realizarse al menos igual de bien (y casi siempre mucho mejor) mediante una red neuronal.
- **Reducción del ruido** - Una RN puede entrenarse para reconocer una serie de patrones. Estos patrones pueden ser partes de series temporales, imágenes, etcétera. Si se presenta a una red correctamente entrenada una versión de uno de estos patrones, corrompida por el ruido, la red puede proporcionar el patrón original sobre el que fue entrenada. Esta técnica se ha utilizado con gran éxito en algunos problemas de restauración de imágenes.
- **Predicción** - Un problema muy común es el de predecir el valor de una variable dados los valores históricos de la misma (y quizá de otras variables).

Una neurona es una célula del cerebro que recibe información eléctrica o química de otras neuronas conectadas a ella. A grandes rasgos, una neurona suma todas las entradas que recibe de otras neuronas y, si la suma alcanza determinado umbral, la neurona se activa (Mitchell, 2019). El árbol ramificado de dendritas proporciona un conjunto de entradas a la neurona, mientras que el axón actúa como salida. Esta información es procesada en el cuerpo celular o soma (Bishop, 1996).

Desde un punto de vista funcional las neuronas constituyen unidades básicas de procesamiento de información (Bojórquez, 2011). Para Rosenblatt (1960), el procesamiento de la información en las neuronas puede simularse mediante un programa informático (perceptrón) que tiene múltiples entradas numéricas y una salida. De forma análoga a la neurona, el perceptrón suma sus entradas y, si la suma resultante es igual o superior al umbral del perceptrón, éste emite el valor 1 (“se activa”); en caso contrario, emite el valor 0 (“no se activa”). Para simular las diferentes fuerzas de las conexiones a una neurona, propone que se asignara un peso numérico a cada una de las entradas de un perceptrón; cada entrada se multiplica por su peso antes de añadirse a la suma. El umbral de un perceptrón es simplemente un número fijado por el programador. Al calcular la suma de sus entradas, la

neurona da más peso a las entradas de conexiones más fuertes que a las entradas de conexiones más débiles. Los neurocientíficos creen que los ajustes en la fuerza de las conexiones entre neuronas son una parte clave de cómo se produce el aprendizaje en el cerebro (Mitchell, 2019). En la **Figura II.1** se muestra en esquema una neurona y su análogo informático (perceptrón).

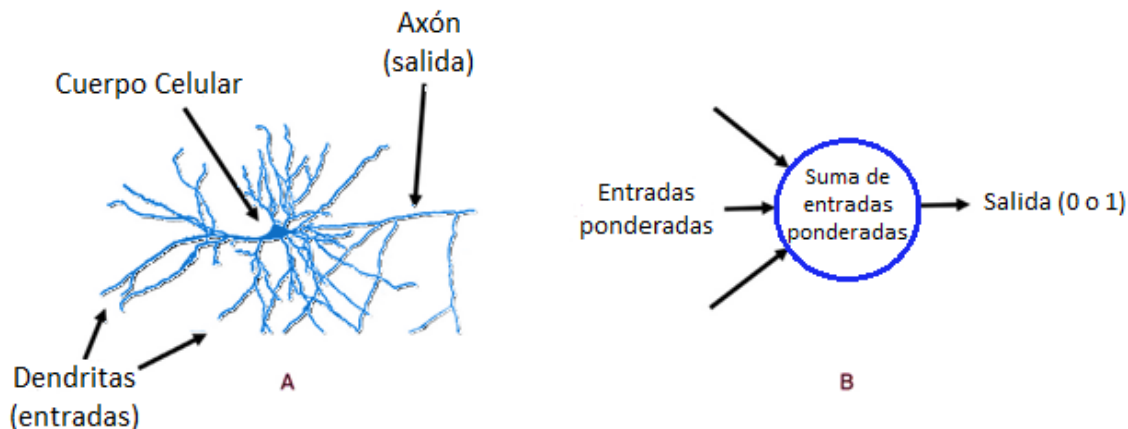


Figura II.1 Neurona del cerebro (A); perceptrón simple (B) (modificado de Mitchell, 2019)

2.1 Descripción de una neurona

De acuerdo con Martín (2007) se denomina procesador elemental, neurona o perceptrón a un dispositivo simple de cálculo que, a partir de un vector de entrada procedente del exterior o de otras neuronas, proporciona una única respuesta o salida. Los elementos que constituyen la neurona de etiqueta i , como se muestra en la **Figura II.2**, son los siguientes:

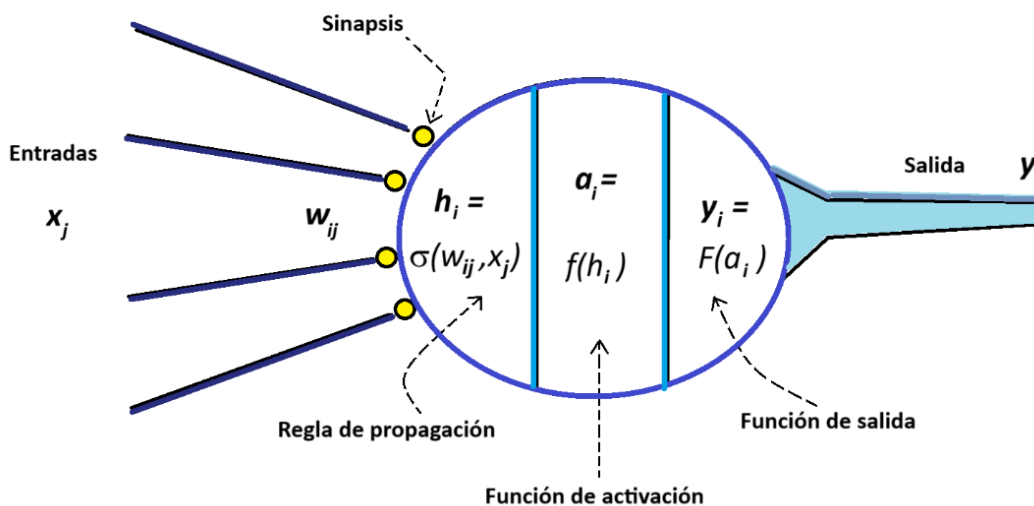


Figura II.2 Modelo genérico de neurona (modificado de Martín, 2007)

- **Conjunto de entradas**, $x_j(t)$.
- **Pesos sinápticos** de la neurona i , w_{ij} que representan la intensidad de interacción entre cada neurona
- **Regla de propagación** $\sigma((w_{ij}, x_j(t)))$, que proporciona el valor potencial postsináptico $h_i(t) = \sum(w_{ij}, x_j(t))$ de la neurona i en función de sus pesos y entradas.
- **Función de activación** $f_i(a_i(t-1), h_i(t))$, que proporciona el estado de activación actual $a_i(t-1)$ y de su potencial postsináptico actual.
- **Función de salida** $F_i(a_i(t))$, que proporciona la salida actual $y_i(t) = F_i(a_i(t))$ de la neurona i en función de su estado de activación.

En la capa de entrada contiene j nodos que transmiten las j características $\bar{X} = [x_1 \dots x_j]$ los pesos $\bar{W} = [w_1 \dots w_j]$ a un nodo de salida. La capa de entrada no realiza ningún cálculo por sí mismo. La función lineal o regla de propagación

$$\bar{W} \cdot \bar{X} = \sum_{i=1}^j w_i x_i$$

se calcula en el nodo de salida. Posteriormente, el signo de este valor real se utiliza para predefinir la variable dependiente de \bar{X} . Por lo tanto, la predicción \hat{y} se calcula de la siguiente manera con la función de activación:

$$\hat{y} = f\{\bar{W} \cdot \bar{X}\} \quad \hat{y} = f\left\{\sum_{i=1}^j w_i x_i\right\}$$

En una RN, las funciones de activación son muy importantes, ya que ayudan a aprender y dar sentido a los mapeos no lineales y complicados entre las entradas y las salidas correspondientes. Existen muchas funciones de activación que se usan de acuerdo con los datos que se tengan y el problema a resolver, entre las funciones más comunes se encuentra (Sharma, 2020):

- *Función binaria escalonada*. Es una de las funciones más simples existentes, se usa para clasificar los datos en dos clases

$$f(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$$

- *Función Lineal*. La función de activación lineal es directamente proporcional a la entrada, son ideales cuando se requiere interpretabilidad y para tareas sencillas.

$$f(x) = ax$$

- *Función Sigmoide*. Es la función de activación más utilizada, ya que se trata de una función no lineal. La función sigmoidea transforma los valores en el rango de 0 a 1,

no es simétrica respecto a cero, lo que significa que los signos de todos los valores de salida de las neuronas serán iguales. Se puede definir como:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

- *Función Tanh o tangente hiperbólico*. Esta función es similar a la función sigmoidea, pero es simétrica alrededor del origen. Esto resulta en diferentes signos de las salidas de las capas anteriores que se alimentarán como entrada a la siguiente capa. Se puede definir como:

$$f(x) = 2 \cdot \text{sigmoide}(2x) - 1 = \frac{1 - e^{-x}}{1 + e^{-x}}$$

- *Función ReLU*. Por sus siglas de Rectified Liner Unit (Unidad de Línea Rectificada) es una función de activación no lineal muy utilizada. La ventaja de utilizar esta función es que todas las neuronas no se activan al mismo tiempo. Esto implica que una neurona se desactivará sólo cuando la salida de la transformación lineal sea cero. Se puede definir matemáticamente como:

$$f(x) = \max(0, x)$$

- *Función SoftMax*. Es una combinación de varias funciones sigmoideas, puede utilizarse para problemas de clasificación multiclase. Como una función sigmoidea devuelve valores en el intervalo de 0 a 1, éstos pueden tratarse como probabilidades de los puntos de datos de una clase concreta. La función, para cada punto de datos de todas las clases individuales, devuelve la probabilidad. Se puede expresar como:

$$f(x_j) = \frac{e^{x_j}}{\sum_{k=1}^K e^{x_k}} \quad \text{para } j = 1, \dots, K.$$

- *Función Swish*. Es una función relativamente nueva, la característica distintiva de la función Swish es que no es Monotónica, lo que significa que el valor de la función puede disminuir, aunque los valores de las entradas aumenten. En algunos casos, Swish supera incluso a la función ReLU. Se puede expresar matemáticamente como:

$$f(x) = \frac{x}{1 - e^{-x}}$$

El comportamiento de estas funciones de activación se muestra en la **Figura II.3**. La elección de la función de activación es una parte fundamental del diseño redes neuronales, se realiza únicamente basándose en los valores de activación que se desee que alcancen.

La salida definitiva se produce al aplicarle una función salida al nivel de activación. En un Perceptrón la función de salida es una función escalón que depende del umbral (θ), en este caso la función de salida F es binaria (Isasi, 2004):

$$y = F(\hat{y}, \theta) \quad F(\hat{y}, \theta) = \begin{cases} 1 & \text{si } \hat{y} > \theta \\ -1 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

TIPO DE FUNCIÓN DE ACTIVACIÓN	ECUACIÓN	EJEMPLO O MODELO	GRÁFICO
Función "Step" o Heaviside	$f(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 0.5 & x = 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases}$	PERCEPTRÓN	
Función Signo	$f(x) = \begin{cases} -1 & x < 0 \\ 0 & x = 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases}$	PERCEPTRÓN	
Función Lineal	$f(x) = x$	ADALINE	
Función lineal definida a trozos	$f(x) = \begin{cases} 1 & x \geq \frac{1}{2} \\ x + \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} < x < \frac{1}{2} \\ 0 & x \leq -\frac{1}{2} \end{cases}$	MÁQUINAS DE VECTOR SOPORTE	
Función Gaussiana	$f(x) = Ae^{-Bx^2}$	REDES NEURONALES RBF	
Función Sigmoide o Logística (Curva "S")	$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	REDES NEURONALES MULTICAPA	
Tangente hiperbólica	$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$	REDES NEURONALES MULTICAPA	
Función rectificadora o función ReLU Unidad Lineal Rectificada	$f(x) = \max(0, x)$	REDES NEURONALES MULTICAPA	
Función Sinusoidal	$f(x) = A \sin(\omega x + \varphi)$	CLASIFICACIÓN DE PATRONES	
Función rectificadora suavizada (softplus)	$f(x) = \ln(1 + e^x)$	REDES NEURONALES MULTICAPA	

Figura II.3 Funciones de activación en redes neuronales (tomado de Jooper, 2021)

2.2 Topologías neuronales

Las unidades de procesamiento se organizan en capas. Hay tres partes normalmente en una red neuronal: una capa de entrada, con unidades que representan los campos de entrada; una o varias capas ocultas; y una capa de salida, con una unidad o unidades que representa el campo o los campos de destino (**Figura II.4**).

- Capa de entrada: compuesta por neuronas que reciben datos o señales procedentes del entorno.
- Capa de salida: aquella cuyas neuronas proporcionan la respuesta de la red neuronal.
- Capa oculta: aquella que no tiene una conexión directa con el entorno.

La forma en que se conectan más de uno de estos elementos define la **topología** de la red existiendo diferentes clasificaciones de acuerdo con diversos factores como la dirección en la que fluye la información de la red, la conectividad y el número de capas

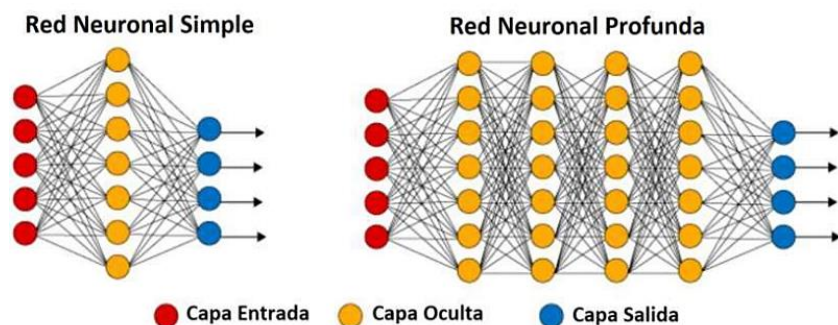


Figura II.4 Esquema de capas de RN (tomado de Pons, 2022)

2.2.1 Perceptrón monocapa

En la red de una sola capa, un conjunto de entradas se asigna directamente a una salida mediante el uso de una variación generalizada de una función lineal. Esta simple instancia de una red neuronal también se denomina perceptrón, como se observa en la **Figura II.5** (Aggarwal, 2018). Este tipo de red es útil en tareas relacionadas con auto-asociación, es decir, regenera la información incompleta o distorsionada de patrones que se presenta en la red.

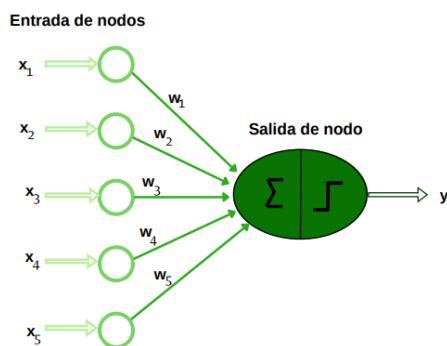


Figura II.5 Arquitectura básica del perceptrón (modificado de Aggarwal, 2018)

2.2.2 Perceptrón multicapa

Las RN multicapa son similares, la única diferencia es que podemos tener varias salidas, teniendo un vector de salida en vez de un único valor. La extensión a tres o más capas amplía las clases de problemas que pueden representarse y, por tanto, resolverse mediante RN hasta, esencialmente, ningún límite (Graupe, 2018). Contienen varias capas de cálculo; las capas intermedias adicionales (entre la entrada y la salida, **Figura II.6**) se denominan capas ocultas porque los cálculos realizados no son visibles para el usuario. La arquitectura específica de las redes neuronales multicapa se conoce como redes feed-forward, porque las capas sucesivas se alimentan unas a otras en la dirección de avance de la entrada a la salida (Aggarwal, 2018).

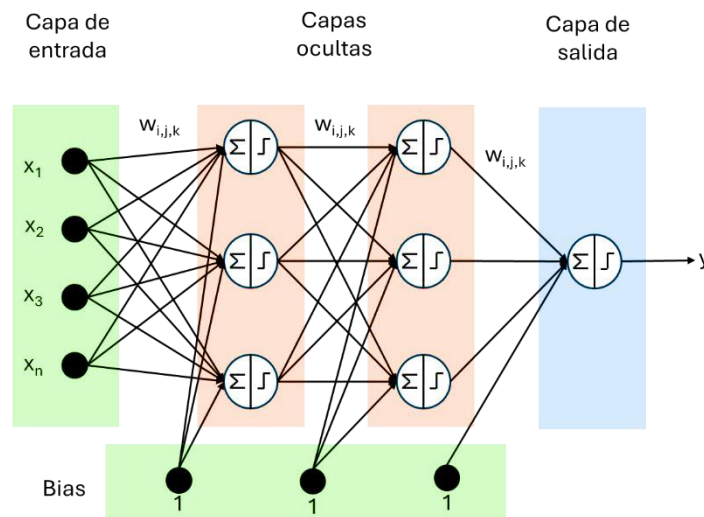


Figura II.6 Esquema de perceptrón multicapa (modificado de ACP, 2015)

2.3 Regla de entrenamiento-aprendizaje

El aprendizaje consiste en la presentación de patrones a la red y la posterior modificación de los pesos de las conexiones siguiendo alguna regla de aprendizaje que intenta optimizar su respuesta, normalmente minimizando el error u optimizando alguna "función de energía". El modo más sencillo de aprendizaje es la presentación de patrones de entrada con patrones de salida deseados (objetivos) para cada patrón de entrada, el llamado *aprendizaje supervisado*. Si no se le presentan a la red patrones de salida deseados, diremos que se trata de *aprendizaje no supervisado*. Porque no se le dice a la red que resultados debe dar, sino que se le permite seguir alguna regla de autoorganización. Un tercer tipo de aprendizaje, a medio camino entre los anteriores, es el llamado *aprendizaje reforzado*. En este caso, el supervisor se limita a indicar si la salida ofrecida por la red es correcta o incorrecta, pero no indica que respuesta debe dar.

Sea cual sea el tipo de aprendizaje utilizado, una característica esencial de la red es la regla de aprendizaje utilizada, que indica cómo se modifican los pesos de conexión de la red en

función de los datos utilizados en la entrada, es decir, el historial de aprendizaje. Por ejemplo, entre los algoritmos de aprendizaje supervisado, la regla delta generalizada, cambia los pesos en cada ciclo realizando el aprendizaje el aumento proporcional a la tasa de cambio del error peso por peso, en el negativo. El aprendizaje requiere la presentación repetida de un número relativamente grande de ejemplos de entrenamiento hasta que un sistema de respuesta satisfactoria (como error medido o función de la energía utilizada). Es habitual disponer de un conjunto de datos distintos de los utilizados para el entrenamiento, para los que se conoce la respuesta correcta, y utilizarlos como prueba, evaluando así si la red responde adecuadamente frente a datos distintos de los utilizados durante el aprendizaje (generalización), si es así se considera que la red funciona bien y puede pasar a la fase de aplicación (recuerdo), es decir, puede utilizarse para obtener un resultado frente a datos completamente nuevos para los que no se conoce la respuesta correcta (Stanimirovic, 2019).

El proceso general de aprendizaje o entrenamiento de las RN implica la optimización no lineal de una función de error. Una buena RN debe ser capaz de minimizar o converger simultáneamente hacia el mínimo de ambos tipos de errores: el error de ajuste o aprendizaje, y el error de predicción. Para lograrlo, se emplean métodos de optimización local y global que permiten encontrar los vectores de pesos. Los métodos de optimización local suelen basarse en algoritmos de gradiente de primer orden y de segundo orden. En ambos casos, se utilizan técnicas iterativas para minimizar la función de error. El algoritmo de descenso más conocido es el algoritmo de descenso de gradiente (Yang, 2012).

2.4 Algoritmo de aprendizaje: Backpropagation.

Fundamentalmente, los datos de entrenamiento se mejoran mediante la retropropagación (Backpropagation, BP) de errores lograda por un algoritmo que responde a los datos de salida, se refiere a la transmisión de información de error proporcionada por los cálculos de salida de las redes neuronales basados en los datos. Se calcula una tasa de error y se transmite de vuelta a través de la red neuronal antes de la siguiente iteración (**Figura II.7**). En el nivel más alto de abstracción, el aspecto esencial de los cálculos puede describirse como (Kerrigan, 2022):

$$\text{tasa de error} = \text{resultado real} - \text{resultado esperado} \quad (2.1)$$

En la red neuronal monocapa, el proceso de entrenamiento es relativamente sencillo porque el error (o función de pérdida) puede calcularse como una función directa de los pesos, lo que permite calcular fácilmente el gradiente. En el caso de las redes multicapa, el problema es que la pérdida es una complicada función de composición de los pesos de las capas anteriores. El gradiente de una función de composición se calcula mediante el algoritmo de retropropagación (Aggarwal, 2018). Este algoritmo fue propuesto por Rumelhart, Hinton y Williams en 1986 para el entrenamiento de perceptrones multicapa, superando así las deficiencias que tenía las de monocapa.

Una de las modificaciones algoritmo BP es aplicar algún sesgo (*bias*) a las neuronas de una RN, el sesgo puede ser entrenable cuando se asocia con un peso que se modificará como

cualquier otro peso. Por lo tanto, el sesgo se realiza en términos de una entrada con alguna constante (digamos +1 o x_0) de entrada, y el sesgo exacto b .

$$b_i = w_0 x_0$$

w_{0i} es el peso del término de sesgo a la entrada de la neurona i . Obsérvese que el sesgo puede ser positivo o negativo, dependiendo de su peso (Aggarwal, 2018).

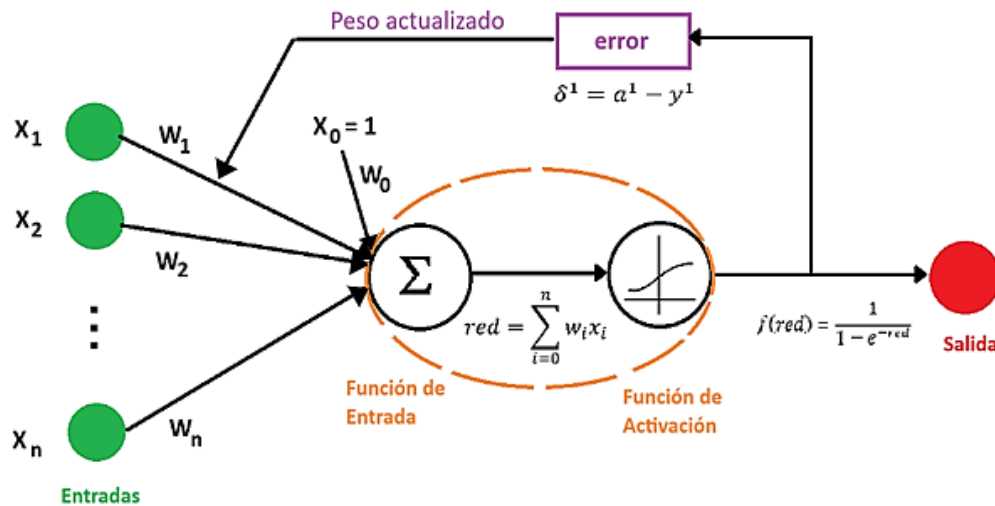


Figura II.7 Esquemmatización del algoritmo Backpropagation (modificado de Datawow, 2020)

Capítulo III - Análisis de Resultados.

3.1 Descripción de la base de datos

La base de datos se descargó del sitio de la Administración Federal de Carreteras (Federal Highway Administration, FHWA) que es parte del Departamento de Transporte de los Estados Unidos de América (United States Department of Transportation, US DOT). Esta dependencia compiló lo contenido en la Base de Datos de Pruebas de Carga de Cimentaciones Profundas (FHWA Deep Foundation Load Test Database, DFLTD v.2) publicada en febrero del 2017 (<https://highways.dot.gov/research/resources/software/deep-foundation-load-test-database-dfltd-version-20>) con el objetivo de servir como un repositorio centralizado que pudiera ser usado por universidades, estados, consultores y otras agencias para lograr la optimización del diseño, construcción y mantenimiento de las cimentaciones profundas (por ser las más recurridas en la infraestructura carretera -puentes-). Los datos incluidos en esta base proceden de distintas fuentes (artículos de congresos, de revistas y reportes de ingeniería) y fueron digitalizados de forma congruente para su descarga. La base cuenta con más de 900 proyectos y ≈ 1500 pruebas de carga ejecutadas en distintas ubicaciones a lo largo de todo Estados Unidos, Arabia Saudita, Brasil, Canadá, China, Japón y Reino Unido.

Previo registro, se utiliza una interfaz gráfica para la consulta, visualización y exportación de datos. En la **Figura III.1** se muestra la estructura general de búsqueda.

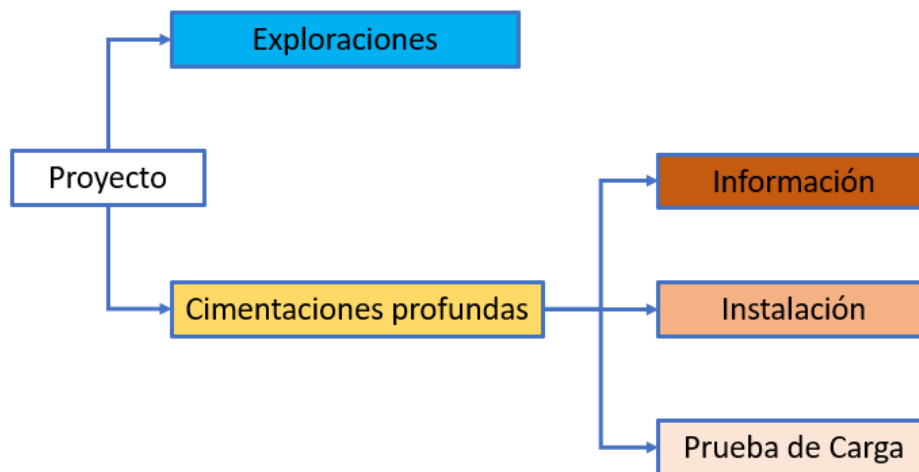


Figura III.1 Organización de la Base de Datos (modificado de FHWA, 2017)

En **Proyecto** se dicta la ubicación y la información general. En **Exploración** se describe la técnica utilizada para reconocimiento del suelo: Pozo a cielo abierto (PCA), Piezocono (CPT), Dilatómetro (DMT), Presurómetro (PMT), prueba de Veleta (VST). La base de datos utiliza una clasificación general para tipo de suelo: cohesivo, no cohesivo, geo - material intermedio, roca y variable. El tipo de suelo se clasifica como uniforme si al menos el 70% del suelo a lo largo del lado o la base del pilote está formado por un material entre los especificados.

La **Información** se refiere a las propiedades y dimensiones, por ejemplo: tubos de acero con punta abierta o cerrada, cilindros de concreto, perfiles I de acero, concreto pretensado, pilas, pilas de barreno (augercast piles), micropilotes, pilotes de madera, entre otros. En **Método de Instalación** se presenta una explicación básica de la colocación y en la sección **Prueba de Carga** se distingue entre Carga axial estática, Rápida (Statnamic) y Prueba de carga dinámica. Cualquiera de las secciones es susceptible como ítem de búsqueda. En **Material/Geometría** se define al material de la pila o pilote, sus propiedades, geometría y dimensiones de base. Por último, el **Medio Natural** describe al tipo de suelo que rodea a la pila o pilote.

El primer criterio para construir las matrices de entrenamiento y prueba es distinguir al material: Madera, Concreto y Acero, a partir de esta división se acomodan las muestras llenando los espacios: geometría (en concreto circular o rectangular, en acero su sección transversal tiene forma I o de círculo hueco -tubular), prueba de carga (compresión o extensión) y medio natural (suelos finos, suelos gruesos y roca) (**Figura III.2**).

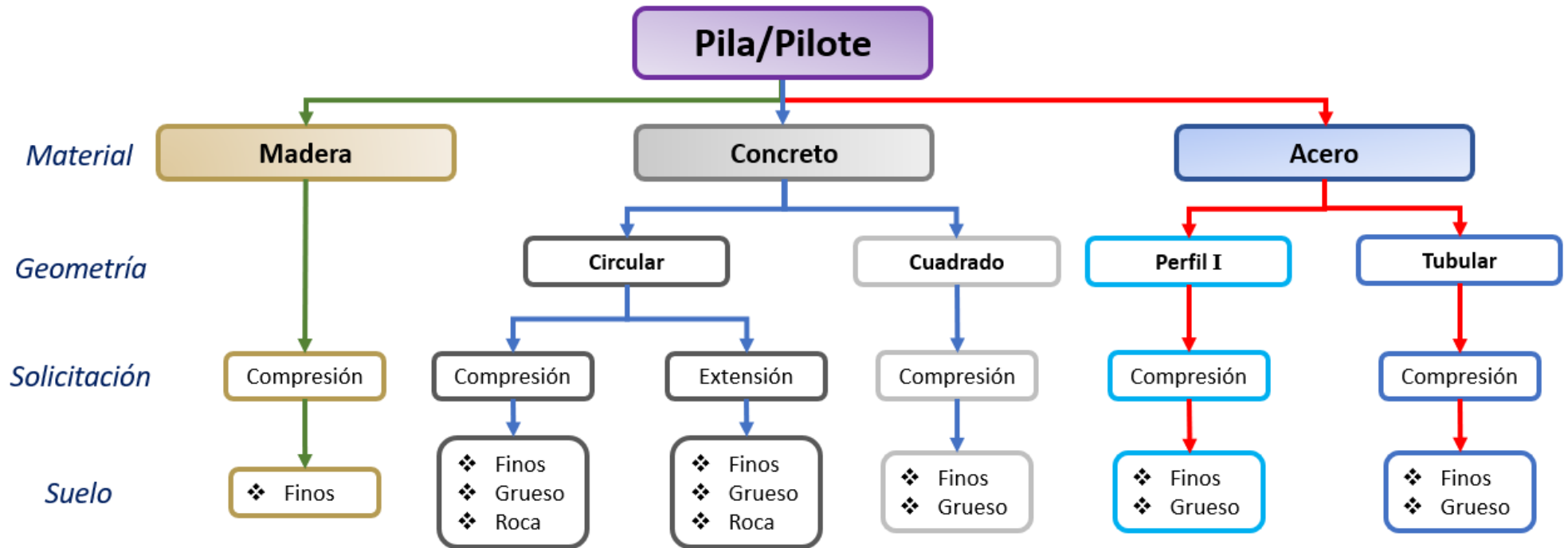


Figura III.2 Arreglo de las matrices de datos para su uso y estudio con redes neuronales

A continuación, se presenta la estadística básica de los datos compilados, esto para limpiar de líneas contaminadas, transformar la presentación de variables o, de ser necesario, cambiar la naturaleza de la medición.

3.1.1 Madera

De acuerdo con el esquema general, iniciando con Madera (**Figura III.3**) la información compilada contiene pruebas de compresión en suelos finos. En la **Tabla III.1** se muestra un resumen de los datos obtenidos.

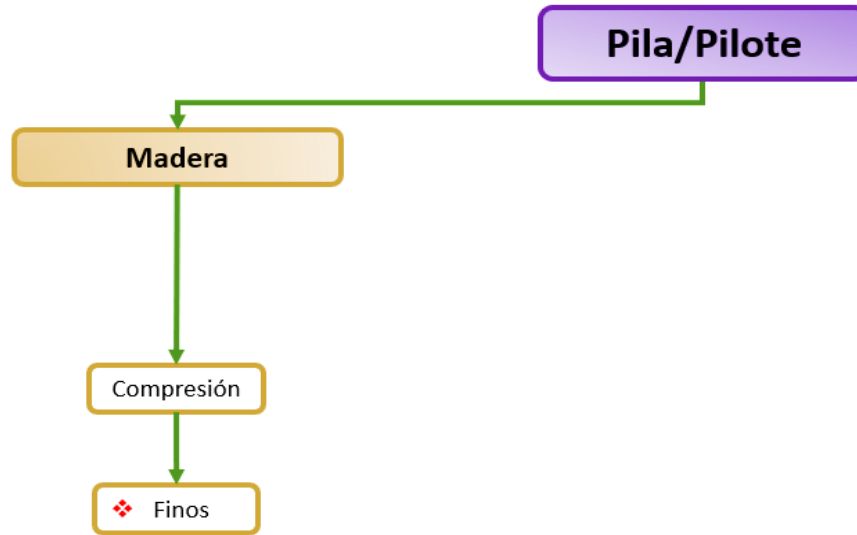


Figura III.3 Rama del árbol para pilas/pilotes de madera.

Tabla III.1 Resumen de información de la subbase para pilotes de madera

Material	Número de instancias	Geometría		Tipo de prueba	Tipo de suelo
		Sección	Longitud		
		D (cm)	L (m)		
Madera	55	22.5, 28.2	8.1, 9.7	Compresión	Fino
		25.4, 28.2	9.7, 11.4		
		28.2, 31.0	11.4, 13.0		
		31.0,33.8	13.0, 14.6		
		33.8, 36.7	14.6, 16.3		
		36.7, 39.5	17.9, 19.5		
		39.5, 42.3	19.5, 21.2		
		48.0, 50.8	21.2, 22.8		
			22.8, 24.4		

En la **Figura III.4** se presentan los histogramas para este primer conjunto de pilotes ensayados y en la **Tabla III.2** los estadísticos descriptivos de los datos del material Madera.

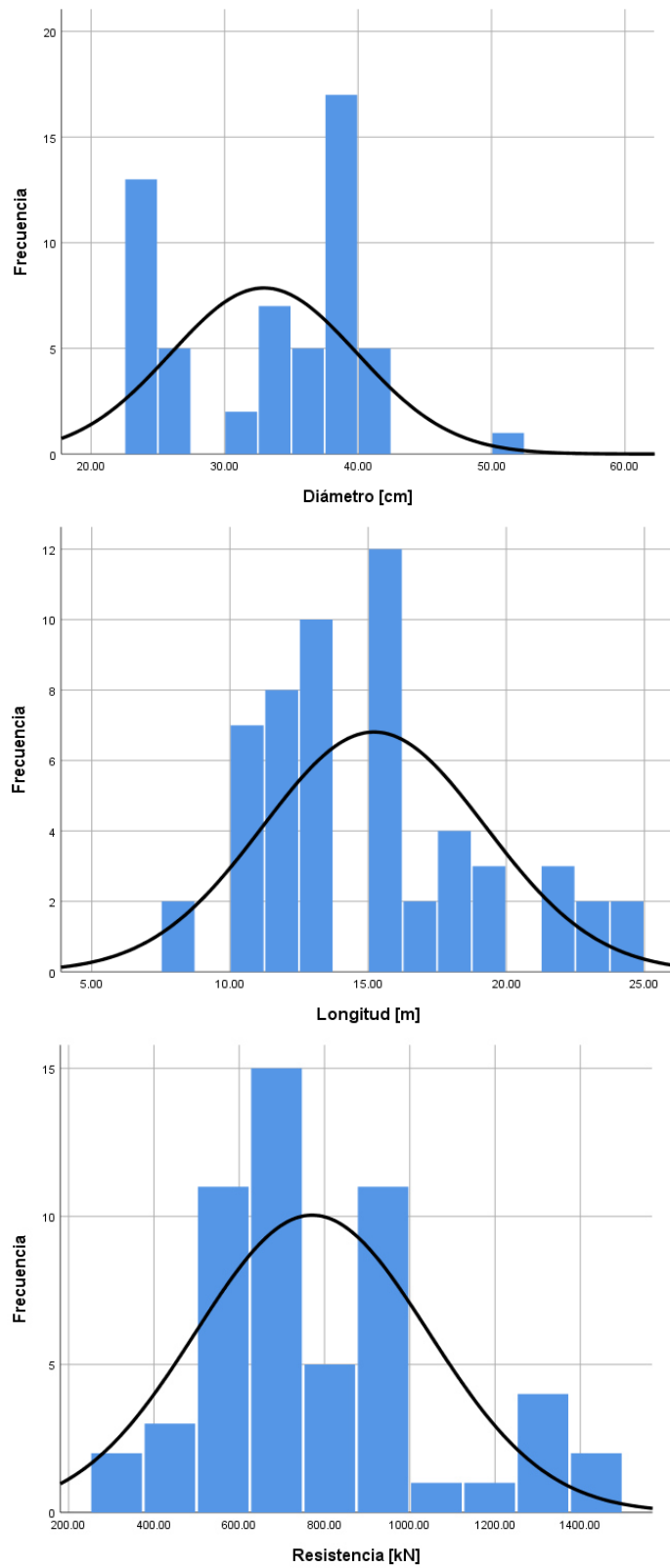


Figura III.4 Histogramas de las variables Diámetro, Longitud y Resistencia para pilotes de Madera.

Tabla III.2 Estadísticos descriptivos de los datos para pilotes de madera

Variable	Rango	V. Mín	V. Máx	Media	Desviación Estándar
Diámetro	28.26	22.54	50.8	32.94	6.98
Longitud	16.37	8.08	24.44	15.21	4.02
Resistencia	1161.65	306.26	1467.91	771.02	273.11

El histograma de la variable Diámetro, con barras de 2.5 cm de ancho, tiene en el intervalo 37.5 a 40 cm la frecuencia máxima con 17 instancias. La distribución de los datos es simétrica con cola positiva por la barra en el intervalo 50 a 52.5 cm. El histograma de la variable Longitud, con un ancho de barra de 1.25 m, tiene en el intervalo de 15 a 16.25 m la frecuencia máxima con 12 instancias y su distribución es simétrica. Finalmente, el histograma de la variable Carga Total, con un ancho de barra de 100 kN, tiene en el intervalo de 700 a 800 kN la frecuencia máxima con 15 instancias y su distribución es simétrica con cola positiva por los valores entre 1300 y hasta 1500 kN.

3.1.2 Concreto

a) Base de pila/pilote sección circular

En el caso del material Concreto con sección transversal Circular se tienen pruebas de carga de compresión y extensión; ambas en suelos finos, suelos gruesos y roca. En la **Figura III.5** se muestra la rama para este conjunto de datos.

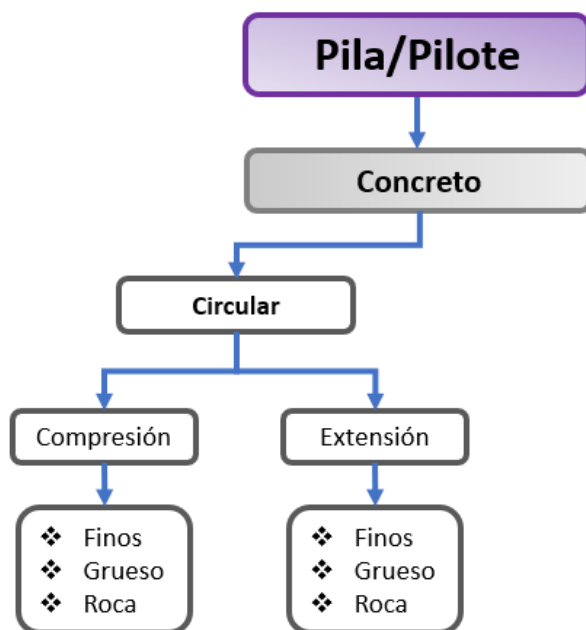


Figura III.5 Rama del árbol para pilas/pilotes de concreto con sección circular.

Para las pruebas de compresión en suelos finos se muestra el resumen de información en la **Tabla III.3**, el resumen de estadísticos descriptivos en la **Tabla III.4** y los histogramas de cada variable (Diámetro, Longitud, Módulo de Young y Resistencia) en la **Figuras III.6**. Se observa una distribución simétrica con cola positiva en los histogramas de las variables Diámetro, Módulo de Young y Resistencia en los intervalos de 190 a 200 cm, 47.5 a 50 GPa y 8000 a 10000 kN, respectivamente; particularmente en la variable Módulo de Young la mayoría de los datos se encuentran en el intervalo 27.5 a 30 GPa con 62 instancias ($\approx 50.5\%$). En el histograma de la variable Longitud muestra un sesgo positivo (derecha) que se debe a que casi el 62% de los datos (76 instancias) son valores menores a 10 m.

Tabla III.3 Resumen de información del primer subconjunto de pilas/pilotes de concreto de sección circular

Material	Número de instancias	Geometría		Propiedades	Tipo de prueba	Tipo de suelo
		Sección	Longitud	Módulo de Young		
		D (cm)	L (m)	E (GPa)		
Concreto	123	30, 40	2, 4	20, 22.5	Compresión	Fino
		40, 50	4, 6	22.5, 25		
		60, 70	6, 8	25, 27.5		
		70, 80	8, 10	27.5, 30		
		80, 90	10, 12	30, 32.5		
		90, 100	12, 14	32.5, 35		
		100, 110	14, 16	37.5, 40		
		120, 130	16, 18	47.5, 50		
		130, 140	18, 20			
		190, 200	20, 22			
			22, 24			
			24, 26			
			28, 30			
	30, 32					
	34, 36					

Tabla III.4 Estadísticos descriptivos de los datos para pilas/pilotes de concreto circulares en suelos finos.

Variable	Rango	V. Mín	V. Máx	Media	Desviación Estándar
Diámetro	162.56	30.48	193.04	73.75	24
Longitud	32.67	2.38	35.05	10.96	7.1
Módulo de Young	27.65	20.6	48.26	28.94	5.17
Resistencia	9728	57	9786	4110	2731

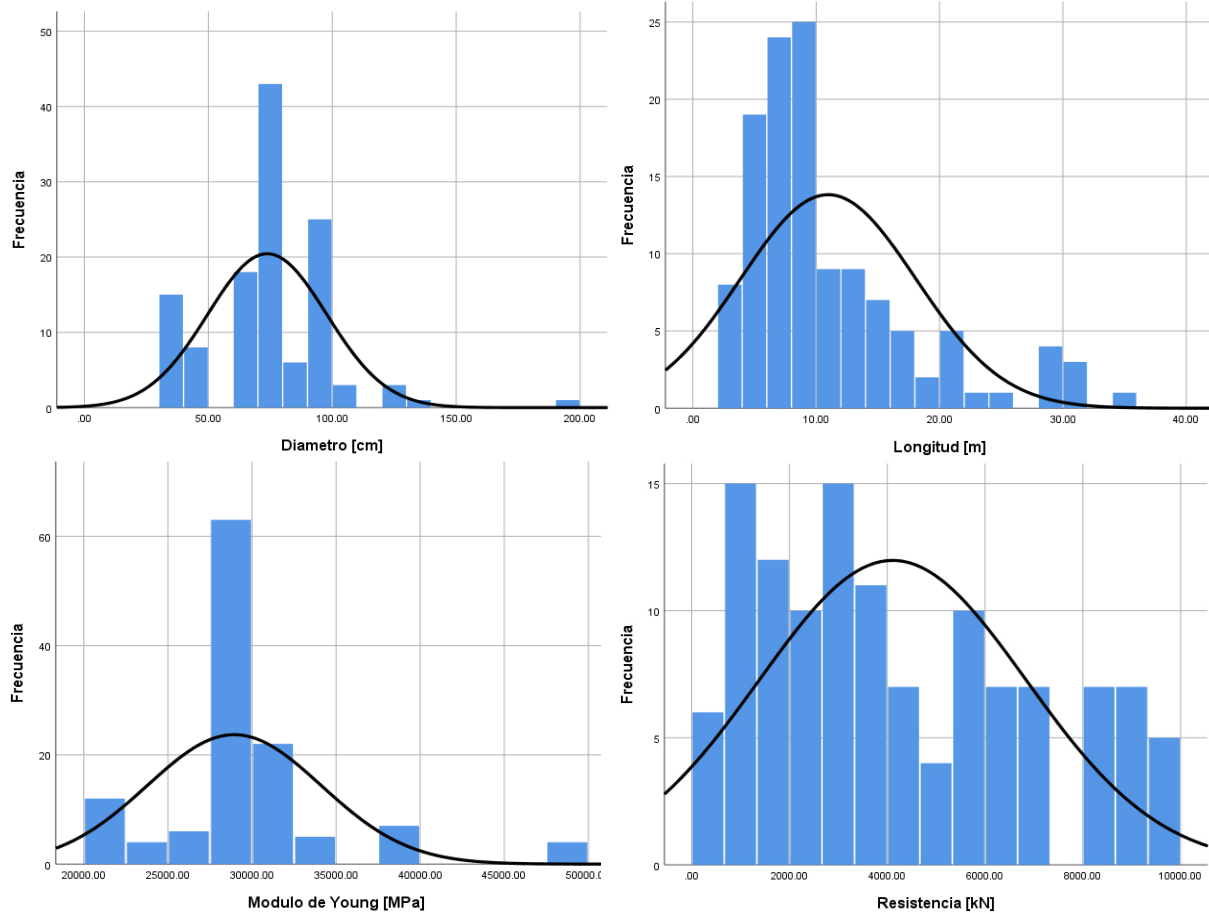


Figura III.6 Histograma de las variables Diámetro, Módulo de Young, Longitud y Resistencia, para material Concreto con geometría Circular en suelos finos

El siguiente subconjunto sobre el mismo material para pruebas de compresión en suelos gruesos (**Tabla III.5**). Se muestran los histogramas y estadísticos descriptivos en la **Figuras III.7 y Tabla III.6**.

Los histogramas de las variables Longitud y Resistencia muestran una distribución simétrica con cola positiva debido a los intervalos de 40 hasta 50 m y de 10000 hasta 12000 kN, respectivamente. El Módulo de Young presenta una distribución simétrica y la mayor frecuencia está en el intervalo 26.6 a 28.3 GPa con 19 instancias ($\approx 43\%$). La distribución del histograma de la variable Diámetro muestra un comportamiento simétrico con cola negativa (comportamiento opuesto al mostrado en los histogramas de las variables Longitud y Resistencia) debido al intervalo 10 a 20 cm.

Tabla III.5 Resumen de información del segundo subconjunto de pilas/pilotes de concreto de sección circular

Material	Número de instancias	Geometría		Propiedades	Tipo de prueba	Tipo de suelo
		Sección	Longitud	Módulo de Young		
		D (cm)	L (m)	E (GPa)		
Concreto	44	10, 20	5, 10	20, 21.6	Compresión	Grueso
		30, 40	10, 15	21.6, 23.3		
		40, 50	15, 20	23.3, 25		
		50, 60	20, 25	25, 26.6		
		60, 70	25, 30	26.6, 28.3		
		70, 80	30, 35	28.3, 30		
		80, 90	40, 45	30, 31.6		
		90, 100	45, 50	31.6, 33.3		
		100, 110		33.3, 35		
		110, 120		35, 36.6		
				36.6, 38.3		

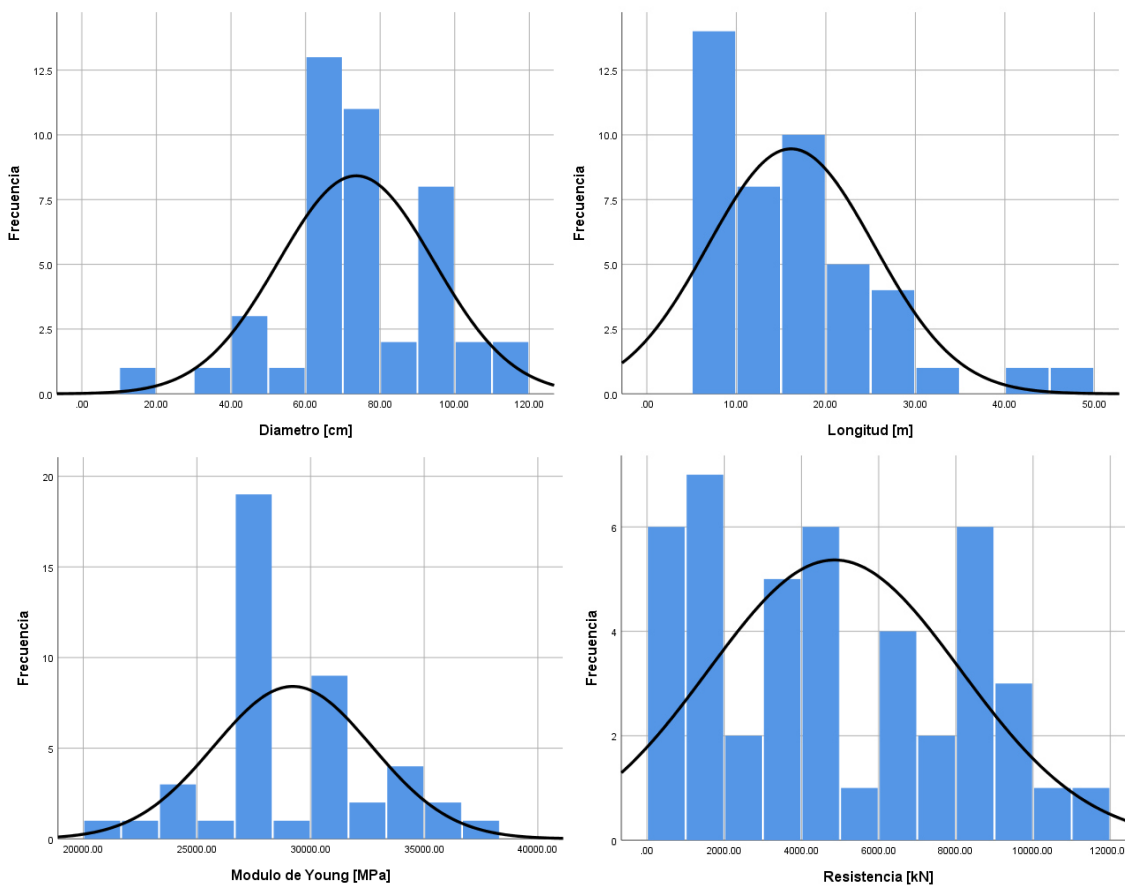


Figura III.7 Histograma de las variables Diámetro, Módulo de Young, Longitud y Resistencia, para material Concreto con geometría Circular en suelos gruesos.

Tabla III.6 Estadísticos descriptivos de los datos para pilas/pilotes circulares de concreto en suelos gruesos.

Variable	Rango	V. Mín	V. Máx	Media	Desviación Estándar
Diámetro	107.26	12.7	119.96	73.58	20.84
Longitud	41.15	5.49	46.63	16.11	9.27
Módulo de Young	17.12	20.79	37.92	29.21	3.48
Resistencia	10835	284	11120	4856	3271

Para las pruebas de compresión en roca el resumen de los datos se muestra en la **Tabla III.7** y los estadísticos descriptivos en la **Tabla III.8** e histogramas en la **Figura III.8**.

Tabla III.7 Resumen de información del tercer subconjunto para pilas/pilotes sección circular

Material	Número de instancias	Geometría		Propiedades	Tipo de prueba	Tipo de suelo
		Sección	Longitud	Módulo de Young		
		D (cm)	L (m)	E (GPa)		
Concreto	45	40, 50	0, 3.34	21, 22	Compresión	Roca
		50, 60	3.34, 6.67	22, 23		
		60, 70	6.67, 10	25, 26		
		70, 80	10, 13.34	26, 27		
		80, 90	13.34, 16.67	27, 28		
		90, 100	16.67, 20	28, 29		
		100, 110	20, 23.34	29, 30		
		140, 150	26.67, 30	30, 31		
		150, 160	33.34, 36.67	32, 33		
	36.67, 40	33, 34				

Tabla III.8 Estadísticos descriptivos de los datos para pilas/pilotes circulares de concreto en roca

Variable	Rango	V. Mín	V. Máx	Media	Desviación Estándar
Diámetro	106.68	45.72	152.4	82.31	27.43
Longitud	37.25	2.38	39.62	14.64	8.55
Módulo de Young	11.5	21.5	33.1	27.6	2.95
Resistencia	12054	400	12455	7187	3536

La distribución en los histogramas de las variables Diámetro y Longitud es simétrica con cola positiva debido a los intervalos 140 hasta 160 cm y 33.34 hasta 40 m, respectivamente. En el histograma de la variable Módulo de Young se observa una distribución simétrica con una máxima frecuencia (18 instancias) en el intervalo 27 a 28 GPa. Por otro lado, la distribución de la variable Resistencia muestra un comportamiento simétrico con cola negativa.

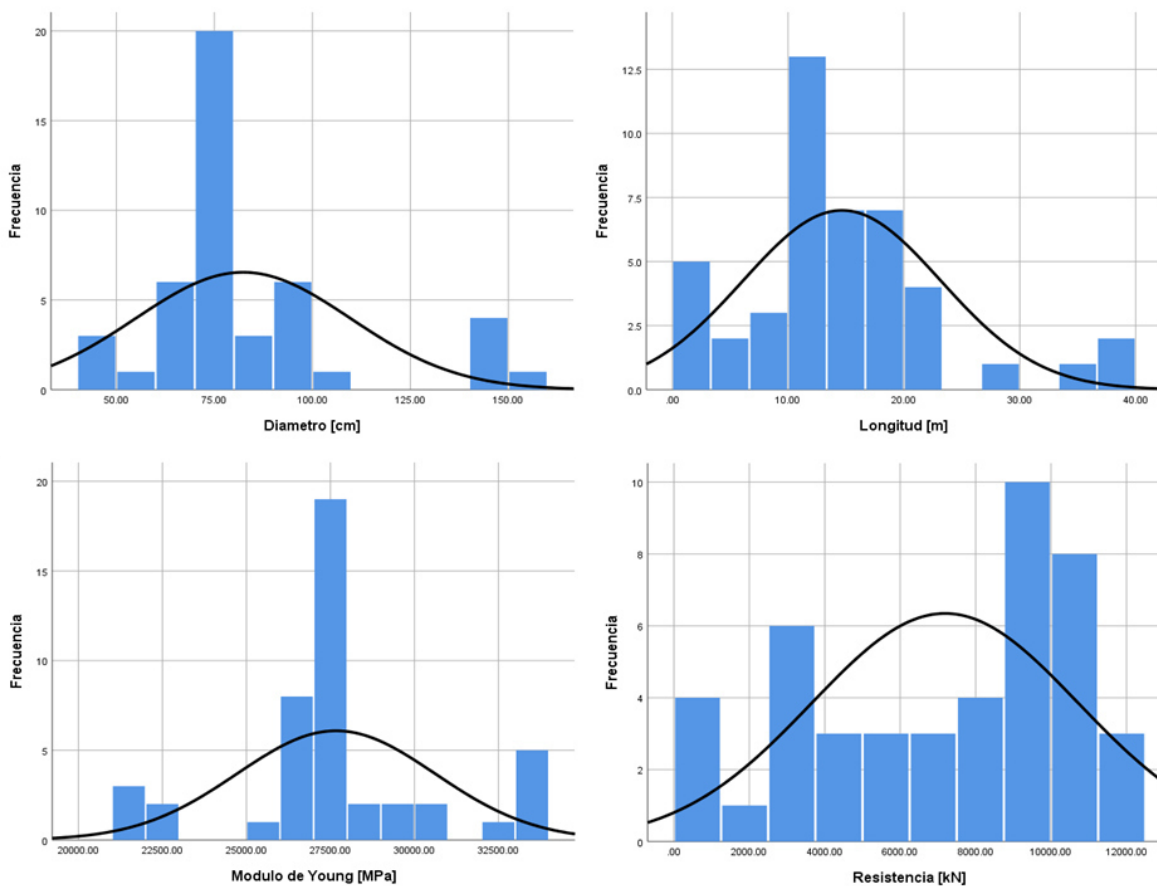


Figura III.8 Histogramas de las variables Diámetro, Módulo de Young, Longitud y Resistencia, para material Concreto con geometría Circular para medio rocoso.

b) Base de pila/pilote sección cuadrada

Para las pilas/pilotes de sección transversal Cuadrada (**Figura III.9**) se cuenta con datos de pruebas de carga a compresión en suelos finos y gruesos.

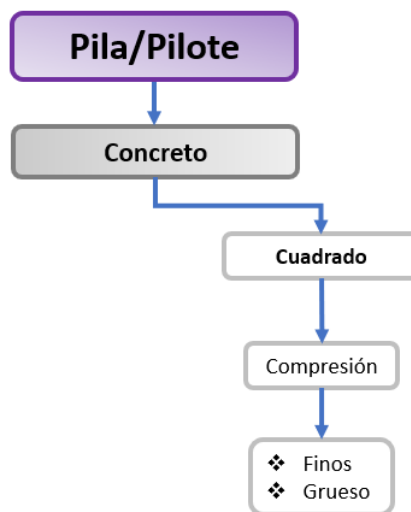


Figura III.9 Rama del árbol para pilas/pilotes de concreto con sección cuadrada.

Para el subconjunto suelos finos, el resumen de datos se presenta en la **Tabla III.9** y los histogramas de las variables (Ancho, Longitud, Módulo de Young, Peso Longitudinal y Resistencia) en las **Figuras III.10**.

Tabla III.9 Resumen de información del primer subconjunto de pilas/pilotes de sección cuadrada

Material	Número de instancias	Geometría		Propiedades		Tipo de prueba	Tipo de suelo
		Sección	Longitud	Módulo de Young	Peso longitudinal		
		A (cm)	L (m)	E (GPa)	(kg/m)		
Concreto	153	30, 33.3	5, 7.5	27.5, 28.12	200, 250	Compresión	Fino
		33.3, 36.6	7.5, 10	31.25, 31.87	300, 350		
		40, 43.3	10, 12.5	34.375, 35	350, 400		
		43.3, 46.6	12.5, 15	36.87, 37.5	500, 500		
		50, 53.3	15, 17.5	38.12, 38.75	600, 650		
		60, 63.3	17.5, 20		700, 750		
		70, 73.3	20, 22.5		850, 900		
		73.3, 76.6	22.5, 25		950, 1000		
			25, 27.5				
			27.5, 30				
			30, 32.5				
			32.5, 35				
			35, 37.5				
			40, 42.5				

Tabla III.10 Estadísticos descriptivos de los datos para pilas/pilotes de concreto de sección cuadrada para suelos finos

Variable	Rango	V. Mín.	V. Máx.	Media	Desviación Estándar
Ancho	45.7	30.5	76.2	42.7	9.76
Longitud	34.82	6.18	41	21.10	7.82
Módulo de Young	10.8	27.7	38.6	35.3	2.2
Peso longitudinal	745.65	223.14	968.79	425.24	160.29
Resistencia	2337.1	567.56	2864.65	1323.67	514.24

El histograma de la variable Módulo de Young se observa en el intervalo 34.375 a 35 GPa se encuentran la mayoría de las instancias con 108 ($\approx 71\%$). En el caso las variables Ancho, Peso Longitudinal y Resistencia los histogramas muestran un sesgo positivo. Por otro lado, el histograma de la variable Longitud tiene una distribución simétrica.

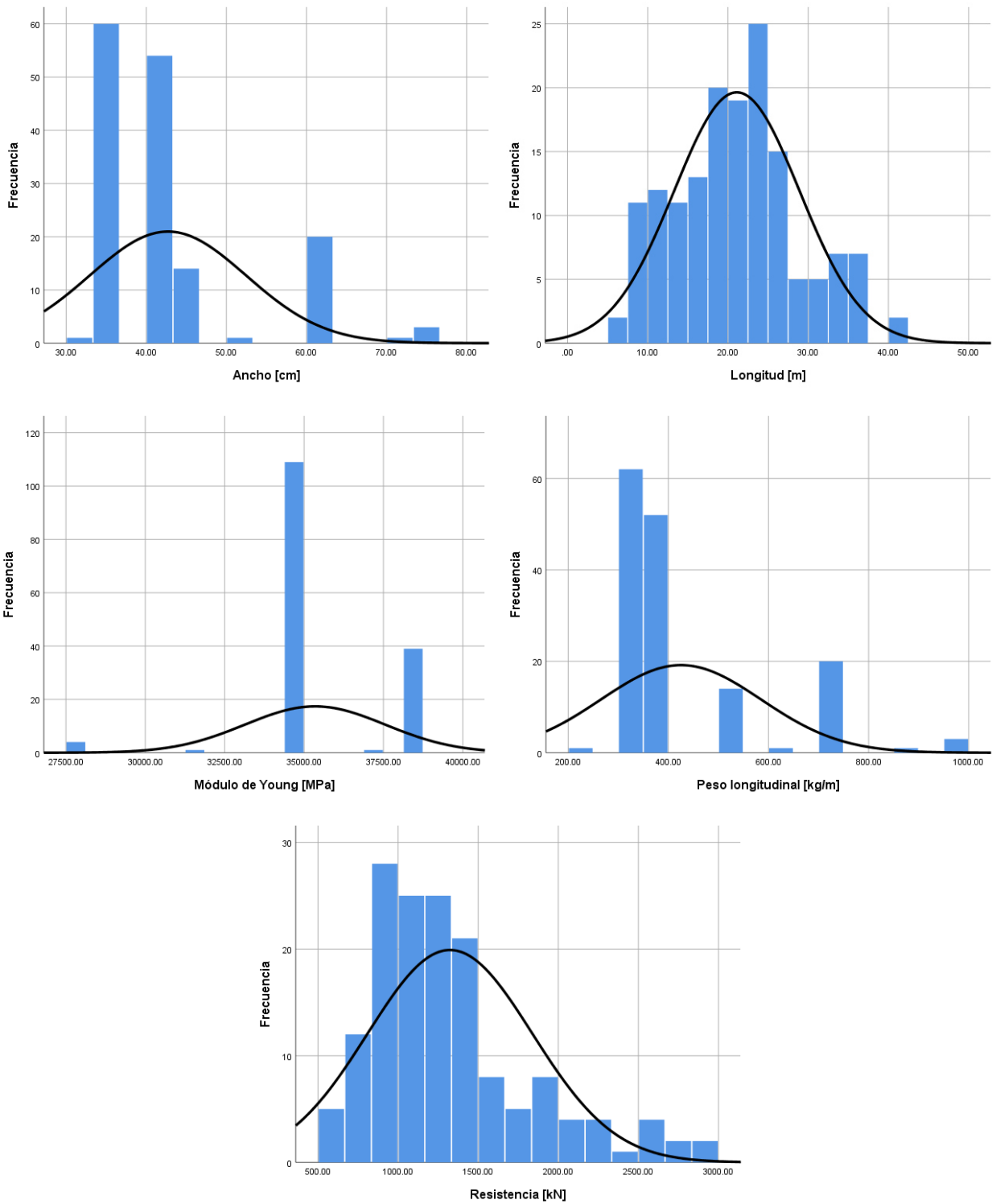


Figura III.10 Histogramas de las variables Ancho, Longitud, Módulo de Young, Peso Longitudinal y Resistencia para material Concreto geometría Cuadrada para suelos finos.

El siguiente subconjunto de este material es suelos gruesos, donde las **Tablas III.11** y **III.12** muestran el resumen de datos y los estadísticos descriptivos, respectivamente.

Tabla III.11 Resumen de información del segundo subconjunto de pilas/pilotes de sección cuadrada

Material	Número de instancias	Geometría		Propiedades		Tipo de prueba	Tipo de suelo
		Sección	Longitud	Módulo de Young	Peso longitudinal		
		A (cm)	L (m)	E (MPa)	(kg/m)		
Concreto	86	23.3, 26.6	2, 4	27.5, 28.33	133.33, 200	Compresión	Grueso
		30, 33.3	4, 6	30, 30.83	200, 266.66		
		33.3, 36.6	6, 8	32.5, 33.33	266.66, 333.33		
		40, 43.3	8, 10	34.16, 35	333.33, 400		
		43.3, 46.6	10, 12	36.66, 37.5	466.66, 533.33		
		50, 53.3	12, 14	38.33, 39.16	600, 666.66		
		60, 63.3	14, 16		666.66, 733.33		
		73.3, 76.6	16, 18		733.33, 800		
			18, 20		866.66, 933.33		
			20, 22		933.33, 1000		
			22, 24				
			24, 26				
			26, 28				
			30, 32				
			32, 34				
			34, 36				
	36, 38						

Tabla III.12 Estadísticos descriptivos de los datos para pilas/pilotes de concreto de sección cuadrada para suelos gruesos

Variable	Rango	V. Mín.	V. Máx.	Media	Desviación Estándar
Ancho	50.8	25.4	76.2	43.96	13.39
Longitud	32.66	3.66	36.31	16.74	7.94
Módulo de Young	10.8	27.7	38.6	33.27	4.52
Peso longitudinal	844.95	154.74	999.69	467.49	246.44
Resistencia	6938.34	266.89	7205.23	1842.47	1399.48

En la **Figura III.11** se presentan los histogramas para cada una de las variables de este subconjunto. Se observa en los histogramas de las variables Ancho, Peso Longitudinal y Resistencia sesgo positivo, mientras que los del Módulo de Young y Longitud presentan una distribución uniforme y simétrica.

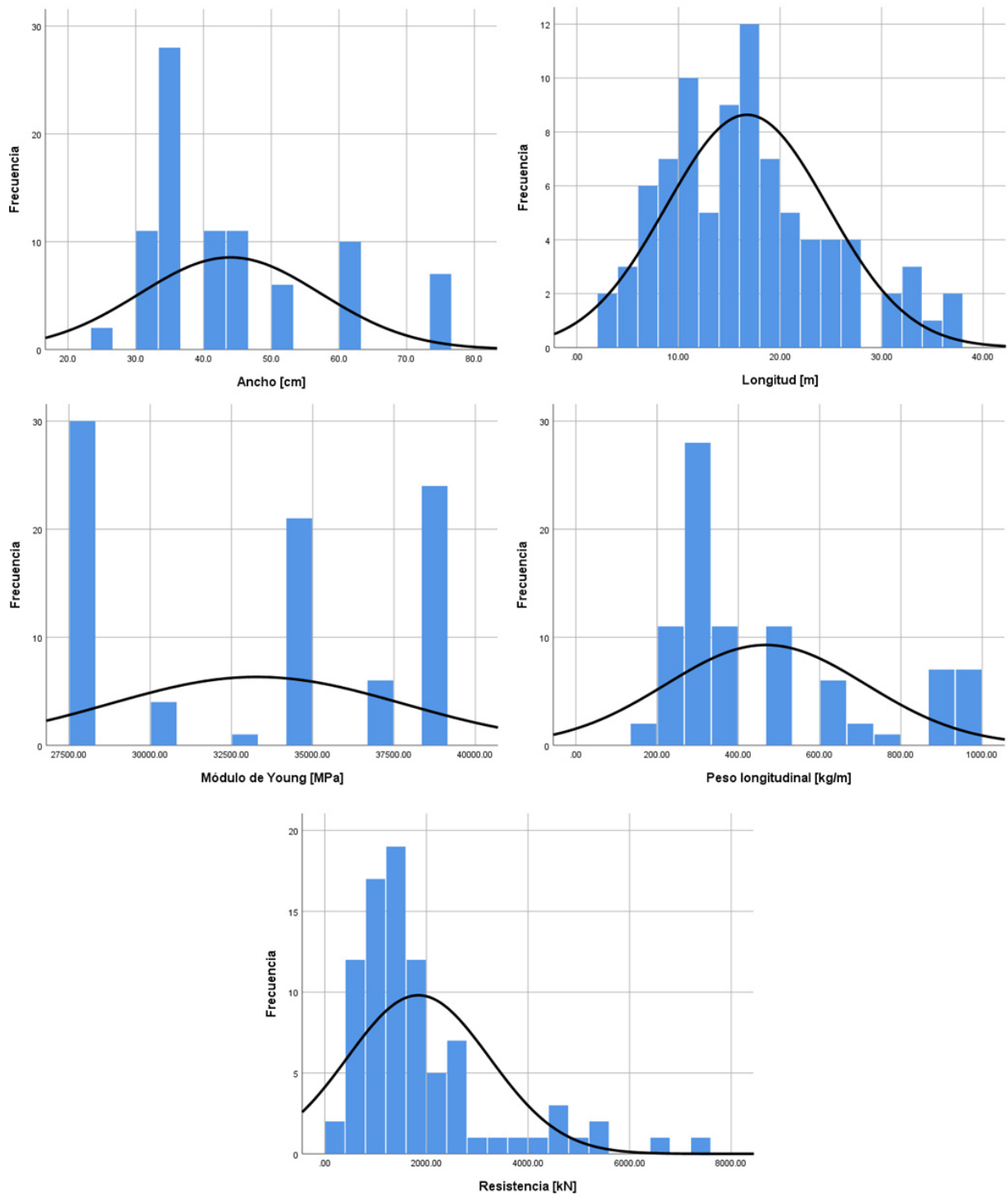


Figura III.11 Histograma de las variables Lado, Longitud, Módulo de Young, Peso Longitudinal y Resistencia para material Concreto geometría Cuadrada para suelos gruesos.

3.1.3 Acero

a) Base de pilote sección Perfil I

Para material Acero se usaron pruebas de compresión en suelos finos y gruesos (**Figura III.12**). En la **Tabla III.13** se presenta el resumen de los datos y en la **Tabla III.14** los estadísticos descriptivos de este conjunto.

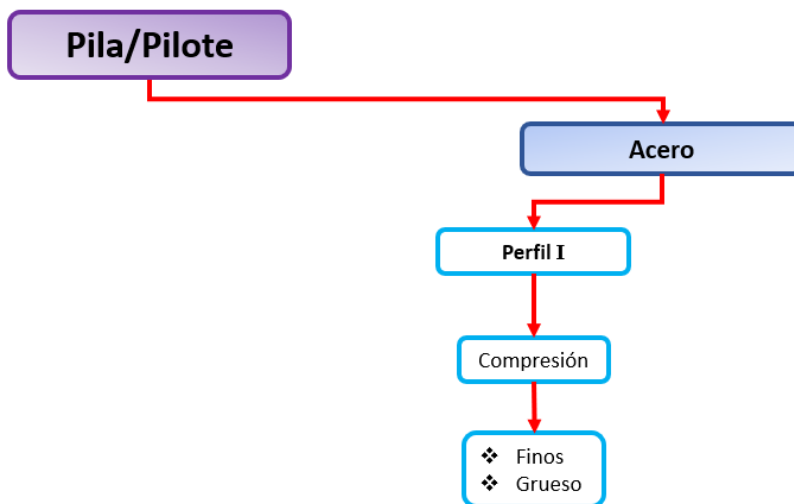


Figura III.12 Rama del árbol para pilas/pilotes de acero con sección I.

Tabla III.13 Resumen de información del primer subconjunto para pilotes de acero perfil I

M	# Inst	Geometría				Propiedades			TP	TS
		Sección				Longitud	PL	AR		
		d (mm)	b _f (mm)	t _f (mm)	t _w (mm)	L (m)	w (kg/m)	(m ² /m)		
A	59	240, 250	250, 260	10, 11	10, 11	6.66, 10	60, 70	1.46, 1.53	C	F
		250, 260	300, 310	11, 12	11, 12	10, 13.33	70, 80	1.73, 1.8		
		300, 310	370, 380	12, 13	12, 13	13.33, 16.66	80, 90	2.06, 2.13		
		340, 350		14, 15	14, 15	16.66, 20	100, 110	2.13, 2.2		
		350, 360		15, 16	15, 16	20, 23.33	130, 140	2.33, 2.4		
		360, 370		20, 21	20, 21	23.33, 26.66	170, 180			
						30, 33.33				
						33.33, 36.66				
					46.66, 50					

*M = Material; # Inst = Número de instancias; PL = Peso longitudinal; AR= Área de Revestimiento; TP = Tipo de Prueba; TS = Tipo de suelo; d = Peralte; b_f = ancho de patín; t_f = espesor de patín; t_w = espesor de alma.
 **A = Acero; C = Compresión; F = Fino.

Tabla III.14 Estadísticos descriptivos de los datos para pilotes de acero perfil I para suelos finos

Variable	Rango	V. Mín.	V. Máx.	Media	Desviación Estándar
Peralte	115	246	361	268.03	32.48
Patín ancho	121	257	378	275.76	36.43
Patín espesor	9.7	10.7	20.4	13.52	1.93
Alma espesor	9.9	10.5	20.4	13.49	1.98
Longitud	39.44	7.8	47.24	19.93	9.03
Área de revestimiento	0.87	1.47	2.34	1.59	0.22
Peso longitudinal	111	63	174	85.66	19.65
Resistencia	1805	471	2277	1042	393
Desplazamiento	77.54	-78.84	-1.29	-22.27	17.18

En las **Figuras III.13** se presentan los histogramas de las variables que conforman este subconjunto de datos. Para el Peralte, Patín Ancho y Área de revestimiento se aprecia sesgo hacia valores menores a 260 mm y 160 m²/m, respectivamente; cada variable con frecuencias máximas en los intervalos 250 a 260 mm para el Peralte y Patín Ancho (36 instancias), y el intervalo 1.46 a 1.53 m²/m (45 instancias) para Área de revestimiento. Para el caso las variables Patín espesor, Alma espesor y Peso longitudinal se observa una distribución simétrica con cola positiva. Por otro lado, las variables Longitud y Resistencia tienen distribución simétrica mientras que el Desplazamiento tiene una distribución con sesgo negativo.

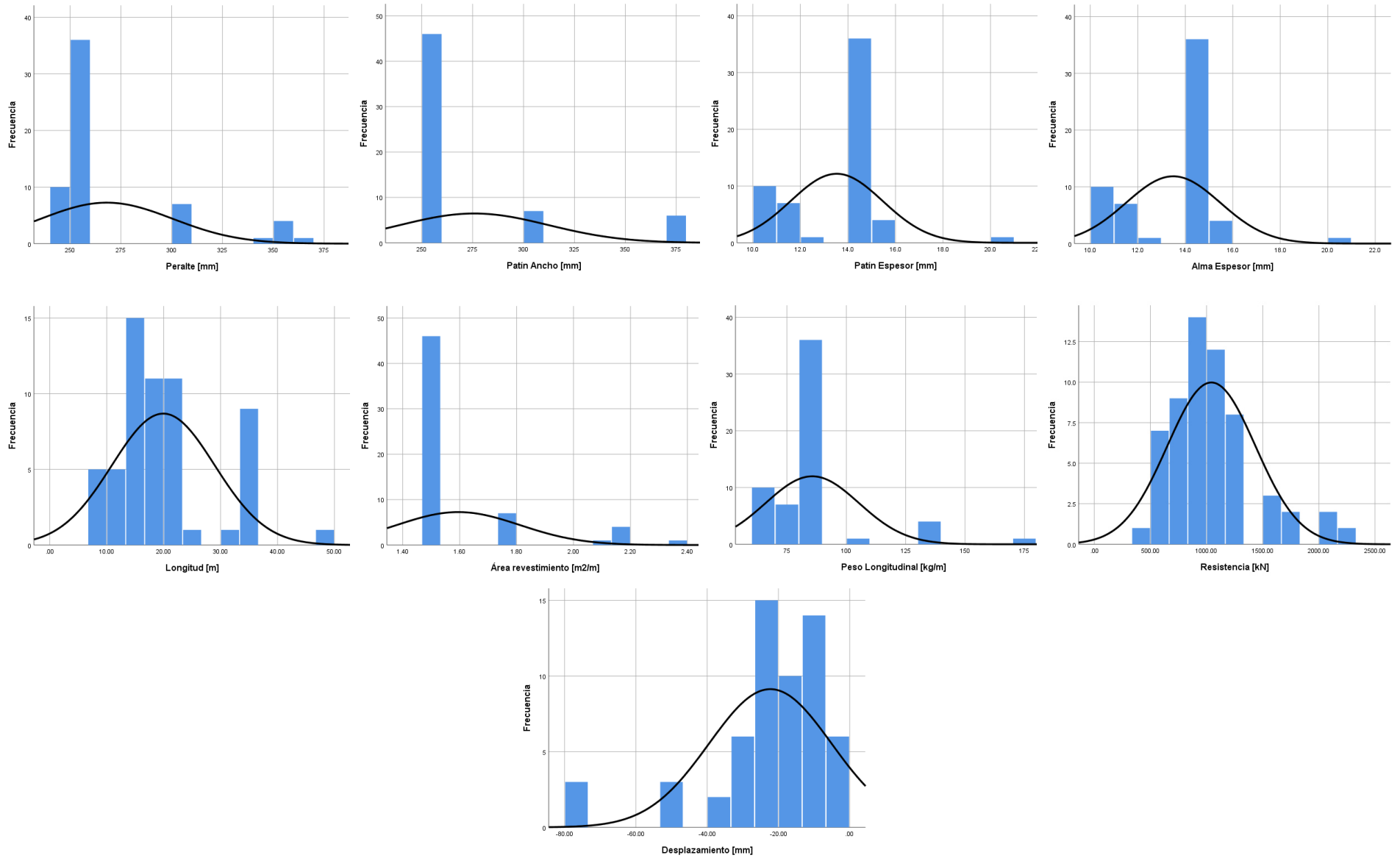


Figura III.13 Histogramas de las variables Peralte, Patín Ancho, Patín Espesor, Alma Espesor, Longitud, Área de revestimiento, Peso longitudinal, Resistencia y Desplazamiento para material Acero con sección I en suelos finos.

Para el siguiente subconjunto, el de suelos gruesos, en las **Tablas III.15** y **III.16** se encuentra el resumen de datos y estadísticos descriptivos y sus histogramas en las **Figuras III.14**. Para Peralte, Longitud, Área de revestimiento se consigue una distribución simétrica mientras que la Resistencia es simétrica con cola positiva y el Patín Ancho tiene una distribución uniforme. Patín espesor, Alma espesor y Peso longitudinal tienen distribución con sesgo positivo y el Desplazamiento sesgo negativo.

Tabla III.15 Resumen de información del segundo subconjunto para pilotes de acero perfil I

M	# Inst	Geometría				Propiedades		TP	TS	
		Sección			Longitud	PL	AR			
		d (mm)	b _f (mm)	t _f (mm)	t _w (mm)	L (m)	w (kg/m)			(m ² /m)
A	42	240, 250	240, 260	10, 11	10, 11	5, 10	60, 80	1.4, 1.5	C	G
		300, 320	300, 320	11, 12	11, 12	10, 15	80, 100	1.5, 1.6		
		340, 360	360, 380	12, 13	12, 13	15, 20	100, 120	1.7, 1.8		
		360, 380		14, 15	14, 15	20, 25	120, 140	2.1, 2.2		
				15, 16	15, 16	25, 30	160, 180	2.3, 2.4		
				20, 21	20, 21	30, 35				
						35, 40				
						40, 45				

*M = Material; # Inst = Número de instancias; PL = Peso longitudinal; AR = Área de Revestimiento; TP = Tipo de Prueba; TS = Tipo de suelo; d = Peralte; b_f = ancho de patín; t_f = espesor de patín; t_w = espesor de alma.

**A = Acero; C = Compresión; G = Grueso.

Tabla III.16 Estadísticos descriptivos de los datos para pilotes de acero perfil I para suelos gruesos

Variable	Rango	V. Mín.	V. Máx.	Media	Desviación Estándar
Peralte	115	246	361	314.76	32.48
Patín ancho	121	257	378	328.71	46.78
Patín espesor	9.7	10.7	20.4	13.51	3.37
Alma espesor	9.9	10.5	20.4	13.48	3.40
Longitud	32.68	7.97	40.65	20.22	9.06
Área de revestimiento	0.87	1.47	2.34	1.91	0.30
Peso longitudinal	111	63	174	104.43	37.185
Resistencia	6085	355	6441	1836	1278
Desplazamiento	71.39	-73.94	-2.55	-29.5	19.63

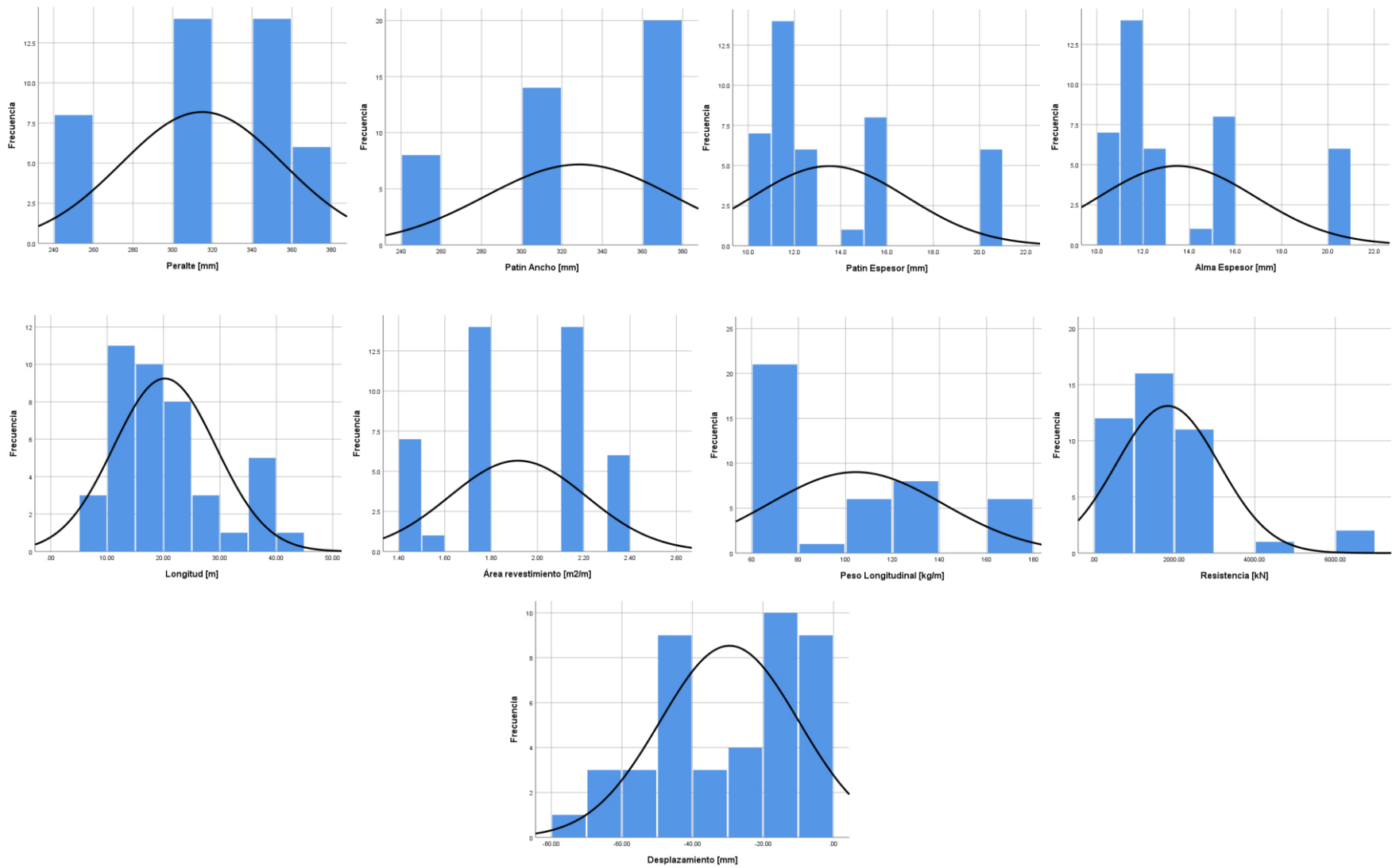


Figura III.14 Histogramas de las variables Peralte, Patín Ancho, Patín Espesor, Alma Espesor, Longitud, Área de revestimiento, Peso longitudinal y Resistencia para material Acero con sección I en suelos gruesos.

b) Base de pilote sección tubular

La sección tubular cuenta con pruebas de compresión en suelos finos y gruesos (Figura III.15).

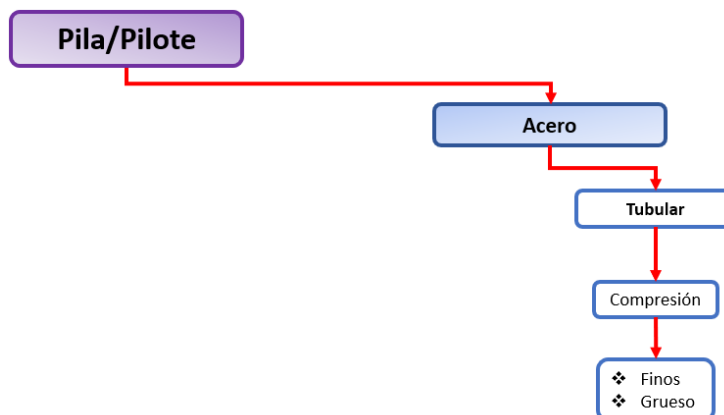


Figura III.15 Rama del árbol para pilas/pilotes de acero con sección circular.

El resumen de datos y estadísticos descriptivos se muestran en las Tablas III.17 y III.18, y los histogramas de las variables en las Figuras III.16. El Espesor de pared y Peso Longitudinal muestran una distribución uniforme; las variables Diámetro, Longitud y Resistencia tiene sesgo positivo y el Desplazamiento cola negativa.

Tabla III.17 Resumen de información del primer subconjunto para pilotes de acero sección circular

Material	Número de instancias	Geometría			Propiedades	Tipo de Prueba	Tipo de suelo
		Sección		Longitud	Peso longitudinal		
		D (cm)	e (cm)	L (cm)	(kg/m)		
Acero	35	26.6, 33.3	0.16, 0.33	0, 10	0, 33.3	Compresión	Fino
		40, 46.6	0.33, 0.5	10, 20	33.3, 66.6		
		60, 66.6	0.66, 0.83	20, 30	100, 133.3		
		86.6, 93.3	0.83, 1.0	30, 40	266.6, 300		
			1.16, 1.33	40, 50	300, 333.3		
			1.83, 2.0	60, 70			

Tabla III.18 Estadísticos descriptivos de los datos para pilotes de acero tubulares para suelos finos

Variable	Rango	V. Mín.	V. Máx.	Media	Desviación Estándar
Diámetro	64.1	27.3	91.4	43.72	17.92
Espesor de pared	1.63	0.28	1.91	1.02	0.66
Peso longitudinal	282.46	18.49	300.92	128.53	112.01
Longitud	56.54	5.64	62.18	26.42	16.48
Resistencia	15052	515	15568	2156	2964
Desplazamiento	75.08	-79.25	-4.17	-26.64	16.77

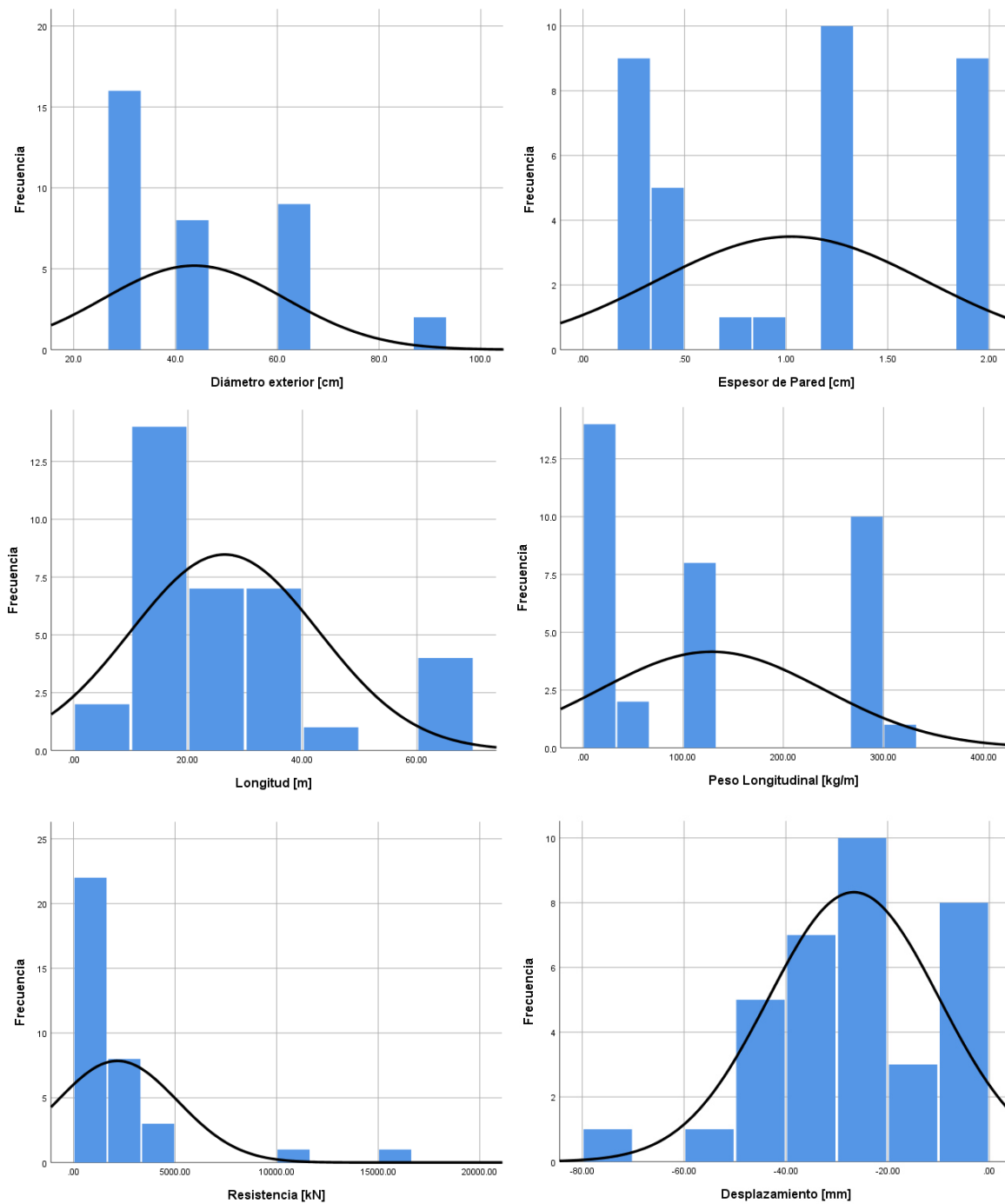


Figura III.16 Histogramas de las variables Diámetro exterior, Espesor de pared, Longitud y Peso longitudinal, Resistencia y Desplazamiento para material Acero con sección Tubular en suelos finos.

Para las pruebas en suelos gruesos, el resumen de datos (**Tabla III.19**) y los estadísticos descriptivos (**Tabla III.20**) se muestran a continuación.

Tabla III.19 Resumen de información del segundo subconjunto para pilotes de acero sección circular

Material	Número de instancias	Geometría			Propiedades	Tipo de Prueba	Tipo de suelo
		Sección		Longitud	Peso longitudinal		
		D (cm)	e (cm)	L (cm)	(kg/m)		
Acero	35	20, 40	0.16, 0.33	5, 10	0, 66.6	Compresión	Grueso
		40, 60	0.5, 0.66	10, 15	66.6, 133.3		
		60, 80	0.66, 0.83	15, 20	133.3, 200		
		120, 140	0.83, 1.0	20, 25	266.6, 333.3		
		140, 160	1.16, 1.33	25, 30	533.33, 600		
			1.83, 2.0	30, 35	666.6, 733.3		
				35, 40			
				40, 45			
				45, 50			
				50, 55			

Tabla III.20 Estadísticos descriptivos de los datos para pilotes de acero tubulares para suelos gruesos

Variable	Rango	V. Mín.	V. Máx.	Media	Desviación Estándar
Diámetro	125.1	27.3	152.4	45.82	31.84
Espesor de pared	1.63	0.28	1.91	0.96	0.54
Peso longitudinal	688.67	18.46	707.13	135.03	176.67
Longitud	45.89	7.45	53.34	25.37	12.67
Resistencia	8854	486	9341	2678	2185
Desplazamiento	65.18	-70.76	-5.59	-32.94	18.58

Los histogramas para las variables de este subconjunto se presentan en las **Figuras III.17**. El Espesor tiene distribución uniforme, Longitud y Desplazamiento tienen una distribución normal. Los histogramas para las variables Diámetro, Peso longitudinal y Resistencia presentan un sesgo positivo.

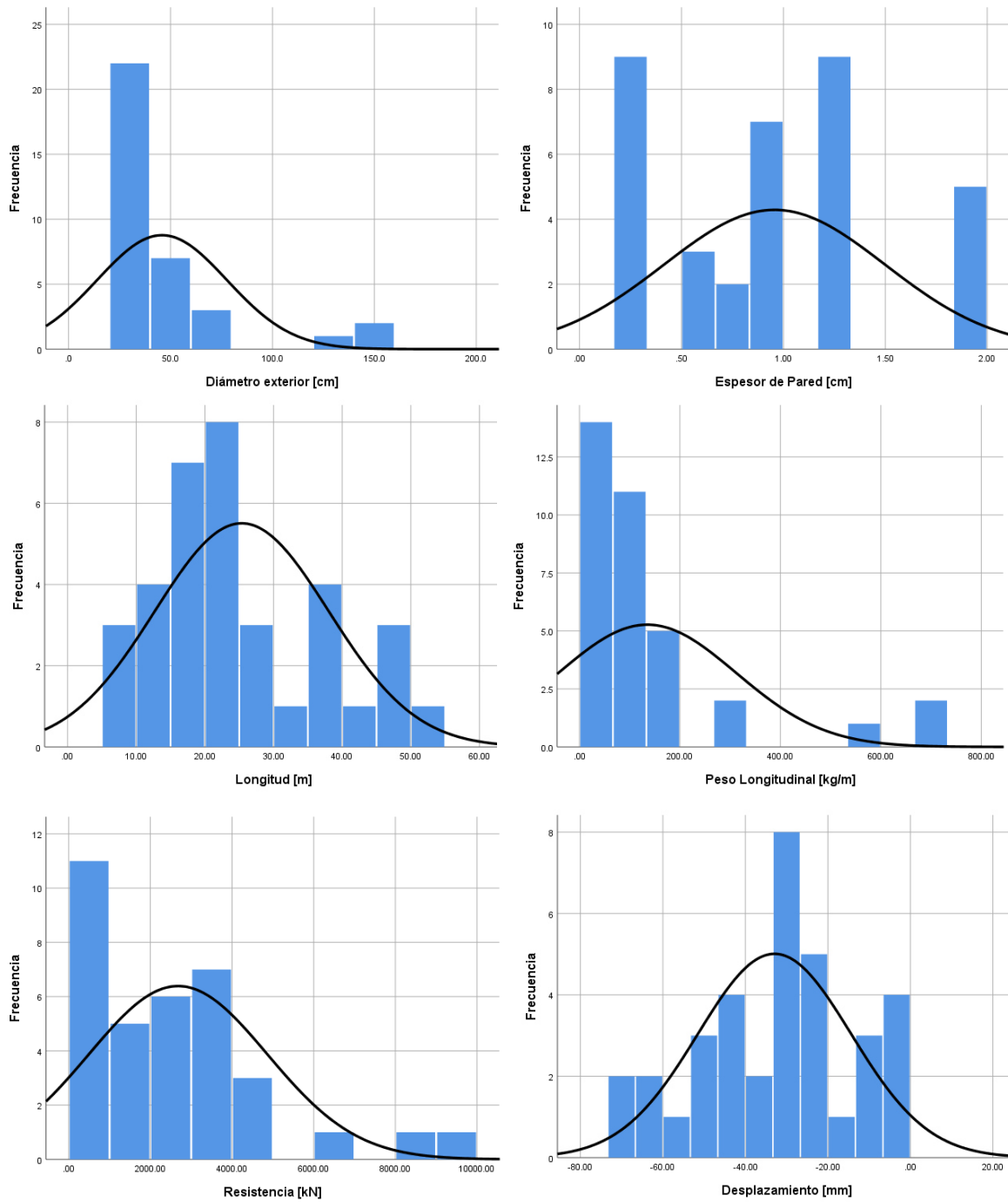


Figura III.17 Histogramas de las variables Diámetro exterior, Espesor de pared, Longitud, Peso longitudinal, Resistencia y Desplazamiento, para material Acero con sección Tubular en suelos gruesos.

3.2 RN para la estimación de la Resistencia Máxima ($Q_{\text{máx}}$)

A continuación, se presentan los modelos neuronales para estimar la resistencia máxima de pilas y pilotes. Se detallan las etapas de construcción (**Figura III.2**) y la calificación de los modelos. Es importante mencionar que los arreglos/topologías pueden variar según la experiencia en cimentaciones y el conocimiento computacional del ingeniero que modela. Las RN usadas en esta investigación son como a continuación se describen:

a) Arquitectura

Feedforward: las conexiones de la red fluyen unidimensionalmente desde la capa de entrada hasta la capa de salida.

b) Capa de entrada

Contiene a los predictores.

c) Capa oculta

El número de capas ocultas depende de la complejidad del problema que se presenta a la red.

- Función de activación: Producto punto (Dot product).
- Función de transferencia: a elegir entre Tangente hiperbólica o Sigmoide.

d) Capa de salida

La capa de salida transfiere información de la red hacia el exterior.

- Función de activación: Producto punto.
- Función de transferencia: a elegir entre Identidad, Tangente hiperbólica, o Sigmoide.

e) Regla de aprendizaje

Backpropagation: el algoritmo de optimización utilizado para estimar las ponderaciones sinápticas es el gradiente conjugado.

f) Función de error

Sumas cuadráticas (RSS) (ecuación 3.1): suma de los cuadrados de residuos (desviaciones predichas a partir de valores empíricos reales de datos) que mide la distancia entre el vector de salida deseado y el actual para que el algoritmo de aprendizaje ajuste los pesos y disminuya esta distancia (o error):

$$RSS = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 \quad (3.1)$$

Donde:

y_i es el i -ésimo valor de la variable a predecir

x_i es el i -ésimo valor de la variable explicativa

$f(x_i)$ es el valor pronosticado de y_i

La división de los subconjuntos de entrenamiento y de prueba es 80-20% del total de la muestra extraída del repositorio. Para nombrar a las distintas RN probadas se sigue la propuesta de comenzar por 1) material, 2) sección, 3) prueba de carga aplicada, y 4) suelo (Figura III.18).

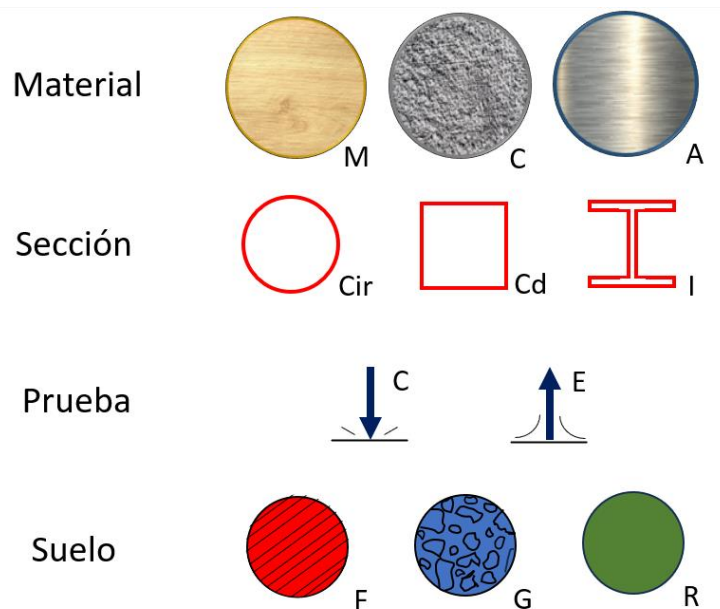


Figura III.18 Simbología de las RN (M=Madera, C=Concreto, A=Acero; Cir=Circular, Cd=Cuadrada, I=Sección I; C=Compresión, E=Extensión; F=Fino, G=Grueso, R=Roca)

Por ejemplo, una pila ensayada de concreto con sección circular, bajo compresión, construida en suelos finos la abreviatura sería **CCirCF**.

3.2.1 Madera

a) MCirCF (Elementos de Madera con sección Circular a Compresión en suelos Finos)

Para este primer conjunto, los modelos de la RN MCirCF consisten en dos nodos en la capa de entrada (D y L), seguido de la capa oculta donde la cantidad de nodos y capas ocultas varía de acuerdo con la complejidad del problema. Se finaliza con un nodo en la capa de salida, que corresponde a $Q_{\text{máx}}$. En la **Figura III.19** se muestra el esquema de la topología propuesta.

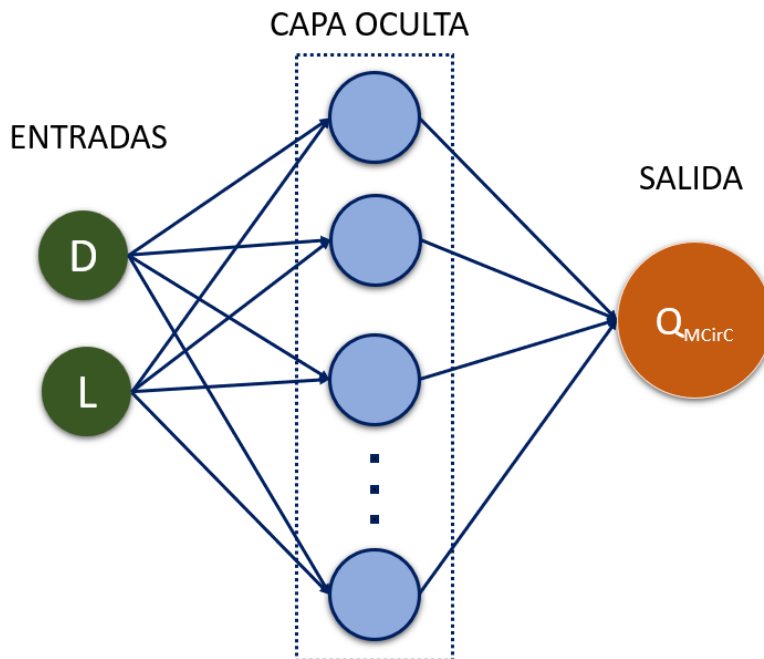


Figura III.19 Topología de RN en MCirCF (D = Diámetro, L = Longitud y Q_{MCirC} = Resistencia máxima)

Como datos entrada se cuenta con 44 instancias de entrenamiento (80%) y 11 instancias de prueba (20%). En la **Tabla III.21** se muestra la arquitectura de los cuatro mejores modelos probados, donde se fue intercambiando tanto las funciones de transferencia, así como la cantidad de nodos y capas. En la **Figura III.20** se muestran los coeficientes de correlación de las muestras con sus respectivos subconjuntos de entrenamiento (azul) y prueba (naranja), considerando que mientras más se acerquen al valor 1.0 mejor aprendizaje y predicción se tiene con esa RN.

Tabla III.21 Resumen de modelos probados para MCirCF

MODELO	CAPAS	FUNCIÓN TRANSFERENCIA	NODOS	FUNCIÓN SALIDA
1	1	Sigmoide	60	Identidad
2	1	Sigmoide	70	Identidad
3	1	Sigmoide	90	Identidad
4	2	Sigmoide	100	Identidad

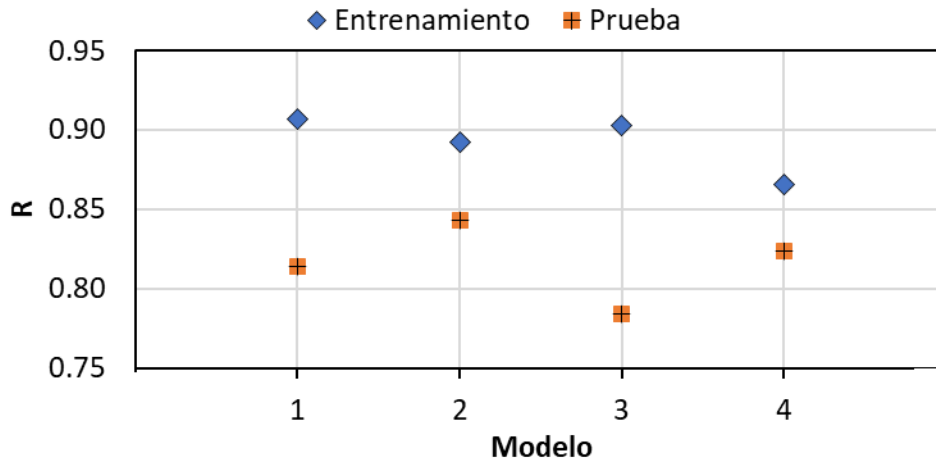


Figura III.20 Coeficiente de correlación de las RN MCirCF

En la **Figura III.21** se presenta el comparativo de los valores de la resistencia medida (ordenadas) contra los valores de la resistencia pronosticada por la red (abscisas). La gráfica está compuesta por una línea roja punteada con pendiente igual a 1 que representa la estimación ideal del modelo neuronal, junto a otras dos líneas negras punteadas que representan la desviación estándar; mientras menor dispersión tenga el modelo en torno a la línea de 45°, mejor será el desempeño. Del lado derecho se encuentra el gráfico residual por pronosticado del modelo, donde en el eje de las abscisas se encuentra el residuo (valor medido de la resistencia menos el valor pronosticado) y en el eje de las ordenadas el valor de resistencia pronosticada. Estos gráficos corresponden al mejor modelo obtenido que fue el Modelo 2. Existen 4 casos en los que las estimaciones neuronales están bastante lejos del valor medido y son llamativos, sin embargo, la revisión por caso permite considerarlos ejemplos contaminados (incongruencias geométricas).

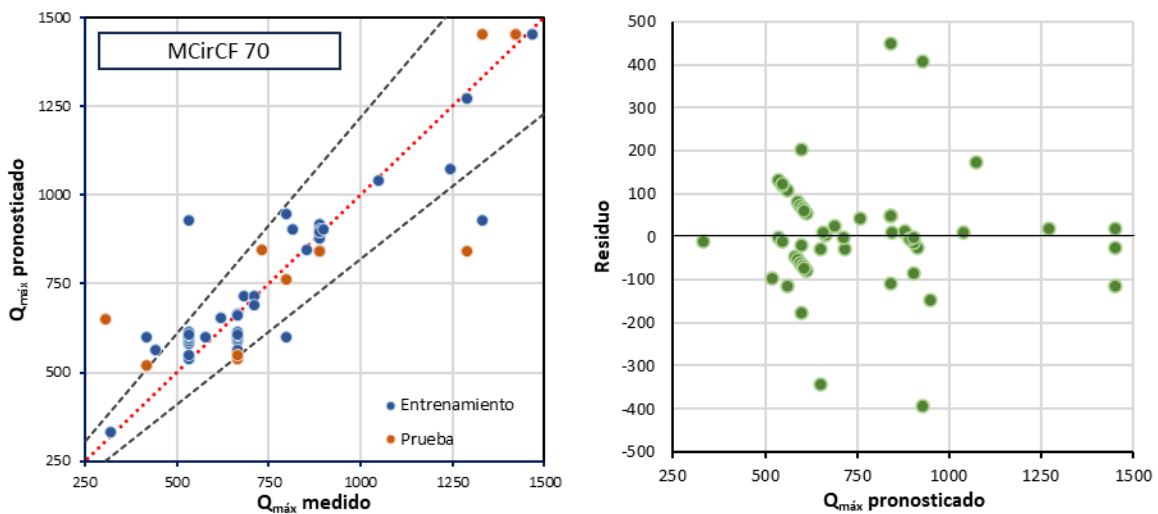


Figura III.21 Gráfica $Q_{\text{máx}}$ medido vs. $Q_{\text{máx}}$ pronosticado (izquierda) y gráfica de Residuo vs. $Q_{\text{máx}}$ pronosticado (derecha) del Modelo 2 – MCirCF

3.2.2 Concreto

a) CCirCF (Elementos de Concreto con sección Circular a Compresión en suelos Finos)

Pasando al material Concreto en pilas/pilotes con sección circular, para las RN se consideraron 3 nodos en la capa de entrada (D, E y L) y un nodo de salida ($Q_{m\acute{a}x}$), como se muestra en la **Figura III.22**.

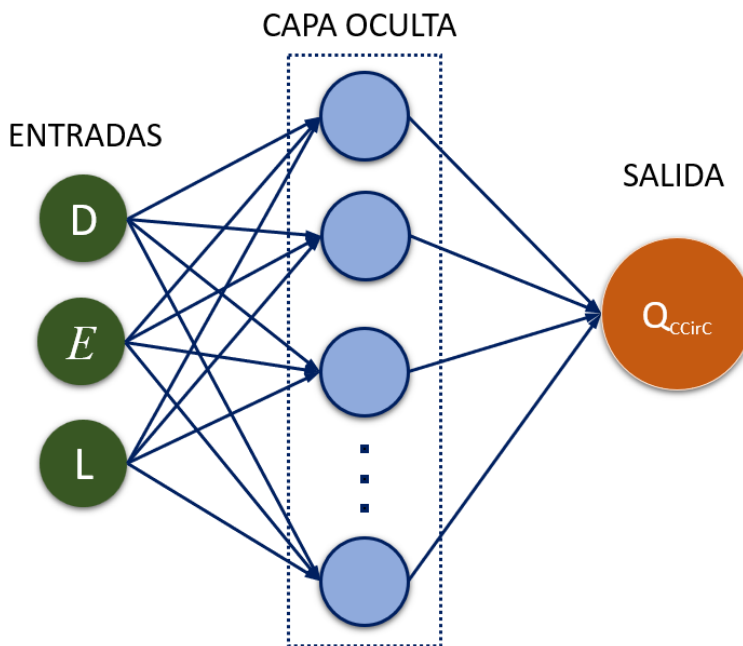


Figura III.22 Topología de RN en Concreto sección circular (D=Diámetro, E=Módulo de Young, L=Longitud y Q_{CCirC} =Resistencia Máxima)

Comenzando con pruebas de compresión de pilas/pilotes en suelos finos, al asignar distintas arquitecturas a los modelos modificando las funciones, cantidad de nodos y capas en la capa oculta, se llegó a los siguientes cuatro modelos registrados en **Tabla III.22** y en la **Figura III.23** se muestran sus coeficientes de correlación.

Tabla III.22 Resumen de modelos probados para CCirCF

MODELO	CAPAS	FUNCIÓN TRANSFERENCIA	NODOS	FUNCIÓN SALIDA
1	1	Sigmoide	20	Sigmoide
2	1	Sigmoide	50	Sigmoide
3	1	Sigmoide	60	Sigmoide
4	1	Sigmoide	70	Sigmoide

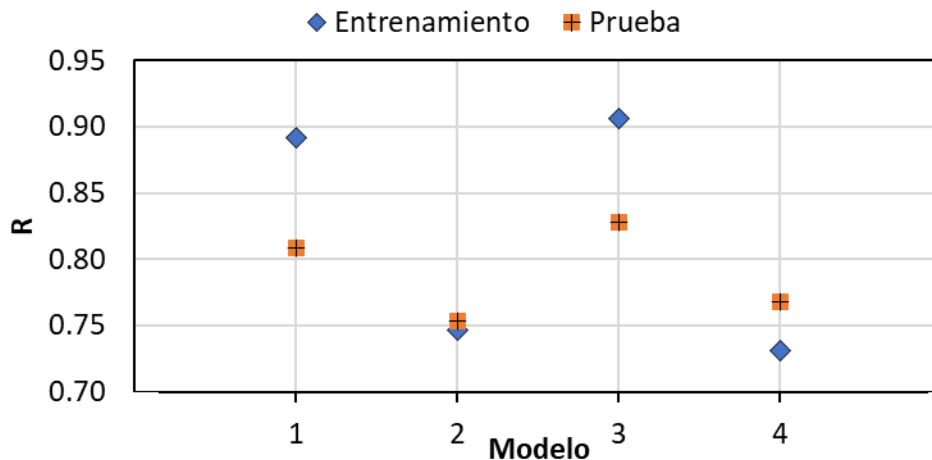


Figura III.23 Coeficiente de Correlación de las RN CCirCF

De los cuatro modelos propuestos, el mejor se presenta en la **Figura III.24** (Modelo 3) donde se observa en el gráfico izquierdo la relación entre la resistencia medida con la pronosticada y del lado derecho el gráfico residual. Los resultados muestran una *buena* aproximación en entrenamiento y prueba.

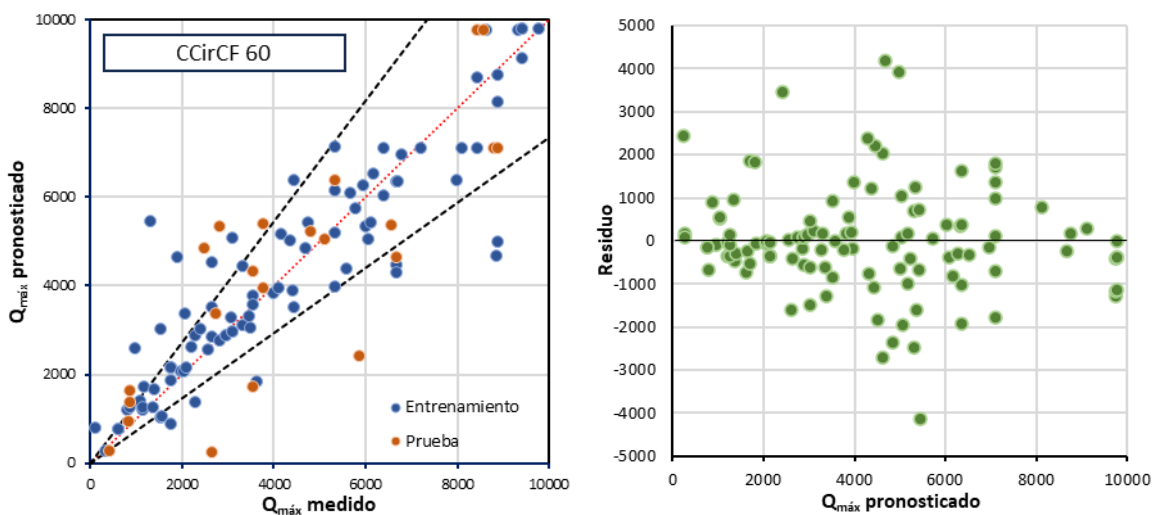


Figura III.24 Gráfica Q_{\max} medido vs. Q_{\max} pronosticado (izquierda) y gráfica de Residuo vs. Q_{\max} pronosticado (derecha) del Modelo 3 – CCirCF

b) CCirCG

Para las pilas/pilotes sección circular en suelos gruesos, se muestra la arquitectura de los cuatro mejores modelos propuestos en la **Tabla III.23** y su correspondiente coeficiente de correlación en la **Figura III.25**.

Tabla III.23 Resumen de modelos probados para CCirCG

MODELO	CAPAS	FUNCIÓN TRANSFERENCIA	NODOS	FUNCIÓN SALIDA
1	1	Sigmoide	10	Identidad
2	1	Sigmoide	50	Sigmoide
3	1	Sigmoide	100	Sigmoide
4	2	Sigmoide	100	Identidad

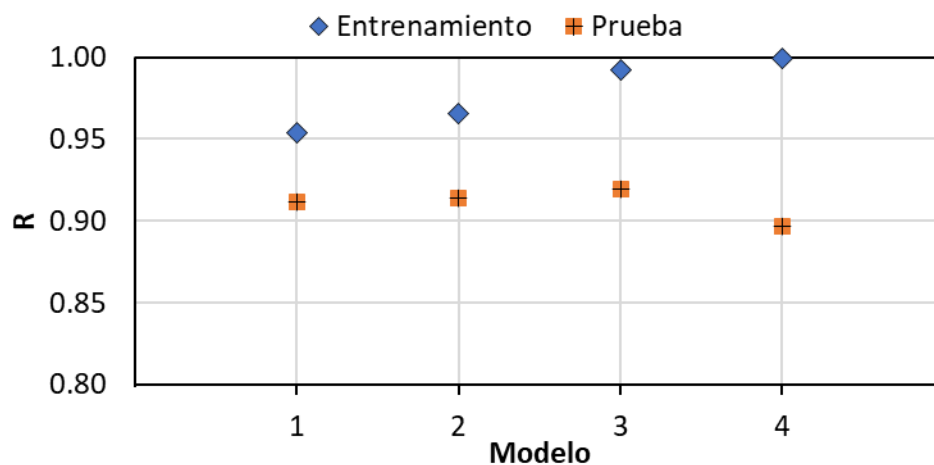


Figura III.25 Coeficiente de Correlación de las RN CCirCG

Al comparar los coeficientes de correlación, el modelo que tiene R muy cercanos a 1.0 en entrenamiento y prueba es el Modelo 3. El desempeño de la red se muestra en la **Figura III.26** en la gráfica (lado izquierdo) comparativa de $Q_{m\acute{a}x}$ medido contra $Q_{m\acute{a}x}$ pronosticado, se encuentran valores cercanos a la línea de 45°.

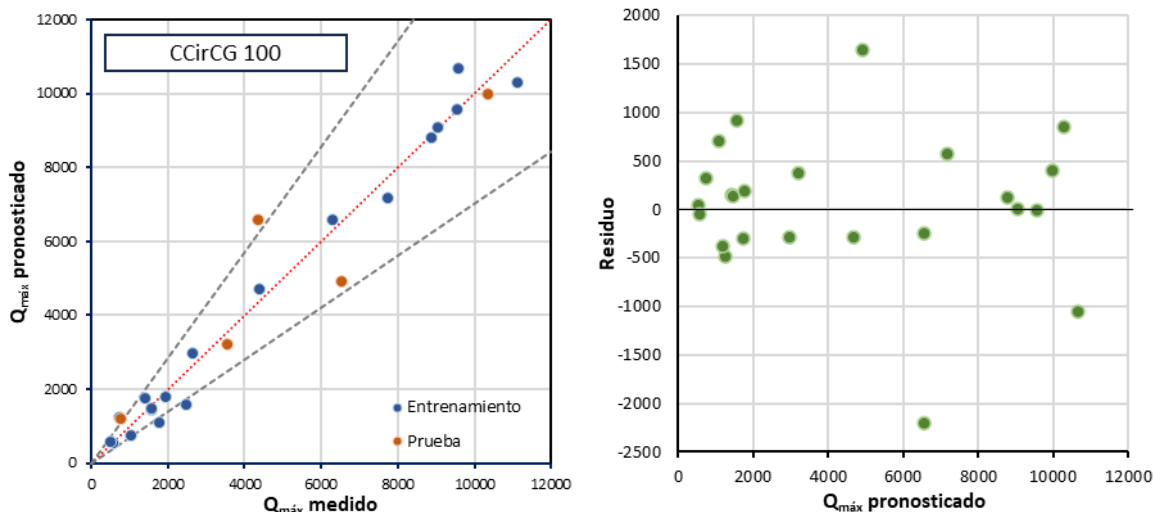


Figura III.26 Gráfica $Q_{máx}$ medido vs. $Q_{máx}$ pronosticado (izquierda) y gráfica de Residuo vs. $Q_{máx}$ pronosticado (derecha) del Modelo 3 – CCirCG

c) CCirCR

En las pruebas de compresión de pilas/pilotes de concreto con sección circular en roca se obtuvieron los siguientes cuatro mejores arquitecturas propuestas (**Tabla III.24**), con altos coeficientes de correlación (**Figura III.27**).

Tabla III.24 Resumen de modelos probados para CCirCR

MODELO	CAPAS	FUNCIÓN TRANSFERENCIA	NODOS	FUNCIÓN SALIDA
1	1	Sigmoide	100	Sigmoide
2	2	Sigmoide	100	Sigmoide
3	1	Sigmoide	50	Sigmoide
4	1	Sigmoide	10	Sigmoide

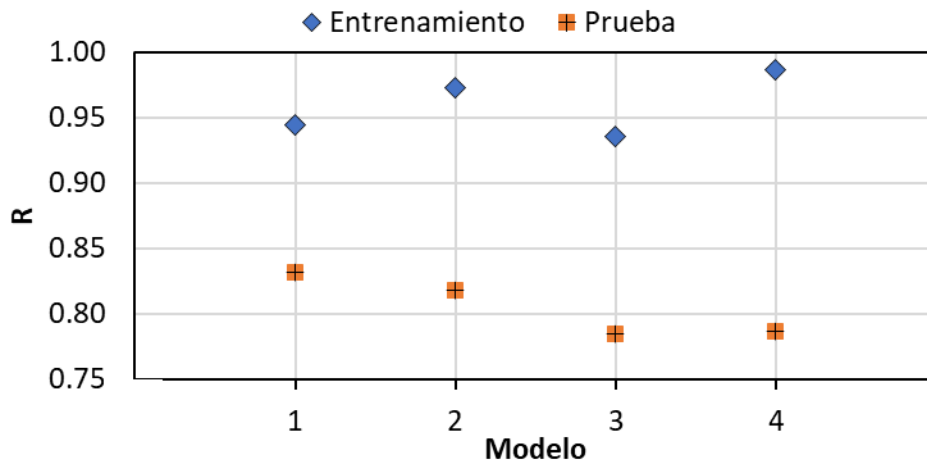


Figura III.27 Coeficiente de correlación de las de RN CCirCR

Con coeficientes de corrección de 0.97 en Entrenamiento y 0.82 en Prueba (Figura III.27), se tiene una tendencia a seleccionar al Modelo 2. En la Figura III.28 se muestra la relación entre la resistencia medida y la pronosticada, los datos se alinean a la línea de 45° y en su mayoría se encuentran dentro del intervalo de la desviación estándar.

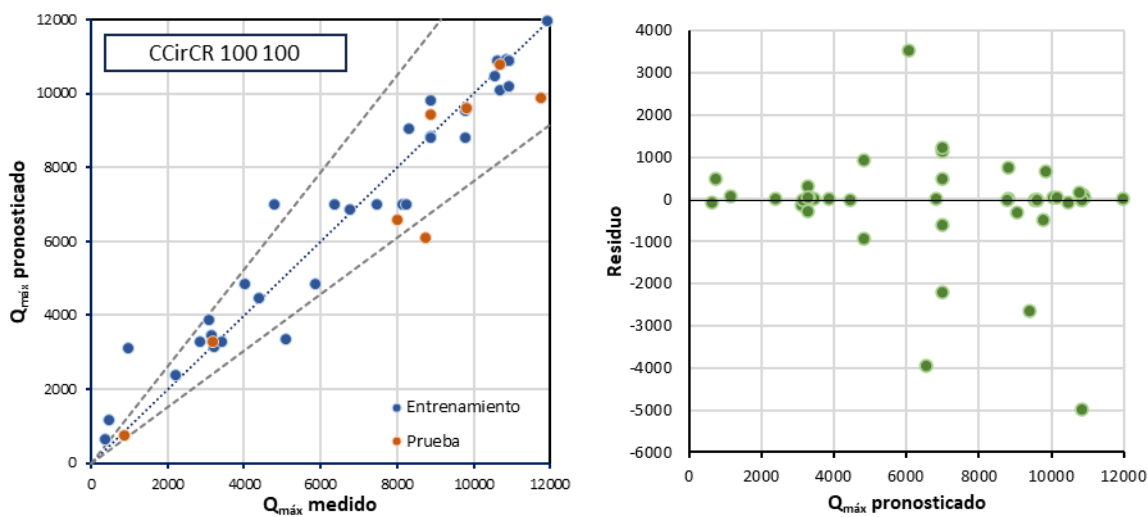


Figura III.28 Gráfica Q_{\max} medido vs. Q_{\max} pronosticado (izquierda) y gráfica de residuo vs. Q_{\max} pronosticado (derecha) del Modelo 2 – CCirCR

d) CCdCF (Elementos de Concreto con sección Cuadrada a Compresión en suelos Finos)

Para esta subcategoría de Concreto se tienen 4 variables (b , E , w y L) para la capa de entrada y un nodo de salida (Q_{CCdC}) como se observa en la **Figura III.29**.

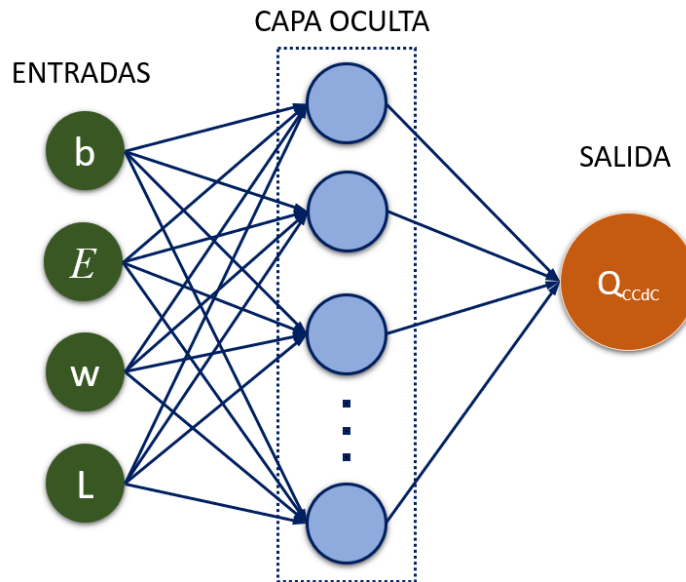


Figura III.29 Topología de RN en Concreto sección cuadrada (b =Ancho, E =Módulo de Young, w =Peso Longitudinal, L =Longitud y Q_{CCdC} =Resistencia Máxima)

Para suelos finos se propusieron distintas arquitecturas para los modelos variando las funciones de activación, cantidad de nodos y capas en la capa oculta, y se seleccionaron los cuatro mejores que se muestran en la **Tabla III.25** y su coeficiente de correlación en la **Figura III.30**.

Tabla III.25 Resumen de modelos probados para CCdCF

MODELO	CAPAS	FUNCIÓN TRANSFERENCIA	NODOS	FUNCIÓN SALIDA
1	2	Tangente Hiperbólica	200	Tangente Hiperbólica
2	2	Tangente Hiperbólica	200	Sigmoide
3	2	Tangente Hiperbólica	300	Sigmoide
4	2	Tangente Hiperbólica	400	Sigmoide

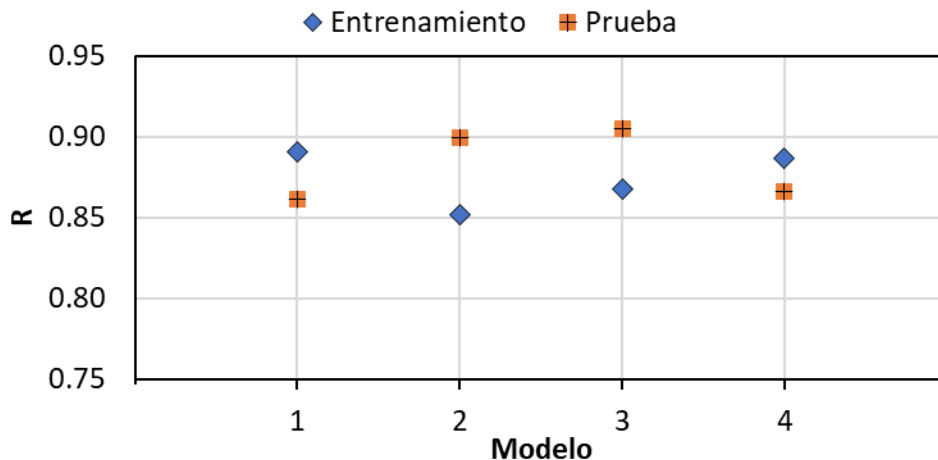


Figura III.30 Coeficiente de correlación de las RN CCdCF

Para respaldar la selección del modelo se usa el coeficiente de correlación de los modelos (Figura III.30). El mejor modelo es el número 3 con un coeficiente de correlación de 0.87 y 0.91 para Entrenamiento y Prueba, respectivamente (la mayoría de los valores están sobre o cerca de la línea a 45°, Figura III.31).

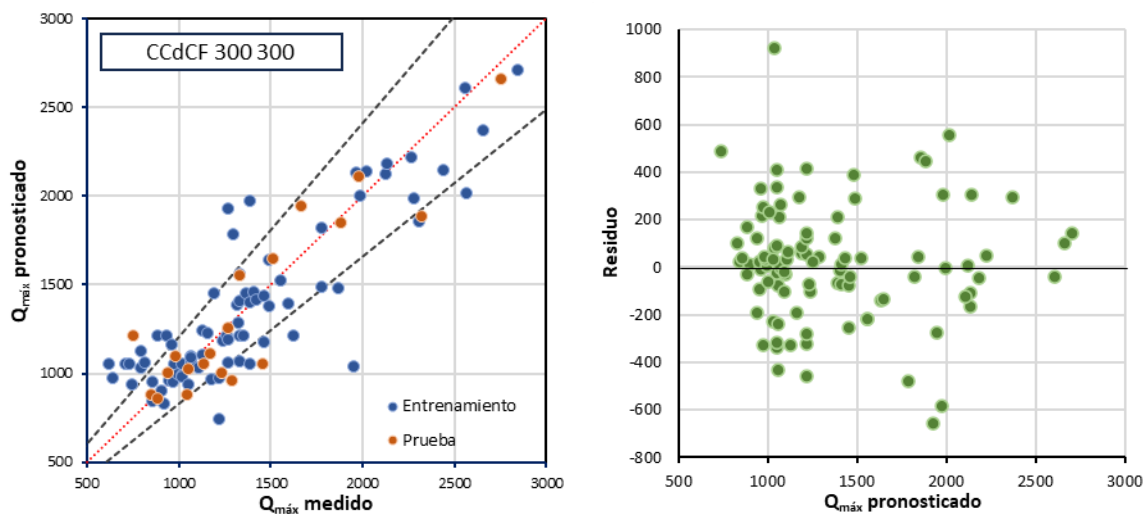


Figura III.31 Gráfica $Q_{m\acute{a}x}$ medido vs. $Q_{m\acute{a}x}$ pronosticado (izquierda) y gráfica de Residuo vs. $Q_{m\acute{a}x}$ pronosticado (derecha) del Modelo 3 – CCdCF

e) CCdCG

Ahora, para las pilas/pilotes de sección cuadrada en suelos gruesos se presentan en la **Tabla III.26** los cuatro mejores modelos obtenidos.

Tabla III.26 Resumen de modelos probados para CCdCG

MODELO	CAPAS	FUNCIÓN TRANSFERENCIA	NODOS	FUNCIÓN SALIDA
1	1	Sigmoide	10	Sigmoide
2	2	Tangente Hiperbólica	100	Sigmoide
3	2	Tangente Hiperbólica	200	Sigmoide
4	2	Tangente Hiperbólica	200	Identidad

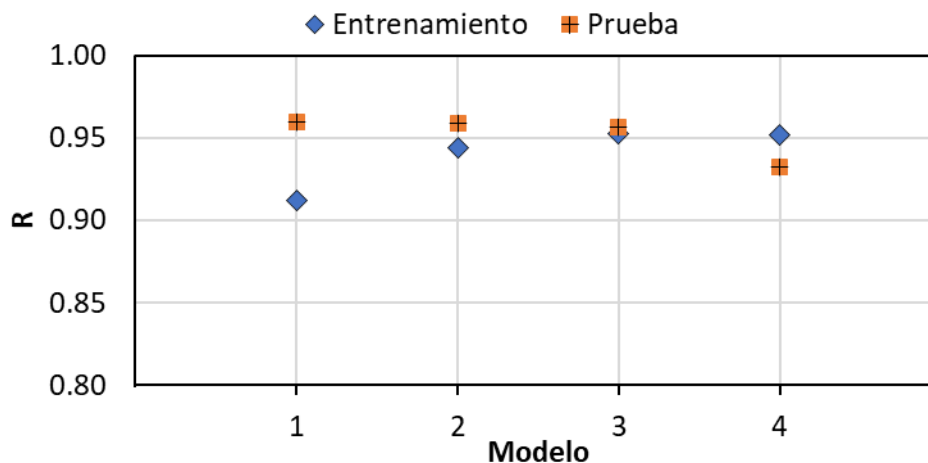


Figura III.32 Coeficiente de correlación de la RN CCdCG

Con coeficientes de correlación por arriba de 0.9, como se observa en la **Figura III.32**, el mejor modelo es el número 3 con R de 0.95 en Entrenamiento y 0.96 en Prueba. En la **Figura III.33** se muestran los gráficos “medido contra pronosticado” y “pronosticado contra residuo” del Modelo 3, en el primero se observa un buen ajuste en entrenamiento y prueba y en el segundo la mayoría de los datos no tienen grandes valores de sobrestimación y subestimación.

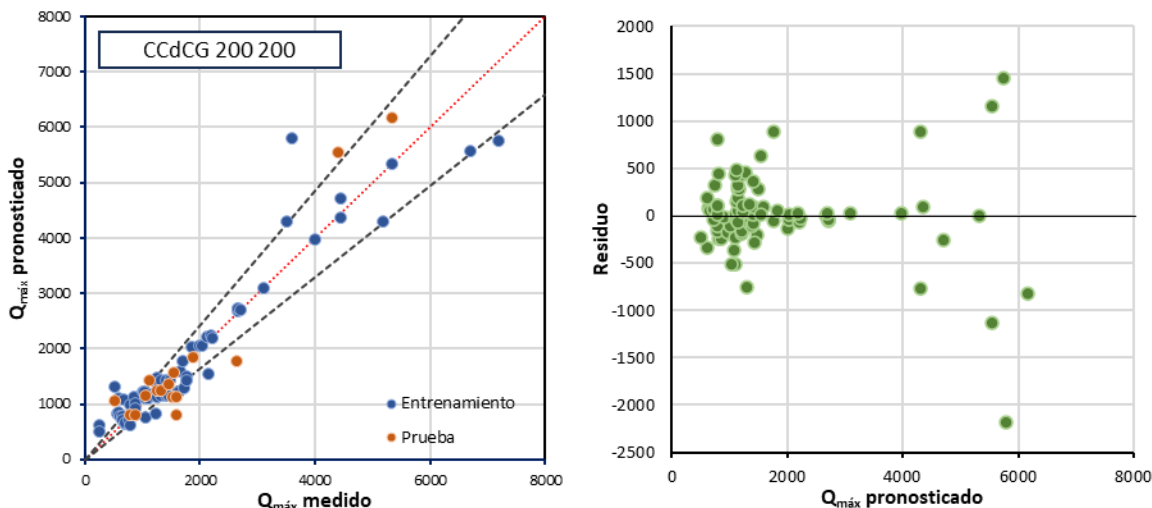


Figura III.33 Gráfica $Q_{máx}$ medido vs. $Q_{máx}$ pronosticado (izquierda) y gráfica de Residuo vs. $Q_{máx}$ pronosticado (derecha) del Modelo 3 – CCdCG

3.2.3 Acero

a) AICF (Elementos de Acero con sección I a Compresión en suelos Finos)

Para el Acero, pilotes perfil I, se tienen siete nodos en la capa de entrada y un nodo en la capa de salida, la capa oculta varía en cantidad de nodos (**Figura III.34**).

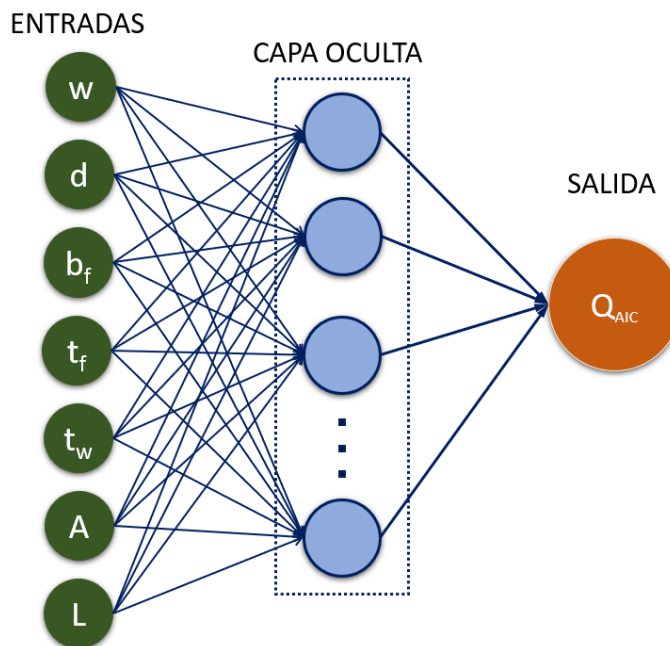


Figura III.34 Topología de RN en Acero sección I (w =Peso longitudinal, d =Peralte, b_f =Ancho de patín, t_f =Espesor de patín, t_w =Espesor de alma, A =Área de revestimiento, L =Longitud y Q_{AIC} =Resistencia Máxima)

En el caso de suelos finos el subconjunto de entrenamiento consiste en 28 ejemplos (80%), mientras que prueba son 8 ejemplos (20%). Se probaron y seleccionaron las cuatro mejores arquitecturas (**Tabla III.27**) y sus coeficientes de correlación están en la **Figura III.35**.

Tabla III.27 Resumen de modelos probados para AICF

MODELO	CAPAS	FUNCIÓN TRANSFERENCIA	NODOS	FUNCIÓN SALIDA
1	2	Tangente Hiperbólica	100	Sigmoide
2	2	Tangente Hiperbólica	100	Tangente Hiperbólica
3	2	Tangente Hiperbólica	100	Identidad
4	1	Tangente Hiperbólica	300	Tangente Hiperbólica

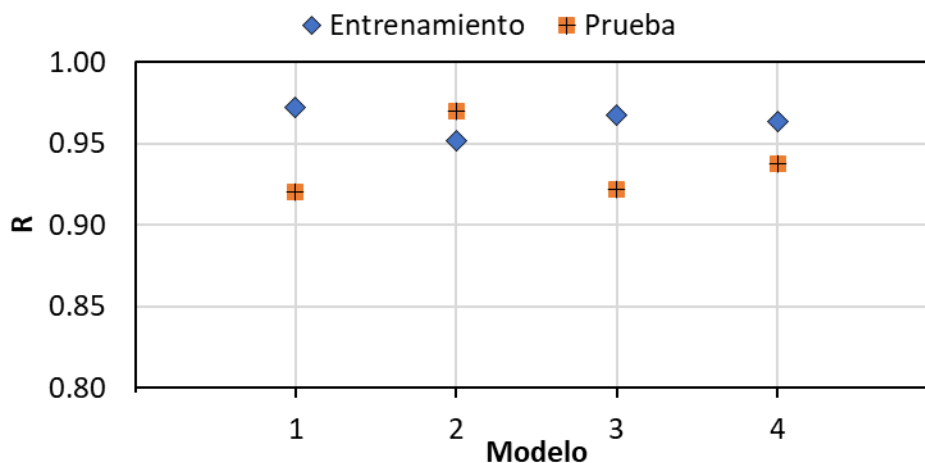


Figura III.35 Coeficiente de correlación de las RN AICF

El modelo con mejor ajuste es el Modelo 2. Como se observa en la **Figura III.36** presenta un buen comportamiento su gráfica resistencia medida contra la pronosticada y los valores de residuo son bajos.

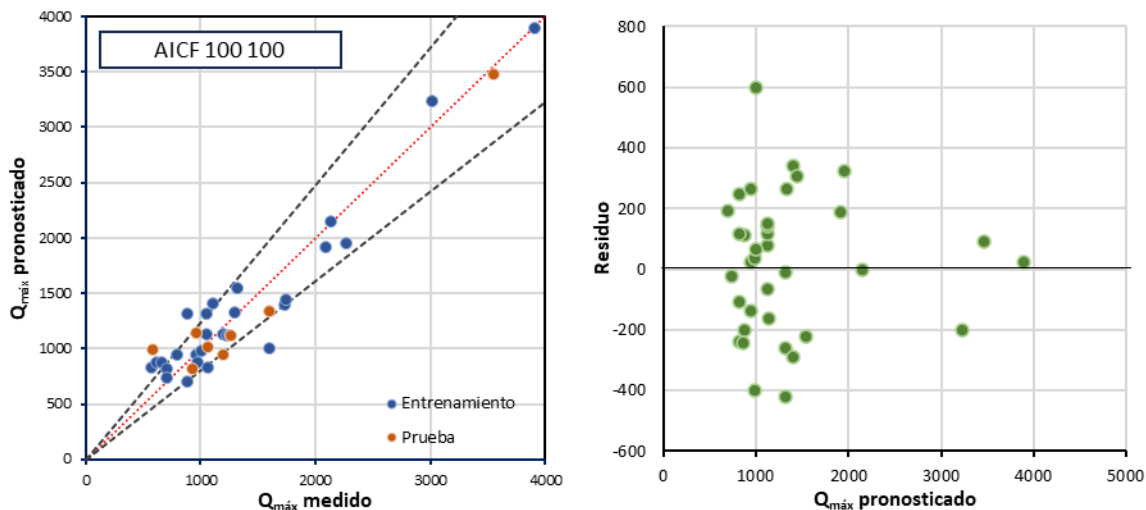


Figura III.36 Gráfica $Q_{máx}$ medido vs. $Q_{máx}$ pronosticado (izquierda) y gráfica de Residuo vs. $Q_{máx}$ pronosticado (derecha) del Modelo 2 – AICF

b) AICG

En suelos gruesos, se continuó con el procedimiento de modificar la arquitectura y seleccionar las cuatro mejores. En la **Tabla III.28** y en la **Figura III.37** se muestran sus coeficientes de correlación con valores muy cercanos a 1.0.

Tabla III.28 Resumen de modelos probados para AICG

MODELO	CAPAS	FUNCIÓN TRANSFERENCIA	NODOS	FUNCIÓN SALIDA
1	1	Sigmoide	100	Sigmoide
2	1	Sigmoide	10	Sigmoide
3	1	Sigmoide	10	Identidad
4	1	Sigmoide	10	Tangente Hiperbólica

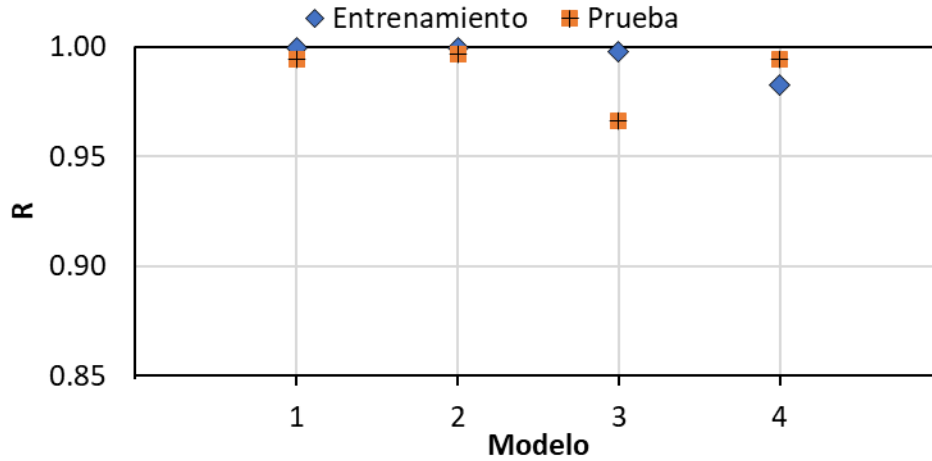


Figura III.37 Coeficiente de correlación de las RN AICG

De los cuatro modelos se seleccionó al Modelo 2 que muestra muy poca dispersión los grupos de entrenamiento y prueba (**Figura III.38**) mientras que la gráfica de residuos muestra valores residuales con poca sobrestimación.

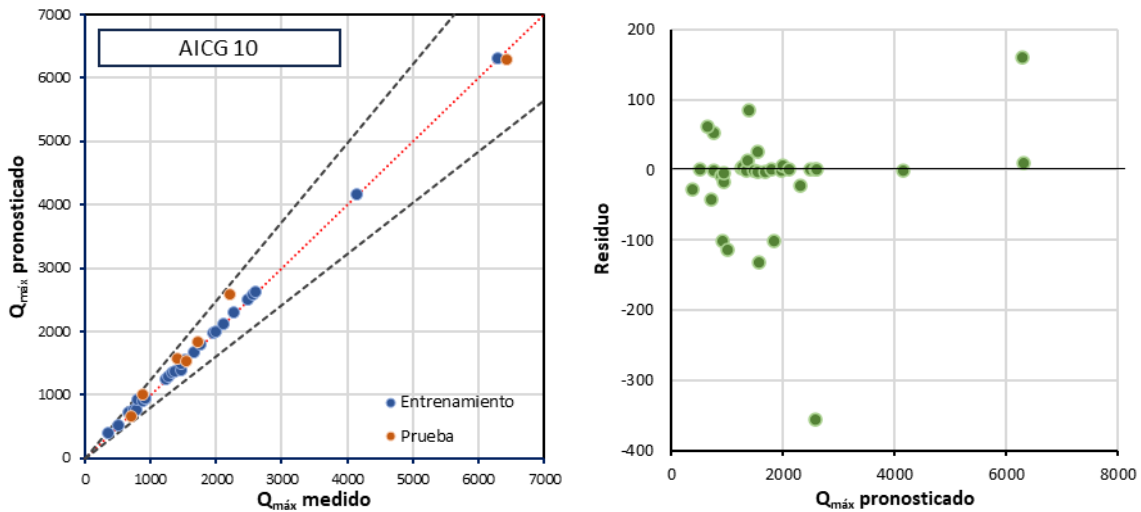


Figura III.38 Gráfica Q_{\max} medido vs. Q_{\max} pronosticado (izquierda) y gráfica de Residuo vs. Q_{\max} pronosticado (derecha) del Modelo 2 – AICG

c) ACirCF (Elementos de Acero con sección Circular a Compresión en suelos Finos)

Acero con sección circular (tubular) tiene cuatro nodos de entrada, una salida y se probaron distintas cantidades de nodos en la capa oculta (**Figura III.39**)

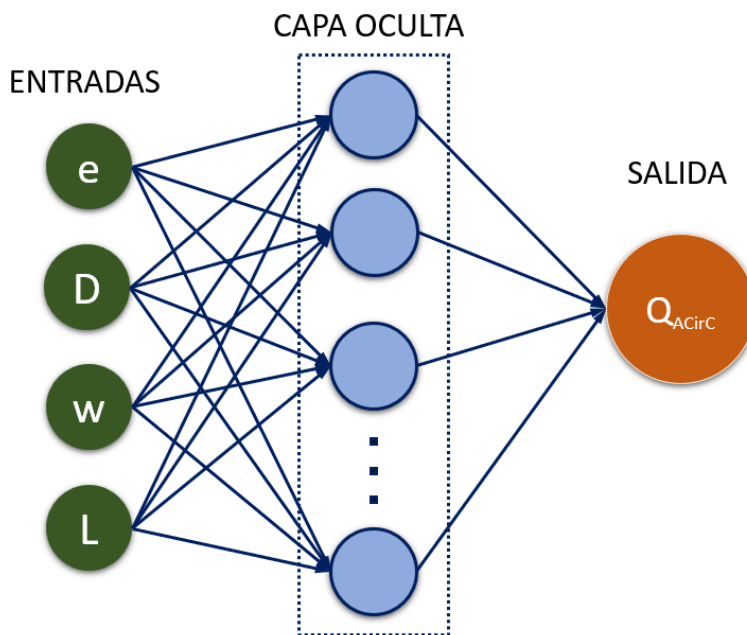


Figura III.39 Topología de RN en Acero sección Circular (e=Espesor de pared, D=Diámetro, w=Peso longitudinal y L=Longitud)

En el caso de suelos finos se obtuvieron los siguientes cuatro modelos (**Tabla III.29**) con los coeficientes de correlación mostrados en la **Figura III.40**.

Tabla III.29 Resumen de modelos probados para ACirCF

MODELO	CAPAS	FUNCIÓN TRANSFERENCIA	NODOS	FUNCIÓN SALIDA
1	1	Sigmoide	10	Sigmoide
2	1	Sigmoide	10	Identidad
3	1	Sigmoide	10	Tangente Hiperbólica
4	1	Tangente Hiperbólica	10	Sigmoide

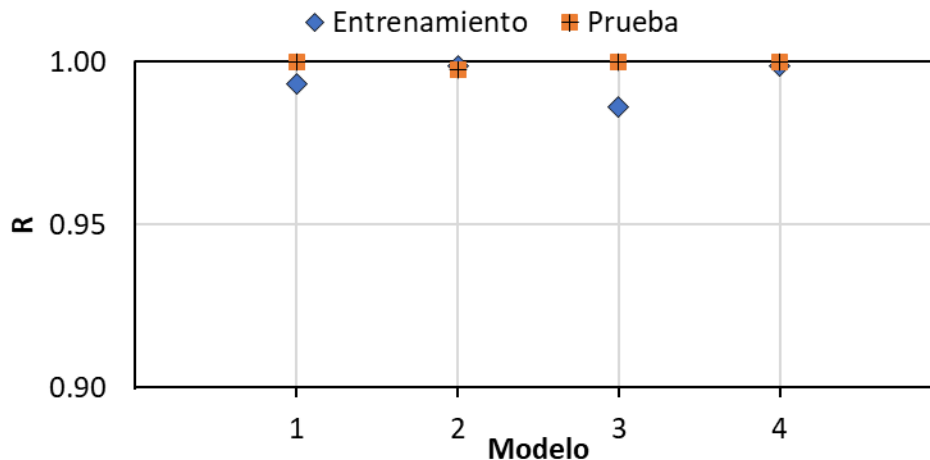


Figura III.40 Coeficiente de correlación de las RN ACirCF

Como se observa en la gráfica izquierda de la **Figura III.41**, los valores pronosticados ajustan con los valores medidos de la resistencia máxima con correlaciones muy cercanas a 1.0 (0.998 y 0.997 para entrenamiento y prueba, respectivamente).

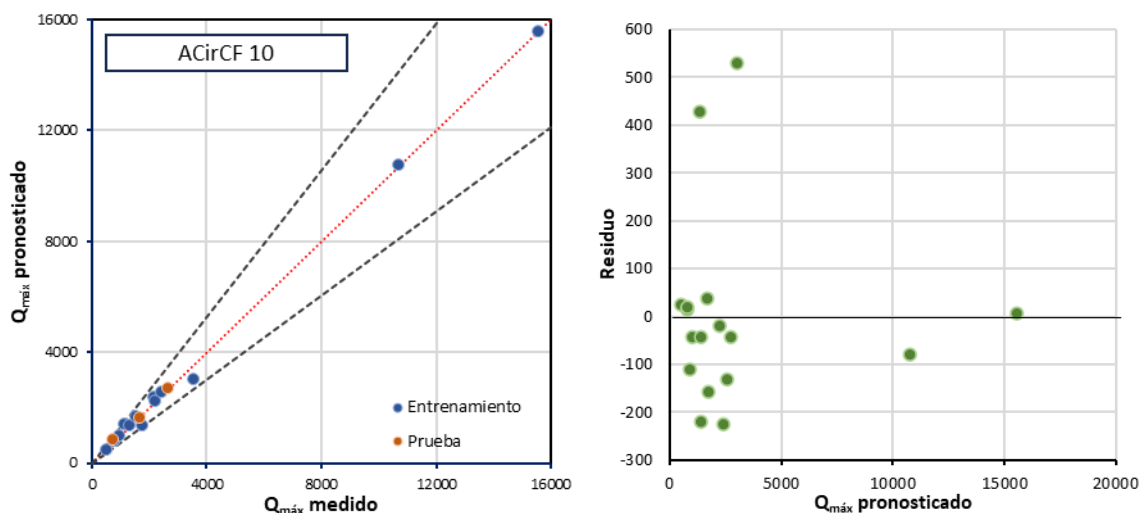


Figura III.41 Gráfica $Q_{m\acute{a}x}$ medido vs. $Q_{m\acute{a}x}$ pronosticado (izquierda) y gráfica de Residuo vs. $Q_{m\acute{a}x}$ pronosticado (derecha) del Modelo 2 – ACirCF

d) ACirCG

Para suelos gruesos en la **Tabla III.30** se muestran las cuatro mejores arquitecturas y en la **Figura III.42** se muestran sus coeficientes de correlación.

Tabla III.30 Resumen de modelos probados para ACircG

MODELO	CAPAS	FUNCIÓN TRANSFERENCIA	NODOS	FUNCIÓN SALIDA
1	2	Tangente Hiperbólica	100	Tangente Hiperbólica
2	2	Tangente Hiperbólica	100	Sigmoide
3	2	Tangente Hiperbólica	200	Sigmoide
4	2	Tangente Hiperbólica	300	Sigmoide

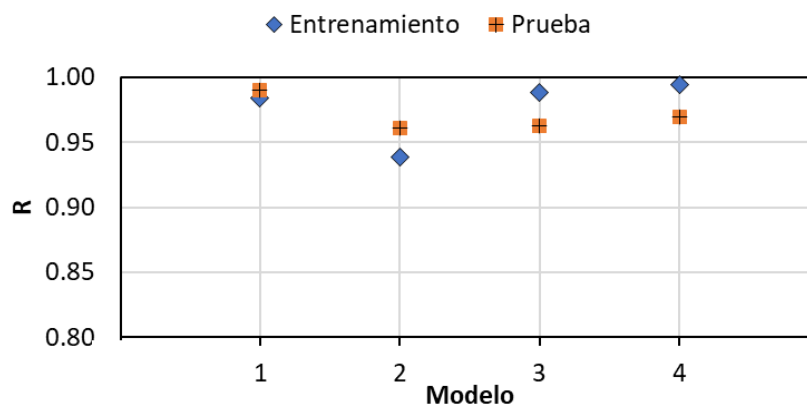


Figura III.42 Coeficiente de correlación de las RN ACirCG

El mejor modelo del conjunto es el 4, **Figura III.43**. En la gráfica (lado izquierdo) de la resistencia medida contra la resistencia pronosticada, los casos muestran poca dispersión. Los valores de correlación son 0.99 y 0.97 para entrenamiento y prueba, respectivamente.

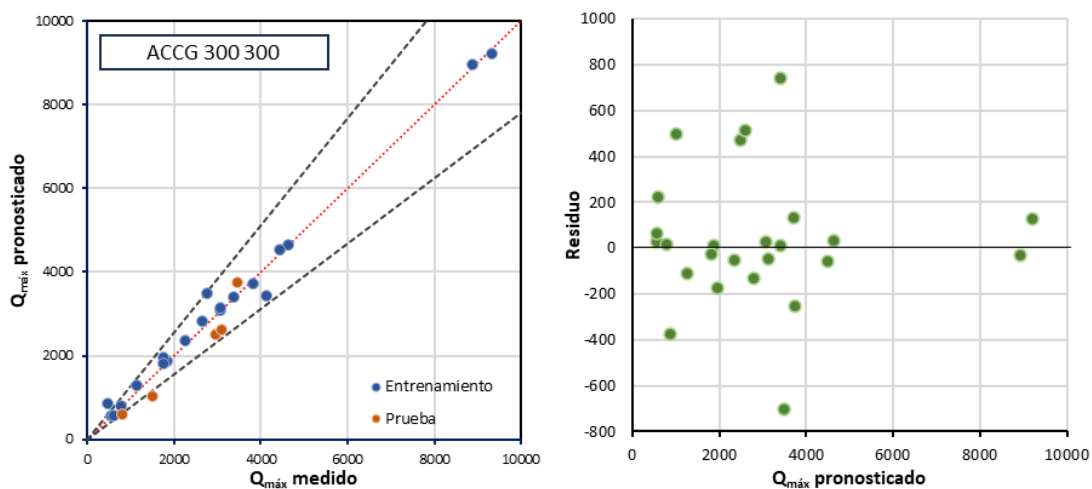


Figura III.43 Gráfica Q_{\max} medido vs. Q_{\max} pronosticado (izquierda) y gráfica de Residuo vs. Q_{\max} pronosticado (derecha) del Modelo 4 – ACirCG

3.3 Pruebas de afirmación

Para verificar los resultados obtenidos de las redes se presenta a continuación una serie de casos o datos no utilizados en el entrenamiento de las redes, con el fin validar el desempeño de los modelos.

➤ Para el modelo CCirCF se plantearon los siguientes dos casos. El primero corresponde a una prueba de carga realizada en el Valle de México para un pilote de concreto con sección circular que forma parte de la cimentación del Edificio A del Hospital General Zona Oriente del ISSSTE, ubicado en Calzada Ignacio Zaragoza, Iztapalapa, CDMX. En la **Tabla III.31** se presenta el resumen de la estratigrafía del sitio, donde se observa que la capa superficial está compuesta por una capa de relleno con 5 m de espesor, continuado por la Formación Arcilla Superior e Inferior hasta una profundidad de 49.5 m.

Tabla III.31 Resumen de la prueba y propiedades geotécnicas en Calzada Ignacio Zaragoza (modificado de Clavellina, 2005)

Estrato	Suelo	Inicio (m)	Término (m)	espesor (m)	Procedimiento de hincado	Tipo de prueba de compresión	Tipo de trabajo estimado	Diámetro (cm)	Longitud (m)
1	Relleno	0	5	5	Hincado bajo presión estática	Carga controlada	Fricción	60	49.5
2	FAS	5	49.5	44.5					

tiempo reposo (mes)	No. Golpes SPT	c (t/m ²)	φ (°)	γ (t/m ³)	Prof. NAF (m)	σz (t/m ²)	Q _{fu} (t)	Q _{pu} (t)	Q _u (t)
6	5 a 20	3	28	1.3	2	3.5	200.421	5.0894	205.5101
		2	0	1.15		10.175			

En la **Figura III.44** se muestra la curva carga-desplazamiento obtenida de la prueba de carga, así como un esquema del pilote puesto en el suelo.

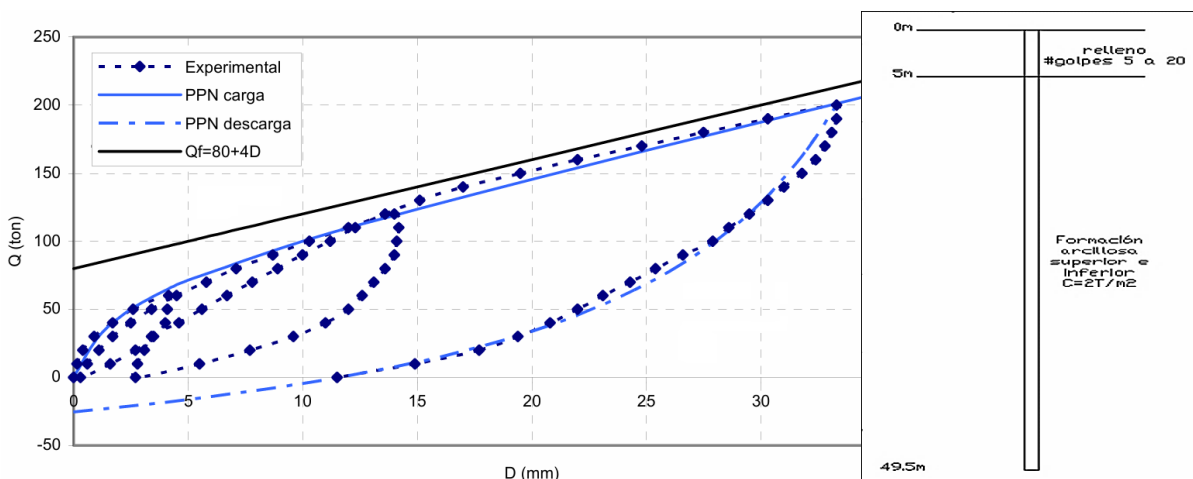


Figura III.44 Curva carga-desplazamiento y esquema del pilote en Calzada Ignacio Zaragoza (modificado de Clavellina, 2005). En la imagen, las líneas **PPN** corresponden a parámetros definidos en el estudio original, que representan curvas derivadas del modelo de *Principio de Proporcionalidad Natural*.

Para el cálculo de la capacidad de carga mediante métodos semi-empíricos se utilizó la siguiente formula general (3.2):

$$Q_u = Q_p + Q_f \quad (3.2)$$

La capacidad de carga por fuste está dada por (3.3):

$$Q_f = \sum_{i=1}^n f_{s_i} A_i = \pi D \sum_{i=1}^n f_{s_i} L_i \quad (3.3)$$

En términos de esfuerzos totales se dará uso del Método alfa (α) para la obtención de la resistencia unitaria con la formula (3.4):

$$f_{s_i} = \alpha s_{u_i} \quad (3.4)$$

Los valores de α se obtienen del gráfico de Tomlinson (1987) (Figura III.45):

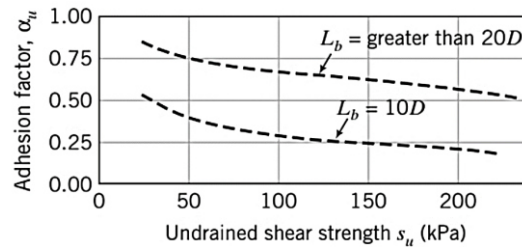


Figura III.45 Valores de α (tomado de Budhu, 2005)

$$\text{Para } s_{u_1} = 3 \frac{t}{m^2} = 29.42 \text{ kPa} ; \quad \alpha = 0.8$$

$$\text{Para } s_{u_2} = 2 \frac{t}{m^2} = 19.613 \text{ kPa} ; \quad \alpha = 0.9$$

Se sustituye los valores en la formula (3.4) y se usan en la formula (3.3) para obtener como resultado:

$$Q_f = 1757.94 \text{ kN}$$

Para la capacidad de carga por punta se define con (3.5):

$$Q_p = q_p A_p \quad (3.5)$$

Continuando el análisis en términos de esfuerzos totales se usará la formula (3.6):

$$q_p = N_c (s_u)_p \quad (3.6)$$

En el segundo estrato donde se encuentra la punta del pilote, se sigue el criterio de Budhu (2005) para obtener el coeficiente N_c :

$$(s_u)_p = 19.613 \text{ kPa} < 25 \text{ kPa}$$

$$N_c = 6$$

Al sustituir los valores en la formula (3.5) la capacidad de carga por punta es:

$$Q_p = 33.27 \text{ kN}$$

Como resultado final se obtiene la siguiente la capacidad de carga total de la sumatoria de las dos capacidades de carga calculadas, formula (3.2):

$$Q_u = 1791.22 \text{ kN}$$

Otro método similar para determinar la capacidad de carga es la que se presenta en las NTC Cimentaciones (GCDMX, 2023), el cual propone el siguiente método analítico de capacidad de carga reducida, valor que se debe cumplir de acuerdo con el reglamento de la ciudad de México, formula (3.7):

$$R = C_f + C_p \quad (3.7)$$

Comenzando por la capacidad de carga por fuste o de adherencia, se define como (3.8):

$$C_f = P_p F_R \sum_{i=1}^m \alpha_i c_{ui} L_i \quad (3.8)$$

Menciona que para el cálculo del coeficiente α , de acuerdo con el sitio se debe usar (3.9):

$$\alpha_i = 0.5 \sqrt{\frac{\sigma_{vi}}{c_{ui}}} \quad (3.9)$$

$$\alpha_1 = 0.54 \quad \alpha_2 = 1.13$$

Para el segundo estrato, de acuerdo con las normas, α_2 será corregido a $\alpha_2 = 1.0$

Al sustituir en la formula (3.8) los valores obtenidos y así como los factores que mencionan las normas ($F_R = 0.65$), se obtiene la siguiente capacidad por fuste:

$$C_f = 1166.704 \text{ kN}$$

Para la capacidad de carga por punta, las normas describen la siguiente formula (3.9)

$$C_p = (c_u N_c^* F_R + P_v) A_p \quad (3.9)$$

El valor de N_c^* se obtiene de la **Tabla III.32**:

Tabla III.32 Tabla de coeficiente N_c^* (tomado de GCDMX, 2023)

ϕ_u	0°	5°	10°
N_c^*	7	9	13

Al calcular la presión vertical total se obtuvo lo siguiente:

$$p_v = 57.675 \frac{t}{m^2} = 565.60 \text{ kPa}$$

Usando la formula (3.9) la capacidad de carga por punta es:

$$C_p = 185.152 \text{ kN}$$

Finalmente, de la formula (3.7) la capacidad de carga es:

$$R = 1351.856 \text{ kN}$$

Los resultados calculados, así como el medido en la prueba y sus errores relativos se presentan en la **Tabla III.33**, se observa que la predicción de la red tuvo un bajo error relativo de 6.8% respecto a la capacidad de carga medida.

Tabla III.33 Estimación de la red CCirCF para pilote de Calzada Ignacio Zaragoza

Longitud de la pila	49.5 m	error %
Diámetro de la pila	60 cm	
Q _u medida	2015.37 kN	-
Q _u Método α	1791.22 kN	11.1%
Q _u NTC 2023	1351.86 kN	32.9%
Q _u CCirCF estimada	1878.46 kN	6.8%

➤ El siguiente caso para verificar con el modelo CCirCF corresponde a una prueba de carga realizada sobre una pila colada en suelo fino (Hover *et al.*, 1985) de Boston, Massachusetts, Estados Unidos, la estratigrafía del sitio se muestra en la **Figura III.46**.

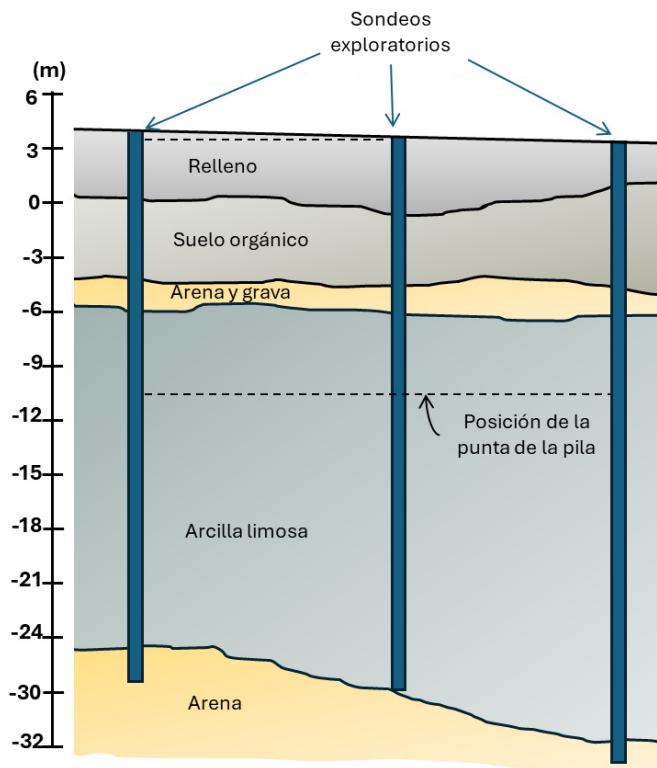


Figura III.46 Sección geotécnica del sitio Boston (modificado de Hover *et al.*, 1985)

Para determinar la capacidad de carga de la pila se usó el “criterio L_2 ” (Hirany & Kulhawy, 2002) aplicado a la curva carga-desplazamiento (**Figura III.47**) obtenida de la prueba.

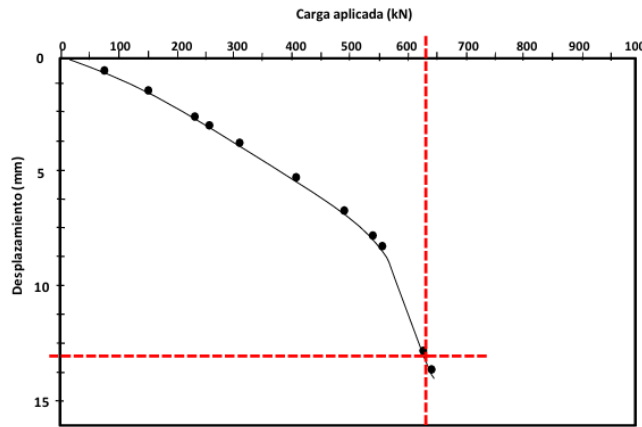


Figura III.47 Curva carga-desplazamiento de la prueba de carga Boston (modificado de Hover *et al*, 1985)

En la **Tabla III.34** se muestra los datos de entrada usados en la red, así como los resultados obtenidos de la prueba y la estimada por el modelo, donde se observa un error relativo de 5.8% respecto a la carga medida.

Tabla III.34 Estimación de la red CCirCF para la pila de Boston

Longitud de la pila	13 m	error %
Diámetro de la pila	22 cm	
Qu medida	622 kN	-
Qu CCirCF estimada	585.73 kN	5.8%

➤ Continuando con otro tipo de sección y suelo, se da uso del modelo CCdCG para la prueba de carga realizada a un pilote sección cuadrada de concreto que forma parte del proyecto de la Planta de Ciclo Combinada “Campeche” localizado en el kilómetro 155 de la carretera Villahermosa-Escárcega a la altura del entronque Palizada, Campeche. En la **Figura III.48** se presenta la estratigrafía y propiedades geotécnicas del sitio, y en la **Figura III.49** la curva carga-desplazamiento resultante de la prueba.

Profundidad (m)	Descripción	# golpes	γ (T/m3)	c (T/m2)	ϕ (°)
0m					
1.5m	arcilla arenosa	6	1.87	3	0
4m	arena fina	18	1.96	6	0
6m	arcilla dura	21	1.97	2	0
10m	arena fina mediana	18	1.93	8.3	0
20m	arcilla dura	35	2.02	2.5	0
21.5m	arcilla dura	35	2.13		

Figura III.48 Estratigrafía y esquema del pilote en la Planta “Campeche” (tomado de Clavellina, 2005)

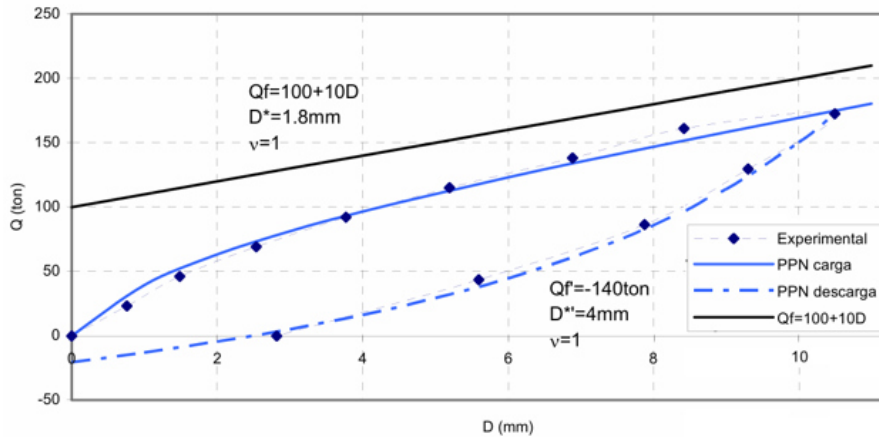


Figura III.49 Curva carga-desplazamiento de la prueba de carga del pilote en la Planta “Campeche” (modificado de Clavellina, 2005). En la imagen, las líneas PPN corresponden a parámetros definidos en el estudio original, que representan curvas derivadas del modelo de *Principio de Proporcionalidad Natural*.

En la **Tabla III.35** se muestra los datos de entrada usados para la red, así como el valor estimado por el modelo con un error relativo del 7.1% respecto a la medida.

Tabla III.35 Estimación de la red CCdCG para el pilote de Planta “Campeche”

Ancho del pilote	40 cm	error %
Longitud del pilote	21.5 m	
Peso por unidad de longitud	397.14 kg/m	
Módulo de Young	38.61 GPa	
Q_u medida	1583.19 kN	-
Q_u CCdCG estimada	1471.16 kN	7.1%

➤ Pasando al material acero, se tomó la prueba de carga hecha sobre un pilote de acero IR desplantado en suelos arenoso-arcillosos de la Ciudad de México, en la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco. El pilote de acero es un IR W12x40 A992 desplantado a una profundidad de 13 m, su sección transversal y medidas se presenta en la **Figura III.50**, mientras que el sistema del marco de reacción donde se aplicó la carga se compone por pilotes W12x40 separados a 3.15 m.

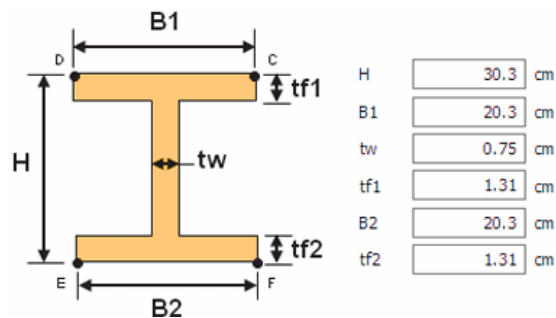


Figura III.50 Geometría de pilote IR W12x40 empleado en ESIA Zacatenco (tomado de Flores *et al*, 2022)

La estratigrafía del sitio se definió mediante pruebas de penetración estándar y pruebas de laboratorio, el cual se muestra en la **Figura III.51**.

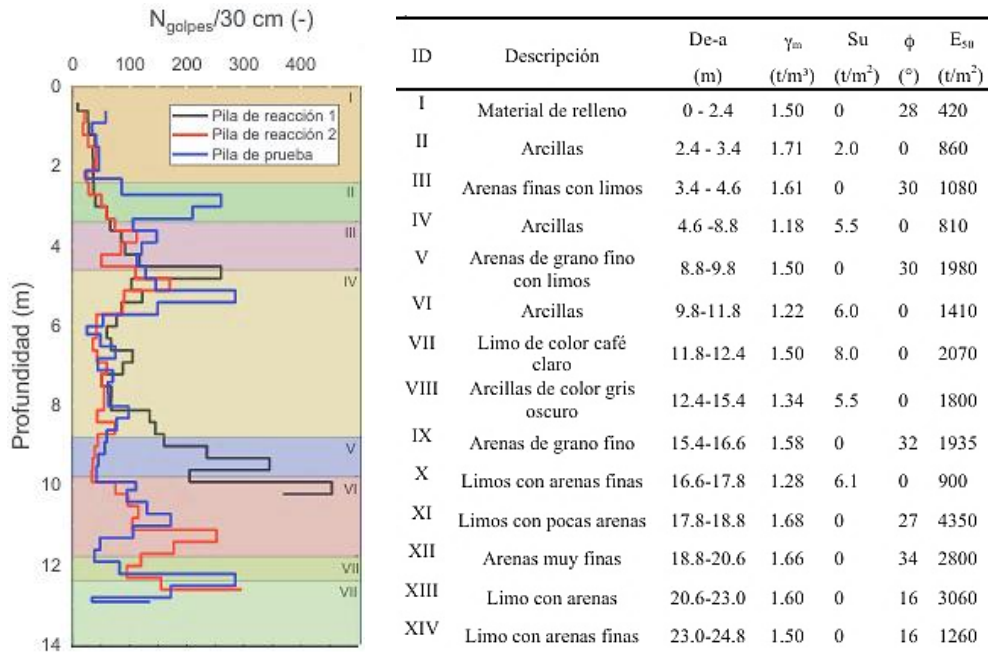


Figura III.51 Estratigrafía del sitio ESIA Zacatenco (modificado de Flores *et al*, 2022)

Los resultados de la prueba se muestran en la **Figura III.52**, la carga máxima aplicada fue de 78.2 ton. La tercera curva que observa representa una simulación numérica hecha por Flores *et al* (2022).

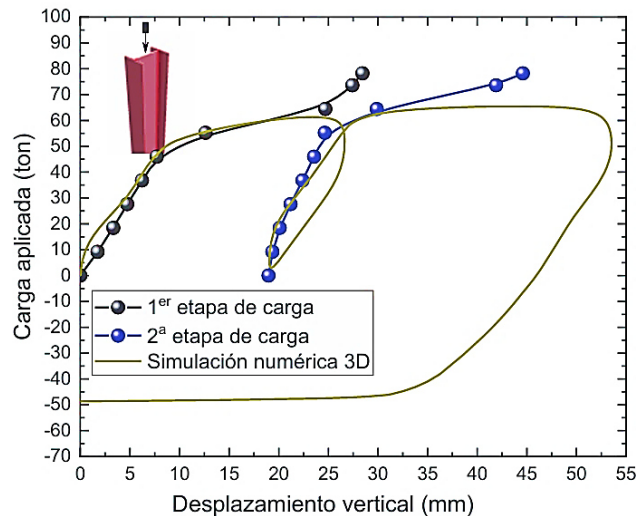


Figura III.52 Curvas carga-desplazamiento del pilote en ESIA Zacatenco (modificado de Flores *et al*, 2022)

Para este caso se usó el modelo AICG, en la **Tabla III.36** se muestra los datos de entrada de la red neuronal y el comparativo de la carga estimada por el modelo y la medida en la prueba, presentando un error relativo de 25.8%.

Tabla III.36 Estimación de la red AICG para el pilote de ESIA Zacatenco

Peso por unidad de longitud	60 kg/m	error %
Peralte	303 mm	
Ancho de patín	203 mm	
Espesor de patín	13.1 mm	
Espesor de alma	7.5 mm	
Longitud	13 m	
Q_u medida	713.93 kN	-
Q_u AICG estimada	898.15 kN	25.80%

➤ Por último, se presenta las pruebas de carga realizadas sobre pilotes de tubo de acero que fueron hincados la zona costera de Campeche, Golfo de México para un puente vehicular. La estratigrafía del sitio se presenta en la **Figura III.53** así como su descripción en la **Tabla III.37**.

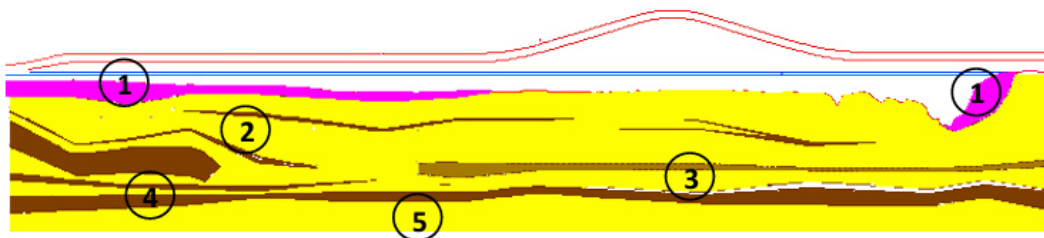


Figura III.53 Estratigrafía del sitio a lo largo del puente en Campeche (tomado de Paniagua *et al*, 2019)

Tabla III.37 Descripción de la estratigrafía del sitio en el Golfo de México (Paniagua *et al*, 2019)

Unidad	Prof., m	Descripción
N/A	0.00-7.20	Plataforma y tirante de agua.
1	7.20-9.00	Arena arcillosa y arcilla arenosa con conchillas, gris claro, en estado suelto a medianamente compacto.
2	9.00-14.40	Arcilla con contenido variable de arena, grumos y conchillas, color gris claro, de consistencia firme a dura.
3	14.40-25.80	Arcilla con arena, grumos y gravillas localmente gris claro y café verdoso, de consistencia firme a dura, con número de golpes SPT entre 11 y más de 50.
4	25.80-39.00	Arcilla con arena, grumos y gravillas, color gris claro y café verdoso, de consistencia firme a dura, con lentes de limo café claro.
5	39.00-42.23	Arena limo-arcillosa con gravillas y grumos aislados, café verdoso y café claro, muy compacta, con número de golpes SPT de más de 50.

En este estudio se hicieron nueve pruebas de carga para pilotes de tubo de acero con diámetros entre 1.2 y 1.5 m fabricados con placa de acero de 3/4". En la **Figura III.54** se muestra las curvas carga-desplazamiento que se obtuvieron, en general presentan un comportamiento similar en cada una de las pruebas, en el artículo (Paniagua *et al*, 2019) menciona que las pruebas 28, 32, 37, 43, 67, 67-BIS y 58, presentan un comportamiento similar elastoplástico, mientras que las pruebas 67-F y 73 (esta última realizada en zona de playa), presentaron una tendencia de comportamiento elástico similar entre sí.

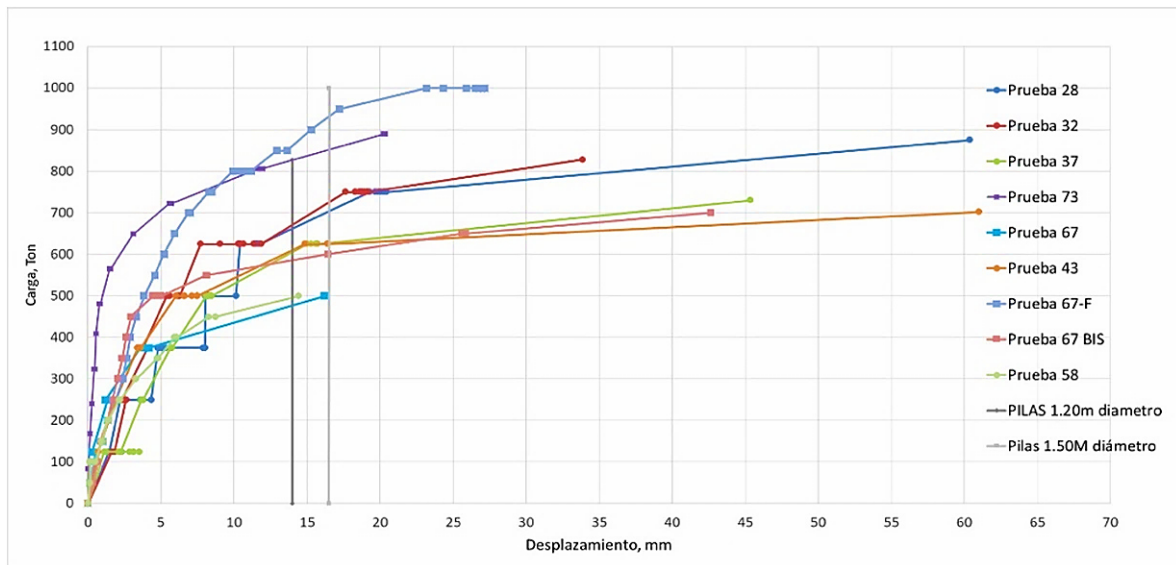


Figura III.54 Curvas carga-desplazamiento de los pilotes tubulares en el Golfo de México (tomado de Paniagua *et al*, 2019)

Se seleccionaron dos pruebas para estimar la capacidad de carga utilizando el modelo ACirCF. En **Tabla III.38** se comparan los resultados obtenidos, junto con los datos de entrada que se utilizaron en modelo y el error relativo correspondiente.

Tabla III.38 Estimación de la red ACirCF para los pilotes tubulares en el Golfo de México

Prueba	e (cm)	D (cm)	w (kg/m)	L (m)	Q _u medido (kN)	Q _u estimado (kN)	error %
28	1.91	120	563.8	28.02	8580.86	8824.37	2.8%
67-F	1.91	150	707	31.96	9806.70	11178.38	14%

Capítulo IV - Conclusiones

En esta tesis se exploró el uso de las redes neuronales para predecir la resistencia máxima de pilas y pilotes. Se utilizaron más de 1200 pruebas de carga (obtenidas de la FHWA DFLTD v.2) sobre pilas/pilotes de madera, concreto y acero, bajo cargas estáticas axiales a compresión, en distintos tipos de suelos. Se priorizó el uso de variables simples para la construcción del modelo de forma que la estimación de la carga máxima se pudiera realizar sin complicaciones de fondo.

- Entre las complicaciones que surgieron para el desarrollo de esta investigación destaca la disponibilidad de registros de libre acceso. En general son escasos y en su mayoría están afectados por la deficiencia en el registro, la compilación y el almacenamiento. México no cuenta con este tipo de repositorios y no existen los instrumentos para conseguirlos con acuerdos que organicen los resultados de pruebas exigidas en norma o con bancos en la academia que concentren los esfuerzos ya que, en su mayoría, los estudios son de baja escala, puntuales y dependientes de un tercero que patrocina y no comparte. En este estudio, a pesar de la gran cantidad de datos que de inicio ofrecía la FHWA, la mayoría de las pilas/pilotes ensayados contaba con información incompleta y/o con presentación en formato de consulta ilegible, lo que afectó la organización y el análisis de datos. Después de la limpieza y la concentración estructurada de todas las informaciones, menos de la mitad de los disponibles fueron separados bajo la etiqueta “suficiente calidad” (529 ensayos) y fueron usados para el desarrollo de la red neuronal. La separación del conjunto total en los subconjuntos entrenamiento-prueba fue, para todas las topologías, del 80-20% (sobre las instancias útiles en cada módulo de análisis).
- La solución está estructurada en módulos, el primer nivel sirve de acuerdo con el material -considerado el parámetro director- y a partir de ahí las entradas son comunes a todos los modelos, divididas en geométricas y naturales. Los análisis muestran que las variables con mayor impacto sobre la resistencia son las que describen la forma y tamaño de la pila/pilote aunque esta conclusión debe tomarse con cautela ya que la descripción del suelo es muy simplista y esto pudiera diluir su importancia durante la fase de aprendizaje. Mayor discusión es necesaria sobre este punto porque, de acuerdo con los ejemplos de aplicación mostrados en la Sección 3.3, la separación más sencilla del SUCS es suficiente para alcanzar estimaciones con mínimos niveles de error.
- Para la CDMX es de mayor interés lo conseguido con la red para material Concreto y elementos embebidos en suelos finos. La red CCirCF fue una de las entrenadas con mayor número de instancias y su topología fue de las más pequeñas (<100 nodos en una capa). Su capacidad predictiva fue de las más altas. Se puede concluir que el comportamiento de estos elementos embebidos en finos, con las características expresadas en la base de datos, persiguen una ley (funcional) suficientemente simple para ser resuelta por un entramado “pequeño” de pesos neuronales. Por otro lado, las

redes CCirCG y CCirCR (suelos gruesos) resultaron en topologías mucho más complejas. Se pueden argumentar dos condicionantes: i. menor número de ejemplos para entrenar y probar a la red originó complejidades no adheridas al fenómeno sino a la calidad de la base, y ii. los elementos embebidos en suelos con partículas de diámetros mayores representan comportamientos que persiguen leyes (funcionales) de mayor dimensión con no linealidades de difícil expresión.

- A pesar de la simpleza de los modelos que resultaron, y de la mano de las investigaciones que apuntan hacia la necesidad de revisión de algunos modelos sofisticados que no necesariamente son mejores predictores, las estimaciones de las redes neuronales mostraron una buena correlación con los datos registrados en los distintos sitios de prueba sobre pilas/pilotes de diversos materiales en los Estados Unidos. Se puede concluir que los modelos (diferentes topologías) fueron suficientes para aprender de las relaciones entre las características de un cimiento profundo embebido en un cierto suelo y su capacidad para resistir carga a compresión.
- Por otro lado, los comparativos entre los resultados neuronales y los métodos semi-empíricos sostienen la recomendación de actualizar la oferta para el ingeniero de la práctica, para que, de seguir usándolos, tengan la misma significancia en los materiales de los cimientos y los suelos donde se embeben.

Referencias

- Academic College Projects, ACP. (2015). *Neural networks projects*. Academic College Projects. Recuperado de <https://academiccollegeprojects.com/neural-network-projects/>
- Aggarwal, C. (2018). *Neural Networks and Deep Learning*. Springer International Publishing.
- Ayuso, J. (2005). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. Córdoba: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba.
- Bishop, C. (1994). Neural networks and their applications. In *Review of Scientific Instruments* (Vol. 65, Issue 6, pp. 1803–1831). <https://doi.org/10.1063/1.1144830>
- Budhu, M. (2011). *Soil mechanics and foundations*. 3rd Edition. John Wiley & Sons, Inc.
- Clavellina, J. (2005). *Interpretación de pruebas de carga en pilotes mediante el Principio de Proporcionalidad Natural*. Tesis profesional de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Datawow, (2020). *Interns Explain Basic Neural Network*. Recuperado el 16 de junio de 2020, de <https://www.datawow.io/blogs/interns-explain-basic-neural-network>
- Deloney, M. (2023). *What Is Pilie for Foundation?*. Civil-Jungles. Recuperado el 14 de diciembre de 2023, de <https://civiljungles.com/pilie-for-foundation/>
- Federal Highway Administration, FHWA (2016). *Design and construction of driven pile foundations – Volume II*. U.S. Department of Transportation. https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/gec12/nhi16009_v2.pdf
- Fellenius, B. (1980). *The analysis of results from routine pile load tests*. Ground Engineering, London, Vol. 13, No. 6, pp. 19 – 31.
- Flores, F., Santos, D., y Torres, R. (2022). *Análisis numérico de comportamiento de pilotes de acero IR en zona de transición de la Ciudad de México*. En *XXXI Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica.
- Gavidia, L. (2019). *Evaluación de la capacidad de carga de pilotes mediante métodos teóricos y semiempíricos para el desembarcadero pesquero artesanal de cerro azul, Cañete*. Tesis profesional de licenciatura. Universidad Nacional Federico Villarreal.
- Gobierno de la Ciudad de México, GCDMX (2023). Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones.
- Graupe, D. (2019). *Advanced Series in Circuits and Systems – Vol. 8 Principles of artificial neural networks: Basic Designs to Deep Learning*. 4th Edition. World Scientific Publishing.
- Hirany, A. & Kulhawy, F. (2002). *On the interpretation of drilled foundation load test results*. Deep foundations (GSP 116), M.W. O'Neill and F.C. Townsend. ASCE, Reston, Va., 1018-1028.
- Hover, W., Simon, R., & Cooke, H. (1989). *Load Tests on Bored Friction Piles in Clay*. Foundation Engineering; Current Principles and Practices (GSP 22). New York: FH Kulhawy, ASCE, 1054-1069.

- IBM (2021). *Train neural network node (general)*. IBM SPSS Modeler. Recuperado el 21 de agosto de 2021, de https://www.ibm.com/docs/es/spss-modeler/saas?topic=SS3RA7_sub/modeler_mainhelp_client_ddita/clementine/trainnetnode_general.htm
- Isasi, P., y Galván, I. (2004). *REDES DE NEURONAS ARTIFICIALES: Un enfoque práctico*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN.
- Kerrigan, C. (2022). *Artificial Intelligence – Law and regulation*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing.
- Martín, B., y Molina, A. (2007). *Redes Neuronales y Sistemas Borrosos*. 3ra Edición. Madrid: Alfaomega Grupo Editor.
- Masters, T. (1993). *Practical Neural Network Recipes in C++*. San Diego: Academic Press, Inc.
- Merritt, F. (2008). *Manual del ingeniero civil*. Tomo I. 4ta edición. McGraw-Hill.
- Mitchell, M. (2019). *Artificial Intelligence: A guide for thinking humans*. 1st Edition. New York: Farrar, Straus and Giroux.
- Paniagua, W., et al. (2017). *Ingeniería de cimentaciones profundas*. Tomo 1 y 2. México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica.
- Paniagua, W., Elvira A., Pineda, C., Valle, E., y Hernández, C. (2019). *Pruebas de carga estática en pilotes tubulares, para un puente vehicular en la zona costera de Campeche*. Pilotec, S.A. de C.V.
- Peck, R., Hanson, W., Thornburn, T. (1982). *Ingeniería de cimentaciones*. México: Limusa.
- Pons, C., Pérez, G., y Baum G. (2022). La Nueva Inteligencia Artificial Conceptos Básicos y Aplicación. [versión electrónica]. Revista Química, núm. 372. Recuperado de <https://host170.sedici.unlp.edu.ar/server/api/core/bitstreams/03a03a14-6abe-41d6-b555-425211bb1b87/content>
- Rajapakse, R. (2016). *Pile Design and Construction Rules of Thumb*. 2nd Edition. New York: Butterworth-Heinemann, Elsevier Inc.
- Sánchez, E., y Alanís, A. (2006). *Redes neuronales: Conceptos y aplicaciones a control automático*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
- Sardón, T., y Sasaki, A. (2020). *Estudio comparativo entre la capacidad de carga de pilotes excavados, estimados mediante métodos analíticos, semiempíricos y pruebas de carga*. Tesis profesional de licenciatura. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- Stanimirovic, I. (2019). *Deep Neural Networks and Applications*. Oakville: Arcler Press.
- Vidal, J. (2021). Introducción A La Inteligencia Artificial (IA). Joober Technologies, Recuperado de <https://www.joobertech.com/introduccion-a-la-inteligencia-artificial-ia/>
- Yang, X., et al (2012). *Metaheuristics in water, geotechnical and transport engineering*. 1st Edition. London: Elsevier.