



UNSH

FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL



"Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho"

## CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

### CONSTANCIA N° 010-2024-FIMGC/ASIH

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajos de tesis de pregrado con el software Turnitin, de la Escuela Profesional de **Ingeniería Civil** de la **Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil**; en cumplimiento a la **Resolución de Consejo Universitario N° 039-2021-UNSH-CU**, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga y **Resolución Decanal N° 476-2023-FIMGC-UNSH-D**, deja constancia de originalidad de trabajo de investigación, que el/la Sr./Srta.

**Apellidos y Nombres** : ESCOBAR VENTURA, JONATHAN JOEL  
**Escuela Profesional** : INGENIERÍA CIVIL  
**Título de la Tesis** : ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE COMPACTACIÓN Y RESISTENCIA DE SOPORTE EN SUELOS DE SUBRASANTE UTILIZANDO REDES NEURONALES ARTIFICIALES SUPERVISADAS EN LA PAVIMENTACIÓN DE LA AV. EJÉRCITO DE ANDRÉS AVELINO CÁCERES AYACUCHO, 2021  
**Evaluación de la Originalidad** : 17 % Índice de Similitud  
**Identificador de la entrega** : 2296310516

Por tanto, según los Artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es **PROCEDENTE** otorgar la **Constancia de Originalidad** para los fines que crea conveniente.

En señal de conformidad y verificación se firma la presente constancia

Ayacucho, 16 de febrero del 2024



UNIVERSIDAD NACIONAL DE  
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA  
Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil

Msc. Ing. Alex Sander IRCANAUPA HUAMANI  
Verificador de Originalidad de Trabajos de Tesis de Pregrado  
Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Civil

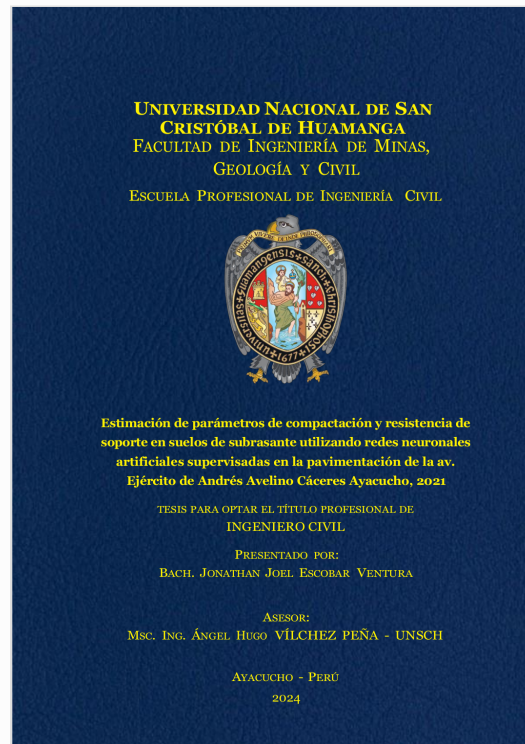


## Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

|                              |                                                      |
|------------------------------|------------------------------------------------------|
| Autor de la entrega:         | Jonathan escobar ventura                             |
| Título del ejercicio:        | ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE COMPACTACIÓN Y RESIST... |
| Título de la entrega:        | ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE COMPACTACIÓN Y RESIST... |
| Nombre del archivo:          | BORRADOR_JONATHAN_JOEL_EV.pdf                        |
| Tamaño del archivo:          | 4.36M                                                |
| Total páginas:               | 124                                                  |
| Total de palabras:           | 37,646                                               |
| Total de caracteres:         | 144,979                                              |
| Fecha de entrega:            | 16-feb.-2024 06:31a. m. (UTC-0500)                   |
| Identificador de la entre... | 2296310516                                           |



# ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE COMPACTACIÓN Y RESISTENCIA DE SOPORTE EN SUELOS DE SUBRASANTE UTILIZANDO REDES NEURONALES ARTIFICIALES SUPERVISADAS EN LA PAVIMENTACIÓN DE LA AV. EJÉRCITO DE ANDRÉS AVELINO CÁCERES AYACUCHO, 2021

*por Jonathan Joel Escobar Ventura*

---

**Fecha de entrega:** 16-feb-2024 06:31a.m. (UTC-0500)

**Identificador de la entrega:** 2296310516

**Nombre del archivo:** BORRADOR\_JONATHAN\_JOEL\_EV.pdf (4.36M)

**Total de palabras:** 37646

**Total de caracteres:** 144979

<sup>1</sup>  
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN  
CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS,  
GEOLOGÍA Y CIVIL**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**Estimación de parámetros de compactación y resistencia de  
soporte en suelos de subrasante utilizando redes neuronales  
artificiales supervisadas en la pavimentación de la av.  
Ejército de Andrés Avelino Cáceres <sup>1</sup> Ayacucho, 2021**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTADO POR:  
BACH. JONATHAN JOEL ESCOBAR VENTURA**

**ASESOR:  
MSC. ING. ÁNGEL HUGO VÍLCHEZ PEÑA - <sup>27</sup> UNSCH**

**AYACUCHO - PERÚ**

**2024**





**UNIVERSIDAD**  
NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
**DE HUAMANGA**

Real, Pontificia y Nacional  
1677

<sup>1</sup> Dedico esta Tesis a mis padres Diosdado y Angélica, quienes siempre me han brindado su apoyo incondicional en todo momento de mi vida, por sus enseñanzas, consejos y por su eterna paciencia.

A mis hermanos por el apoyo incondicional y la motivación para la realización de la investigación.

# AGRADECIMIENTOS

---

- ☞ A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, mi alma máter y a los docentes por la enseñanza impartida durante mi vida académica.
- ☞ Al Dr. Ing. Ángel Hugo Vélchez Peña por asesorarme <sup>1</sup> en el desarrollo de la Tesis.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE  
HUAMANGA AYACUCHO, FEBRERO DE 2024

*Jonathan Joel Escobar Ventura*

## índice general

|                                                    | <i>Página</i> |
|----------------------------------------------------|---------------|
| <b>Portada</b>                                     | <b>a</b>      |
| <b>Dedicatoria</b>                                 | <b>I</b>      |
| <b>Agradecimientos</b>                             | <b>II</b>     |
| <b>Índice general</b>                              | <b>III</b>    |
| <b>Índice de figuras</b>                           | <b>VI</b>     |
| <b>Índice de tablas</b>                            | <b>VIII</b>   |
| <b>Lista de siglas y símbolos</b>                  | <b>IX</b>     |
| <b>Glosario</b>                                    | <b>X</b>      |
| <b>Acrónimos</b>                                   | <b>XII</b>    |
| <b>Resumen</b>                                     | <b>XIII</b>   |
| <b>I. Generalidades</b>                            | <b>1</b>      |
| 1.1. Descripción de la realidad problemática ..... | 1             |
| 1.2. Delimitación del problema .....               | 1             |
| 1.2.1. Espacial .....                              | 1             |
| 1.2.2. Temporal .....                              | 2             |
| 1.2.3. Temática y unidad de análisis .....         | 2             |
| 1.2.4. Temática .....                              | 2             |
| 1.2.5. Unidad de análisis .....                    | 2             |
| 1.3. Formulación del problema .....                | 3             |
| 1.3.1. Problema general .....                      | 3             |
| 1.3.2. Problemas específicos .....                 | 3             |
| 1.4. Justificación e importancia .....             | 3             |
| 1.5. Limitaciones o restricciones .....            | 4             |
| 1.6. Objetivos .....                               | 4             |
| 1.6.1. Objetivo general .....                      | 4             |



|             |                                                           |           |
|-------------|-----------------------------------------------------------|-----------|
| 1.6.2.      | Objetivos específicos.....                                | 4         |
| <b>II.</b>  | <b>Estado del Arte</b>                                    | <b>5</b>  |
| 2.1.        | Antecedentes .....                                        | 5         |
| 2.1.1.      | Investigaciones internacionales.....                      | 5         |
| 2.1.2.      | Investigaciones nacionales.....                           | 7         |
| 2.2.        | Agregado del suelo, plasticidad y clasificación.....      | 9         |
| 2.2.1.      | Introducción.....                                         | 9         |
| 2.2.2.      | Límites de tamaño separado de suelos .....                | 9         |
| 2.2.3.      | Consistencia de suelos cohesivos .....                    | 12        |
| 2.2.3.1.    | Límite líquido .....                                      | 12        |
| 2.2.3.2.    | Límite plástico.....                                      | 18        |
| 2.2.3.3.    | Índice de liquidez .....                                  | 20        |
| 2.2.3.4.    | Distribución granulométrica del suelo .....               | 20        |
| 2.2.3.5.    | Relación peso volumen.....                                | 23        |
| 2.2.3.6.    | Densidad relativa y compactación relativa .....           | 30        |
| 2.2.3.7.    | Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) ..... | 31        |
| 2.2.3.8.    | Sistema de clasificación AASHTO.....                      | 34        |
| 2.2.3.9.    | Compactación.....                                         | 38        |
| 2.3.        | Marco conceptual.....                                     | 40        |
| 2.3.1.      | Modelamiento de redes neuronales artificiales .....       | 40        |
| 2.3.1.1.    | Prueba de modelo de productividad y validación.....       | 44        |
| <b>III.</b> | <b>Método de la investigación</b>                         | <b>46</b> |
| 3.1.        | Enfoque.....                                              | 46        |
| 3.2.        | Alcance .....                                             | 46        |
| 3.3.        | Diseño de investigación.....                              | 46        |
| 3.4.        | Población y muestra .....                                 | 46        |
| 3.4.1.      | Población .....                                           | 46        |
| 3.4.2.      | Muestra.....                                              | 47        |
| 3.5.        | Hipótesis .....                                           | 47        |
| 3.5.1.      | Hipótesis general .....                                   | 47        |
| 3.5.2.      | Hipótesis específicas.....                                | 47        |
| 3.6.        | Operacionalización de variables.....                      | 47        |
| 3.6.1.      | Variables e indicadores.....                              | 47        |
| 3.7.        | Técnicas e instrumentos .....                             | 48        |

|                                                                          |            |
|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.7.1. <sup>1</sup> Técnicas .....                                       | 48         |
| 3.7.2. Instrumentos .....                                                | 48         |
| 3.8. Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información ..... | 48         |
| 3.9. Desarrollo de la investigación .....                                | 49         |
| 3.9.1. Simbología de los tipos de suelos según SUCS y AASHTO .....       | 49         |
| 3.9.2. Normalización de datos .....                                      | 50         |
| 3.9.3. Exportación de los datos del WORKSPACE a la nntool .....          | 73         |
| 3.9.4. Creación de la arquitectura de la red neuronal artificial .....   | 74         |
| 3.9.5. <sup>25</sup> Configuración para el entrenamiento de la red ..... | 75         |
| <b>IV. Resultados</b> .....                                              | <b>79</b>  |
| 4.1. Resultados .....                                                    | 79         |
| <b>Conclusiones y Recomendaciones</b> .....                              | <b>96</b>  |
| Conclusiones .....                                                       | 96         |
| Recomendaciones .....                                                    | 96         |
| Temas afines por investigar .....                                        | 96         |
| <b>Referencias Bibliográficas</b> .....                                  | <b>97</b>  |
| <b>A. ANEXO A</b> .....                                                  | <b>100</b> |
| A.1. Imágenes de pruebas de laboratorio para Proctor .....               | 100        |

## Índice de figuras

|     |                                                                                                                         |    |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.  | Consistencia de suelos cohesivos .....                                                                                  | 12 |
| 2.  | Diagrama esquemático del dispositivo de límite líquido. ....                                                            | 13 |
| 3.  | Diagrama esquemático del dispositivo de límite líquido. ....                                                            | 13 |
| 4.  | Contenido de humedad en función del número de golpes. ....                                                              | 14 |
| 5.  | Determinación del límite líquido con la penetración de la caída de cono. ....                                           | 16 |
| 6.  | Gráfica del contenido de humedad versus la penetración del cono para determinación del límite líquido. ....             | 16 |
| 7.  | Límites líquidos y plásticos de la arcilla Cambridge Gault determinados por la prueba del cono de caída. ....           | 19 |
| 8.  | Límites líquidos y de caída .....                                                                                       | 22 |
| 9.  | Relación peso volumen para agregados de suelos masa del suelo para el volumen V y las 3 fases de la masa de suelo ..... | 23 |
| 10. | Relación peso volumen para $V_S = 1$ .....                                                                              | 25 |
| 11. | Relación peso volumen para $V_S = 1$ .....                                                                              | 26 |
| 12. | Relación peso volumen para suelo saturado con $V_s=1$ .....                                                             | 27 |
| 13. | Relación peso volumen para $V=1$ .....                                                                                  | 28 |
| 14. | Relación suelo agua .....                                                                                               | 29 |
| 15. | Peso unitario seco versus humedad óptima.....                                                                           | 39 |
| 16. | Arquitectura de 3 capas de feed forward con algoritmo de aprendizaje de backpropagation.....                            | 43 |
| 17. | Diagrama de flujo para redes neuronales artificiales .....                                                              | 45 |
| 18. | Ingreso de los datos al WORKSPACE .....                                                                                 | 73 |
| 19. | Predicción con redes neuronales artificiales .....                                                                      | 74 |
| 20. | Exportación de los datos del Works pace al nntool de MATLAB .....                                                       | 74 |
| 21. | Creación de la red y arquitectura de datos.....                                                                         | 75 |
| 22. | Configuración de los parámetros de entrenamiento.....                                                                   | 76 |

|                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 23. Validación de la red neuronal para la prueba.....                              | 77  |
| 24. Regresión lineal <sup>25</sup> de los datos de ingreso a la red neuronal ..... | 77  |
| 25. Rendimiento y desempeño de la red .....                                        | 78  |
| 26. Descenso de gradiente y validación por épocas .....                            | 78  |
| <br>                                                                               |     |
| A.1. Ensayos de laboratorio de Proctor. . . . .                                    | 100 |
| A.2. Ensayos de laboratorio de Proctor. . . . .                                    | 101 |
| A.3. Ensayos de laboratorio de Proctor. . . . .                                    | 101 |
| A.4. Ensayos de laboratorio de Proctor. . . . .                                    | 102 |
| A.5. Ensayos de laboratorio de Proctor. . . . .                                    | 103 |
| A.6. Ensayos de laboratorio de Proctor. . . . .                                    | 104 |

## Índice de tablas

|                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Plano de Ubicación y Localización del Distrito de Andrés Avelino Cáceres<br>Dorregaray.....                                           | 2  |
| 2. Límites de tamaño separado de suelos .....                                                                                            | 10 |
| 3. Límites de tamaño separado de suelos .....                                                                                            | 17 |
| 4. Tamices estándar de EE. UU. ....                                                                                                      | 20 |
| 5. Relación de vacíos y peso unitario seco.....                                                                                          | 29 |
| 6. Tabla de plasticidad .....                                                                                                            | 31 |
| 7. Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).....                                                                              | 32 |
| 8. Clasificación de los materiales del subsuelo de las carreteras AASHTO .....                                                           | 36 |
| 9. Variables e Indicadores.....                                                                                                          | 48 |
| 10. Simbología para la normalización e ingreso a la red .....                                                                            | 49 |
| 11. Valores estadísticos de los parámetros de ingreso .....                                                                              | 50 |
| 12. Parámetros o valores ingresados a la red neuronal artificial .....                                                                   | 52 |
| 13. Parámetros o datos normalizados ingresados a la red neuronal artificial .....                                                        | 67 |
| 14. Densidad seca máxima(gr/cm <sup>3</sup> ) y la densidad generada por la Red Neuronal<br>Artificial y el error cuadrático medio ..... | 80 |
| 15. Densidad seca máxima(gr/cm <sup>3</sup> ) y la densidad generada por la Red Neuronal<br>Artificial y el error cuadrático medio.....  | 87 |
| 16. Contenido de humedad óptimo (%) y la densidad generada por la Red Neuronal<br>Artificial y el error cuadrático medio.....            | 87 |
| 17. Resultados del contenido de humedad para las muestras con redes neuronales<br>artificiales y resultados de laboratorio .....         | 95 |

## Lista de siglas y símbolos

---

*SUCS*: Sistema Unificado de clasificación de suelos

*AASHTO*: American Association of State Highway and Transportation Officials

$f_c$ : Resistencia característica a compresión

*G*: Gravel o grava

*S*: Sand o arena

*M*: Silt o limo

*C*: Clay o arcilla

*O*: Suelos orgánicos

*LVDT*: Sensor de Desplazamiento (*Linear variable Differential Transformer*]

*MEF*: Método de Elementos Finitos

*INEI*: Instituto Nacional de Estadística e Informática

*NTP*: Norma Técnica Peruana

ANA: Autoridad Nacional del agua

SENAMHI: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.

FAO: Food and Agriculture Organisation

USGS : United State Geological Survey

NASA: National Aeronautics and Space Administration

SCS: Soil Conservation Service

NRCS: Natural Resources Conservation Service

CN: Curve Number (Número de curva).



## Glosario

---

**Próctor** Ensayos para controlar la compactación de terraplenes y plataformas a través de la densidad máxima seca y el contenido de humedad eliminando los vacíos que se pueden encontrar en la compactación de suelos.

**Compactación** Un suelo adecuadamente compactado puede soportar cargas de manera más efectiva y minimizar la posibilidad de asentamientos diferenciales o fallas estructurales.

**Límites de Atterberg** Los límites Atterberg incluyen tres límites principales como <sup>13</sup>son el límite líquido, el límite plástico y el límite de contracción retracción.

**Límites líquidos** El límite líquido es una medida importante de la plasticidad de un suelo y se utiliza en la clasificación de suelos. Los suelos con un límite líquido alto suelen ser más plásticos y tienden a mostrar cambios significativos en volumen cuando están sometidos a cambios en la humedad. Estos suelos pueden ser problemáticos en la construcción, ya que pueden experimentar asentamientos y deformaciones excesivas bajo cargas.

**Límites plásticos** El límite plástico es una medida de la cohesión del suelo y su capacidad para ser moldeado. Los suelos con un límite plástico más alto son generalmente más cohesivos y tienen una mayor plasticidad. Estos suelos tienden a mantener su forma cuando se moldean y pueden ser susceptibles a la contracción y la expansión cuando se someten a cambios en la humedad.

**Límites de retracción** Cuando un suelo pierde humedad y se seca, tiende a contraerse. La cantidad de contracción y cómo esta contracción se relaciona con la pérdida de humedad se mide utilizando el Límite de Retracción.

**Contenido de humedad óptimo** El contenido de humedad óptimo es un parámetro crítico en la ingeniería geotécnica que influye en la eficiencia y efectividad de la compactación del suelo para proyectos de construcción.

**Densidad seca máxima** La densidad seca máxima es un parámetro crucial para la ingeniería geotécnica y la construcción, ya que influye directamente en la capacidad de carga y estabilidad del suelo en una variedad de proyectos de construcción.

**Granulometría** La granulometría es el estudio de la distribución de los tamaños de las partículas en un material, especialmente en los suelos y los agregados utilizados en la construcción. En otras palabras, se refiere a la descripción de cómo están distribuidas las partículas de diferentes tamaños en una muestra de suelo o agregado

**1 Modelo** Es una representación parcial o simplificada de la realidad que recoge aquellos aspectos de relevancia para las intenciones del modelador, y de la que se pretende extraer conclusiones de tipo predictivo. Se modela para comprender o explicar mejor un proceso o unas observaciones. Un mismo objeto puede ser modelado con distintas técnicas y distintas intenciones, de forma que cada modelo resalta sólo ciertos aspectos del objeto.

**Software** El software es un conjunto de programas, instrucciones y reglas informáticas que permiten ejecutar distintas tareas en una computadora. Se considera que el software es el equipamiento lógico e intangible de un ordenador.

**Desempeño de red** Se refiere a cómo bien o mal la red neuronal realiza la tarea específica para la que fue diseñada. En el contexto del aprendizaje automático y la inteligencia artificial, el desempeño es una medida crítica que evalúa la capacidad de una red neuronal para hacer predicciones precisas o tomar decisiones acertadas en función de los datos de entrada.

**Peso sináptico** Es una medida de la influencia que una neurona tiene sobre otra a través de esta sinapsis. Se relaciona con la cantidad de neurotransmisores liberados en la sinapsis y la sensibilidad de la neurona receptora a esos neurotransmisores. En esencia, representa la fuerza con la que la señal se transmite de una neurona a otra.

## Acrónimos

---

*RELU*: Función de Activación lineal (*RELU*)

*SUCS*: Sistema unificado de clasificación de suelos (*SUC*)

*TAP*: Panel analista de tráfico (*Traffic Analyst Panel*)

*LOD*: Nivel de desarrollo (*Level of Development*)

*FHWA*: Administración Federal de Carreteras (*Federal Highway Administration*)

*CFI*: Intersección de flujo continuo (*Continuous Flow Intersection*)

*GIS*: Sistemas de Información Geográfica (*Geographic Information Systems*)

*ICD*: Instituto de la Construcción y Desarrollo

**1**

*CAPECO*: Cámara Peruana de la Construcción

*BIM 2D*: Modelo en planta

*BIM 3D*: Modelo tridimensional

*BIM 4D*: Modelo tridimensional agregado el factor tiempo

*BIM 5D*: Modelo tridimensional control de costos

*BIM 6D*: Modelo tridimensional sostenibilidad

*BIM 7D*: Modelo tridimensional de gestión de operaciones

*MTC*: Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú

*PVI*: Punto de intersecciones verticales

## Resumen

El objetivo principal de la presente investigación es la estimación de los parámetros del ensayo próctor como son la densidad máxima seca ( $\text{gr/cm}^3$ ) y el contenido de humedad óptimo (%) y el método utilizado en la presente investigación es el modelo de red neuronal artificial de Feed Forward backpropagation para su entrenamiento y validación hasta alcanzar un buen desempeño para la predicción de los datos alcanzando entre un 70 a 80 %, utilizando 3 capas en la arquitectura de datos como son el input data o datos de entrada, Hidden Layer o capas ocultas y la capa de salida o output layer, donde utilizamos en cada capa 3 neuronas artificiales con el error cuadrático medio de 0.053 y una función de activación PURELIN utilizando la herramienta nntools y nrtools de MATLAB llegando a predecir los resultados de los parámetros próctor para la pavimentación de la avenida el Ejército Ayacucho, se utilizó la técnica de análisis documental y como instrumentos registros, y en los resultados finales se obtuvo los valores aproximados a la densidad máxima seca y al contenido de humedad óptima obtenidos del laboratorio en un 70 a 80 % de aproximación descritos en la tabla N° 4.2 y 4.4 de la presente investigación concluyendo que se tuvo un buen desempeño la red neuronal artificial para la predicción de los parámetros próctor.

**PALABRAS CLAVES:** Input Layer, Output layer, Hidden Layer, PURELIN.

## Abstract

The main objective of this research is to estimate the parameters of the Proctor test, such as the maximum dry density ( $\text{g/cm}^3$ ) and the optimal moisture content (%). The method used in this research is the artificial neural network model of Feed Forward backpropagation for its training and validation, aiming to achieve a good performance in data prediction, reaching an accuracy between 70 % and 80 %. This is accomplished by utilizing three layers in the data architecture: input data, hidden layers, and output layer. In each layer, three artificial neurons are used, with a mean squared error of 0.053 and a PURELIN activation function. The nntools and nrtools of MATLAB were employed for implementation. This allowed for the prediction of Proctor test parameter results for the paving of El Ejército Ayacucho Avenue. Documentary analysis was used as the technique, with records serving as the instruments. In the final results, approximate values for maximum dry density and optimal moisture content were obtained, with an accuracy of 70 % to 80 %, in comparison to laboratory data. These approximations are detailed in tables 4.2 and 4.4 of this research. It is concluded that the artificial neural network performed well in predicting the Proctor test parameters.

**KEY WORDS:** Input Layer, Output layer, Hidden Layer, PURELIN.

*"El futuro tiene muchos nombres. Para los débiles es lo inalcanzable. Para los temerosos, lo desconocido. Para los valientes es la oportunidad"*

— Víctor Hugo

## Capítulo



# GENERALIDADES

## 1.1 Descripción de la realidad problemática

En la práctica convencional la medida de la densidad seca y la humedad óptima se realiza en campo utilizando la prueba de cono de arena y en el laboratorio la prueba del próctor standard y modificado estos ensayos nos confirman los valores de estos parámetros de compactación, los problemas de suelos son causados generalmente por la excedencia de agua por ejemplo en las presas de tierra muchas veces es causada por el suministro de las aguas subterráneas y estos problemas geotécnicos podrían suponer pérdida de la resistencia al corte y deformación excesiva del suelo, este último puede ser en aumento (expansión) o disminución (asentamiento) en el espesor o volumen del suelo (Gunaydn, 2008).

El problema que se tiene de obtener los parámetros de compactación son muy laboriosos desde la obtención de las muestras de las calicatas, el tiempo y el costo para obtener los resultados son diversos y aun para poder determinar la resistencia del suelo se necesitan muchas pruebas y muchas muestras es por ello que la presente investigación nos proporciona una estimación temprana para tener idea en que tipo de suelo se va cimentar o en que tipo de suelo se va realizar la construcción de nuestra estructura, y de esta manera optimizar el costo y tiempo para tomar algunas decisiones en la definición de nuestra estructura en la elaboración de los expedientes técnicos.

## 1.2 Delimitación del problema

### 1.2.1 Espacial

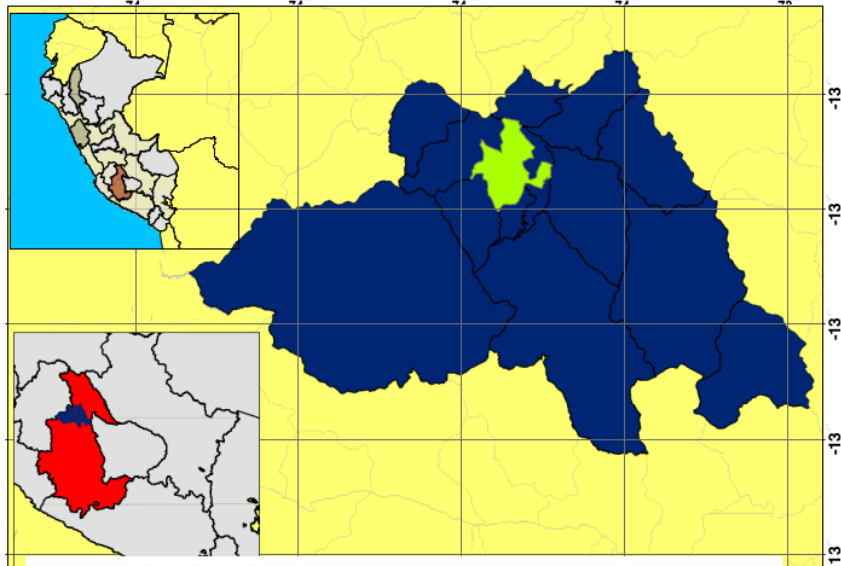
El trabajo se llevará acabo en la región de:

**Departamento:** Ayacucho

**Provincia:** Huamanga

**Distrito:** Andrés Avelino Cáceres Dorregaray

**Fuente:** Elaboración Propia



**Figura N°01:** Plano de Ubicación y Localización del Distrito de Andrés Avelino Cáceres Dorregaray.

### 1.2.2 Temporal

El trabajo se realiza entre el año 2021 al año del 2022 como menciona en el título de la investigación tiempo donde se desarrolló el proyecto para la pavimentación del proyecto en la avenida el ejército del distrito de Andrés Avelino Cáceres Dorregaray donde durante este intervalo de tiempo pondremos en investigación la obtención de los parámetros de resistencia.

### 1.2.3 Temática y unidad de análisis

### 1.2.4 Temática

Obtención de los parámetros de compactación utilizando redes neuronales artificiales

### 1.2.5 Unidad de análisis

La unidad de análisis son los parámetros de resistencia de compactación como el contenido de humedad óptima (%) y la densidad máxima seca (KN/m<sup>3</sup>) obtenidos del ensayo de

laboratorio denominado ensayo de la prueba de próctor standard modificado lo que nos indica en laboratorio el tipo de parámetros de resistencia que va tener la muestra para que posteriormente con este resultado se pueda controlar los trabajos de compactación y obtención de la resistencia del suelo para la subrasante en campo con el ensayo de cono de arena.

1

## 1.3 Formulación del problema

### 1.3.1 Problema general

15 ¿Cómo se pueden estimar los parámetros de compactación en suelos de subrasante utilizando redes neuronales artificiales en la pavimentación de la av. Ejército Ayacucho, 2021?

### 1.3.2 Problemas específicos

15

1. ¿Cómo se puede estimar parámetros de compactación y resistencia de soporte en suelos de subrasante utilizando la granulometría mediante las redes neuronales artificiales en la pavimentación de la Av. Ejército de Andrés Avelino Cáceres Ayacucho, 2021?
2. ¿Cómo se puede estimar parámetros de compactación en suelos de subrasante a partir de los límites de consistencia utilizando redes neuronales artificiales en la pavimentación de la av. Ejército Ayacucho, 2021?
3. ¿Cómo se puede estimar parámetros de compactación en suelos de subrasante a partir de la clasificación de suelos SUCS Y ASSTHO utilizando redes neuronales artificiales en la pavimentación de la av. Ejército Ayacucho, 2021?

## 1.4 Justificación e importancia

5 Los resultados de estimación del contenido de humedad óptima y la densidad máxima seca se lograrán obtener utilizando el modelo de la red neuronal artificial con entradas de los parámetros de suelos como índice de plasticidad, límite líquido, límite plástico, gravas, finos, arenas, clasificación SUCS, clasificación AASHTO y esperando como resultado de salida el contenido de humedad óptima y la densidad máxima seca encontrando el mejor modelo de la arquitectura de la red neuronal artificial en la iteración y en la salida de los mejores resultados obtenidos en el entrenamiento y la validación de datos. Esta investigación es importante porque tendremos estimación temprana de información de contenido de humedad óptima y la densidad máxima seca optimizando en tiempo y costo para la conocer la resistencia de los tipos de suelos donde se realizarán nuestros proyectos de ingeniería.



## **1.5 Limitaciones o restricciones**

---

La limitación que se presenta en la investigación es exclusivamente para la estimación de los parámetros de resistencia como contenido de humedad óptima y densidad máxima seca como resultados del ensayo próctor de laboratorio y no para estimar los parámetros de resistencia de campo ya que la energía de compactación en el laboratorio es diferente a la energía de compactación aplicada en campo ya que en el laboratorio se tiende a utilizar una energía de compactación constante aplicando y contabilizando los números de golpes mientras en campo se utiliza la prueba de cono de arena que es diferente al de los laboratorios.

## **1.6 Objetivos**

---

### **1.6.1 Objetivo general**

---

Determinar los parámetros de compactación en suelos de subrasante utilizando redes neuronales artificiales en en la pavimentación de la av. Ejército Ayacucho, 2021 .

### **1.6.2 Objetivos específicos**

---

1. Estimar parámetros de compactación en suelos de subrasante a partir de la granulométrica utilizando redes neuronales artificiales en la pavimentación de la av. Ejército Ayacucho, 2021
2. Estimar parámetros de compactación en suelos de subrasante a partir de los límites de consistencia utilizando redes neuronales artificiales en la pavimentación de la av. Ejército Ayacucho, 2021
3. Estimar parámetros de compactación en suelos de subrasante a partir de la clasificación de suelos SUCS Y ASSTHO utilizando redes neuronales artificiales en la pavimentación de la av. Ejército Ayacucho, 2021

*“Cuando amamos, siempre nos esforzamos por ser mejores de lo que somos. Cuando nos esforzamos por ser mejor de lo que somos, todo a nuestro alrededor se vuelve mejor”*

— El Alquimista de Paulo Coelho

## Capítulo

# II

## ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Antecedentes

#### 2.1.1 Investigaciones internacionales

Según **López (2010)** en la revista de investigación denominada “Ensayos de compactación en carreteras: Proctor Normal y Modificado”, de la universidad Politécnica de Valencia del departamento de ingeniería e infraestructura de los transportes, menciona que los terraplenes en las obras de carreteras deben tener cierta resistencia mecánica, mediante el proceso de compactación y las propiedades del suelo deberían mejorar; donde los objetivos son determinar la curva de compactación para calcular los parámetros de próctor, donde los resultados son la obtención de la densidad máxima seca ( $\text{gr/cm}^3$ ) y el contenido de humedad óptimo (%).

Según **othman (2023)**, en la revista científica “Estimation of the compaction parameters of aggregate base course using artificial neural networks”, de la universidad de Toronto del departamento de Ingeniería Civil, aplicado en pavimentos de asfalto rural y urbano en Egipto, cuenta con 22 publicaciones de investigación en su investigación, menciona que hay que invertir dinero y tiempo en un trabajo laborioso en laboratorio como son los

ensayos de próctor, por lo que la herramienta de las redes neuronales artificiales nos ayuda a predecir los resultados de la densidad máxima seca y el contenido de humedad óptimo y la metodología a utilizar la recolección de datos del laboratorio para la realización de la red neuronal, y concluye que el ensayo es para predecir si los agregados están óptimos para la compactación.

Según la investigación de Gunaydin (2008) los parámetros de compactación solo puede definirse experimentalmente por el ensayo de laboratorio próctor pero las redes neuronales artificiales pueden estimar estos resultados, por ejemplo la colección de datos en una presa de Nidge Turkia donde se utilizaron la estimación de los parámetros de compactación con un análisis de regresión y redes neuronales artificiales donde la estimación indica una fuerte correlación de  $r^2 = 0,70 - 0,95$  entre los parámetros de compactación y las propiedades de clasificación de suelos se han mostrado satisfactoriamente con los resultados de las pruebas y es recomendable el proposito de la correlación y es utilizado para diseños preliminares de proyectos donde se tienen limitaciones de presupuesto y de tiempo.

Según la investigación de Ardakani y Kordnaej (2017) los resultados del ensayo Proctor son muy importantes para la ingeniería geotécnica y las estructuras de tierra Como el ensayo Proctor es relativamente largo y laborioso, en la presente investigación el Método de Grupo de Datos (GMDH) para estimar parámetros de compactación como densidad seca máxima y contenido de humedad óptima de los suelos indirectamente a partir de propiedades de forma más sencilla, como el límite líquido (LL), el límite plástico (PL) y el contenido de grano fino (FC) Se utilizó una base de datos con 212 conjuntos de datos para el entrenamiento y la prueba de los modelos. Se realizó una comparación Los resultados demuestran que la red neuronal generalizada de tipo GMDH tiene una gran capacidad de predicción de los parámetros densidad seca máxima y humedad óptima final, se ha llevado a cabo un análisis de sensibilidad del modelo obtenido para estudiar la influencia de los parámetros de entrada en los resultados del modelo es importante utilizar algoritmos genéticos y redes neuronales artificiales para que la red aprenda y generalize el modelo.

Según la investigación de (AI-Khafaji, 2015) en suelos de Iraq y EE.UU la relación entre los límites de Atterberg (límite plástico y limite líquido) y compactación de suelos medido por el uso de la prueba de compactación de próctor standar son determinados cuantitativamente usando técnicas de curvas de ajustes estimando estadísticamente la relación entre estos parámetros.

En el CBR(California bearing ratio) la ingeniería siempre viene con dificultades en obtener

valores representativos de CBR esto es uno de los frecuentes índices de uso de pruebas para evaluar el módulo de rigidez y resistencia al corte del subsuelo, El BCR es en realidad una medida indirecta que indica la comparación de la resistencia del material de la subrasante con la resistencia de la roca triturada estándar mencionada en valores porcentuales. Muchos investigadores han llevado a cabo estudios para mostrar el efecto de los tipos y características del suelo sobre los valores de CBR. Algunos esfuerzos se dedicaron a correlacionar el CBR con la distribución del grano del suelo y la plasticidad. Entre ellos, Black desarrolló una correlación entre el CBR y el índice de plasticidad (IP) para suelos cohesivos (Taskiran, 2010).

El coeficiente de carga de California (CBR) se define como la relación entre la resistencia al hundimiento del pistón de penetración en el suelo con una velocidad de 1,27 mm/min (0,05 pulg./min) y la resistencia que muestra una muestra de roca triturada estándar para la misma profundidad de penetración. La resistencia CBR, definida como la relación entre la tensión aplicada (unidad de fuerza), de acuerdo con una energía específica del suelo comprimido en un contenido de humedad predeterminado en el control de velocidad para hundir el pistón de penetración para alcanzar la profundidad requerida, la tensión estándar aplicada, en el experimento mediante el uso de la lista de roca triturada para que el pistón llegue a la misma profundidad. La prueba del coeficiente de rodamiento de California puede realizarse tanto en el laboratorio como en el campo. El ensayo CBR de laboratorio se describe en la norma ASTM D 1883-99 (2003) y el ensayo CBR de campo se describe en la norma ASTM D 4429-93 (2003). En el laboratorio, la prueba CBR se realiza normalmente en muestras de suelo compactado, mientras que en el campo la prueba CBR se realizaría en la superficie del suelo, o en una superficie nivelada excavada en un pozo de prueba, zanja o corte de excavadora (Yildirim y Gunaydin, 2011)

$$CBR = (\text{Tensión aplicada en el experimento (carga)} / \text{tensión estándar (carga)}) * 100$$

### 2.1.2 Investigaciones nacionales

Según Mondragón y Chávez (2017) en la revista científica del docente de la Universidad Nacional de Cajamarca denominada “Influencia de la energía de compactación en la densidad seca máxima y contenido óptimo de humedad de suelo granular”, nos menciona la importancia de la energía de compactación para el incremento de los parámetros de compactación y el método que utilizó se obtuvo muestra representativa granular en estado suelto donde se realizó los ensayos generales para determinar las propiedades físicas, concluyendo que los valores de densidad máxima seca y contenido de humedad aumentan en función a que la energía de compactación aumenta.

Según Llique y Guerrero (2015), en la revista científica denominada “Influencia de la humedad de compactación en el comportamiento volumétrico de los suelos arcillosos” de la Universidad de Trujillo Perú, La presente investigación tuvo como propósito determinar la influencia de la humedad de compactación en el comportamiento volumétrico de los suelos arcillosos, y el método empleado para la presente investigación, se excavaron calicatas de profundidad de 2m y se obtuvo muestras representativas, se realizaron ensayos de granulometría, límites de Atterberg y se realizaron los ensayos especiales de proctor, para el análisis estadístico se utilizó Minitab15, concluyendo que los suelos arcillosos de alta plasticidad CH y de baja plasticidad CL compactados con humedades menores a la humedad óptima (rama seca de la curva de compactación) presentaron mayor expansión que los suelos arcillosos de alta plasticidad CH y de baja plasticidad CL compactados con humedades mayores a la humedad óptima (rama húmeda de la curva de compactación), porque el suelo con humedad menor a la óptima presenta mayor volumen de fase gaseosa y por ende mayor porcentaje de porosidad.

Según Vázquez et al. (2018), en la revista denominada “El uso del test de proctor para la reducción de la compactación del suelo” de la universidad Nacional. El objetivo de este trabajo fue evaluar la posibilidad de predecir el nivel de compactación que producen diferentes condiciones de tráfico agrícola, variando el número de impactos del test de Proctor. Se tomaron muestras de suelo de las huellas de tres tractores de diferentes pesos a cuatro contenidos diferentes de humedad del suelo. En el mismo sitio se realizó el test de Proctor con 15, 25 y 35 golpes de pistón, con cinco contenidos de agua. Se trazaron las diferentes curvas de compactación del suelo, despejando los valores de máxima densidad aparente y contenido de humedad crítico para cada curva y el método de cálculo para la obtención de la curva del test de Proctor estándar (ASTM, 1992), se tomaron 45 muestras de suelo del sitio del ensayo, de aproximadamente 2,5 kg. Estas fueron secadas al aire para luego humedecerlas pulverizándolas con agua en bolsas de plástico con el fin de alcanzar cinco contenidos de agua diferentes. Las muestras permanecieron en bolsas durante 24 hs para homogeneizar el contenido de humedad. Cada muestra se compactó en tres capas superpuestas 225 en una cámara de compactación  $0,911 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ . Cada capa recibió 25 golpes de un pistón de 2,5 kg cayendo desde 0,305 m de altura. La energía de compactación fue de  $593,7 \text{ kJm}^{-3}$  y se determinó el peso húmedo del suelo compactado en la cámara. Luego, las muestras se secaron en un horno a  $105^\circ\text{C}$  hasta peso constante para estimar el contenido de humedad y la densidad aparente seca. El mismo procedimiento se repitió para 15 y 35 golpes de pistón por capa para obtener dos curvas de compactación por encima y



por debajo de la del test de Proctor. Los resultados muestran que variando la energía de compactación Proctor con el número de golpes, los valores de densidad aparente máxima se encontraban muy por encima de los valores de densidad aparente medidos a campo bajo tráfico agrícola, por lo que la modificación del número de golpes del test de Proctor no permite predecir la compactación generada por el tráfico agrícola. Por otra parte, la humedad crítica Proctor se encontró en torno al 60 % de la humedad crítica de las curvas de compactación a campo.

## 2.2 Agregado del suelo, plasticidad y clasificación

### 2.2.1 Introducción

Los suelos son agregados de partículas minerales y junto con el aire y/o agua y los espacios vacíos estos forman las tres fases del sistema y es una porción de la superficie de la tierra está cubierta por suelo y estos son utilizados como cimentación en las construcciones. La mecánica de suelos es la rama de la ingeniería que se ocupa de las propiedades de los suelos y el comportamiento bajo tensión.

### 2.2.2 Límites de tamaño separado de suelos

Según Braja Das (2019), naturalmente ocurre en muestras de suelos que tienen partículas de varios tamaños, a lo largo de años, varios organismos han intentado desarrollar los límites de tamaño de la grava, arena, limo y arcilla, y algunos de estos límites de tamaños son mostrados en la siguiente tabla: y es importante notar que alguna agencia clasifican a la arcilla de pequeñas partículas inferiores a 0.005 mm en tamaño y otros clasifican estas pequeñas partículas de arcilla inferiores a 0.002 mm en tamaño. Sin embargo, hay que tener en cuenta que las partículas definidas como arcilla en función de su tamaño no son necesariamente minerales, las partículas de arcillas poseen la tendencia para desarrollar la plasticidad cuando mezclado con agua; se trata de minerales arcillosos. La caolinita, la illita, la montmorillonita, vermiculita y clorita son ejemplos de algunos minerales arcillosos.

Tabla N° 01: Límites de tamaño separado de suelos

| Agencia                                                                                                                                                                | Clasificación       | Límite de tamaño(mm) |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------|
| U.S Departamento de Agricultura (USDA)                                                                                                                                 | <sup>17</sup> Grava | >2                   |
|                                                                                                                                                                        | Arena muy gruesa    | 44228.00             |
|                                                                                                                                                                        | Arena gruesa        | 1 - 0.5              |
|                                                                                                                                                                        | Arena media         | 0.5 - 0.25           |
|                                                                                                                                                                        | Arena fina          | 0.25 - 0.1           |
|                                                                                                                                                                        | Arena muy fina      | 0.1 - 0.05           |
|                                                                                                                                                                        | Limo                | 0.05 - 0.02          |
| Sociedad internacional de mecánicas de suelos e ingeniería geotécnica(ISSMGE)                                                                                          | Arcilla             | <0.02                |
|                                                                                                                                                                        | <sup>17</sup> Grava | >2                   |
|                                                                                                                                                                        | Arena gruesa        | 2 - 0.2              |
|                                                                                                                                                                        | Arena fina          | 0.2 - 0.02           |
|                                                                                                                                                                        | Limo                | 0.02 - 0.002         |
| Administración de aviación federal(FAA)                                                                                                                                | Arcilla             | <0.002               |
|                                                                                                                                                                        | <sup>6</sup> Grava  | >2                   |
|                                                                                                                                                                        | Arena               | 2 - 0.075            |
|                                                                                                                                                                        | Limo                | 0.075 - 0.005        |
|                                                                                                                                                                        | Arcilla             | <0.005               |
| Instituto de tecnología MASSACHUSETTS(MIT)                                                                                                                             | <sup>17</sup> Grava | >2                   |
|                                                                                                                                                                        | Arena gruesa        | 2 - 0.6              |
|                                                                                                                                                                        | Arena media         | 0.6 - 0.2            |
|                                                                                                                                                                        | Arena fina          | 0.2 - 0.06           |
|                                                                                                                                                                        | Limo                | 0.06 - 0.002         |
|                                                                                                                                                                        | Arcilla             | <0.002               |
| Asociación Americana de carretera estatal y transporte oficial (AASHTO)                                                                                                | <sup>17</sup> Grava | 76.2 - 2             |
|                                                                                                                                                                        | Arena gruesa        | 2 - 0.425            |
|                                                                                                                                                                        | Arena fina          | 0.425 - 0.075        |
|                                                                                                                                                                        | limo                | 0.075 - 0.002        |
|                                                                                                                                                                        | arcilla             | <0.002               |
| Unificado ( <sup>2</sup> Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU la Oficina de Reclamación de los EE. UU y <sup>2</sup> la sociedad para pruebas y materiales) | Grava               | 76.2 - 4.75          |
|                                                                                                                                                                        | Arena gruesa        | 4.75 - 2             |
|                                                                                                                                                                        | Arena media         | 2 - 0.425            |

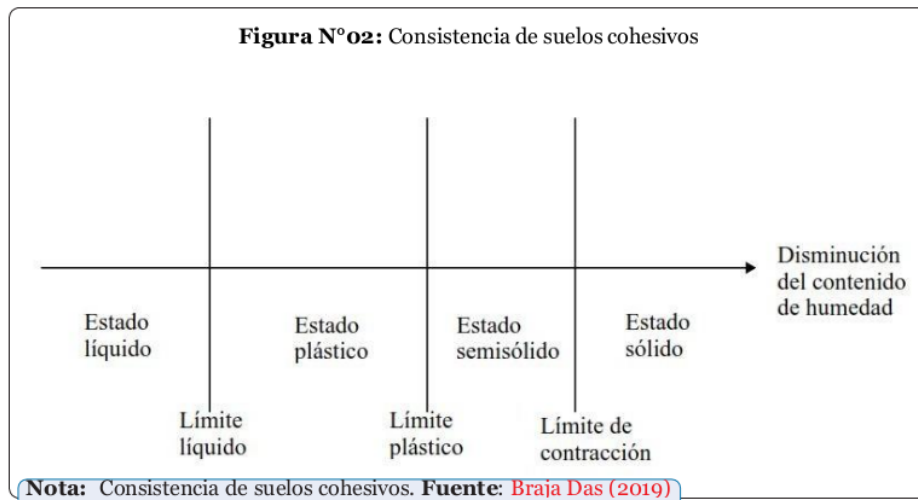


|                          |               |
|--------------------------|---------------|
| Arena fina               | 0.425 - 0.075 |
| limos y arcillas (finos) | <0.075        |

**Fuente:** Elaboración Propia tomado del manuscrito de Mecánica de suelos avanzado de Braja M. DAS

### 2.2.3 Consistencia de suelos cohesivos

La presencia de minerales de arcilla en suelos de granos finos permitirá que se vuelva a moldear en presencia de algo de humedad sin que se desmorone si se seca una papilla de arcilla el contenido de humedad disminuirá gradualmente, y la lechada pasará de estado líquido a un estado plástico. Si se sigue secando, pasará a un estado semisólido y finalmente, al estado sólido, como se muestra en la figura. El científico Sueco Atterberg, desarrolló el método para describir la consistencia de límites de los suelos de granos finos basados en el contenido de humedad, estos límites son el límite líquido, el límite plástico y el límite de contracción el límite líquido es definido en el contenido de humedad en porcentaje cada cambio del suelo desde el estado líquido al estado plástico y el contenido de humedad (%) de cada cambio de suelo desde el plástico al estado semisólido y desde el estado semisólido al estado sólido son definidos en el límite plástico y límite de contracción respectivamente. Estos límites son generalmente referidos a los límites de Atterberg, los límites de Atterberg de suelos cohesivos dependen de varios factores, como la cantidad y el tipo de minerales de arcilla y el tipo de catión adsorbido (Braja Das, 2019).

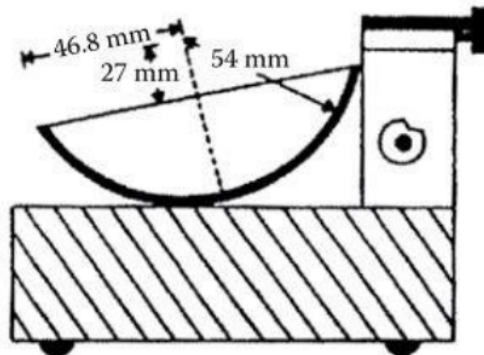


#### 2.2.3.1 Límite líquido

Según Braja Das (2019) El límite líquido de los suelos es generalmente determinado por el dispositivo estándar de Casagrande un diagrama esquemático de los dispositivos de límite líquido es mostrado en la figura Este dispositivo consta de una copa de latón y una base de goma dura, La copa de latón puede caer sobre la base mediante una leve operación por una manivela: la presentación de la prueba del límite líquido hay que colocar una pasta de

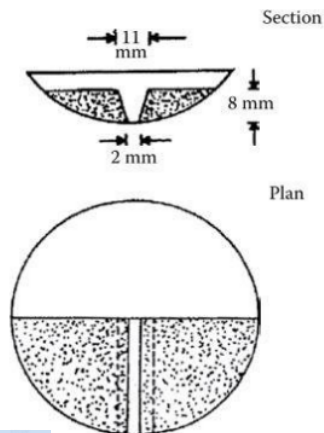
tierra en la taza y a continuación, se corta una ranura en el centro de la placa de suelo con la herramienta de ranurado estándar mediante la leva accionada por la manivela, el vaso se eleva y se deja caer desde una altura de 10 mm.

Figura N°02: Diagrama esquemático del dispositivo de límite líquido.



Nota: Dispositivo de límite líquido. Fuente: Braja Das (2019)

Figura N°03: Diagrama esquemático del dispositivo de límite líquido.



Nota: Dispositivo de límite líquido. Fuente: Braja Das (2019)

Se realizan tres pruebas para el mismo suelo con diferentes contenidos de humedad, con el número de golpes,  $N$ , necesarios para lograr el cierre varía entre 15 y 35. El contenido de humedad del suelo, en porcentaje, y el correspondiente número de golpes. El contenido de humedad del suelo, en porcentaje, y el correspondiente número de golpes se representan

en un papel gráfico semilogarítmico. La relación entre el contenido de humedad y el log N se aproxima como una línea recta. Esta línea se denomina curva de flujo. El contenido de humedad correspondiente a  $N = 25$ , determinado a partir de la curva de flujo, da el límite líquido del suelo. La pendiente de la línea de flujo se define como el índice de flujo y puede escribirse como:

$$I_F = \frac{w_1 - w_2}{\log \frac{N_2}{N_1}} \quad (II.1)$$

donde:

$I_F$  = Índice de flujo

$w_1$  = Contenido de humedad del suelo en porcentaje correspondiente a  $N_1$  golpes.

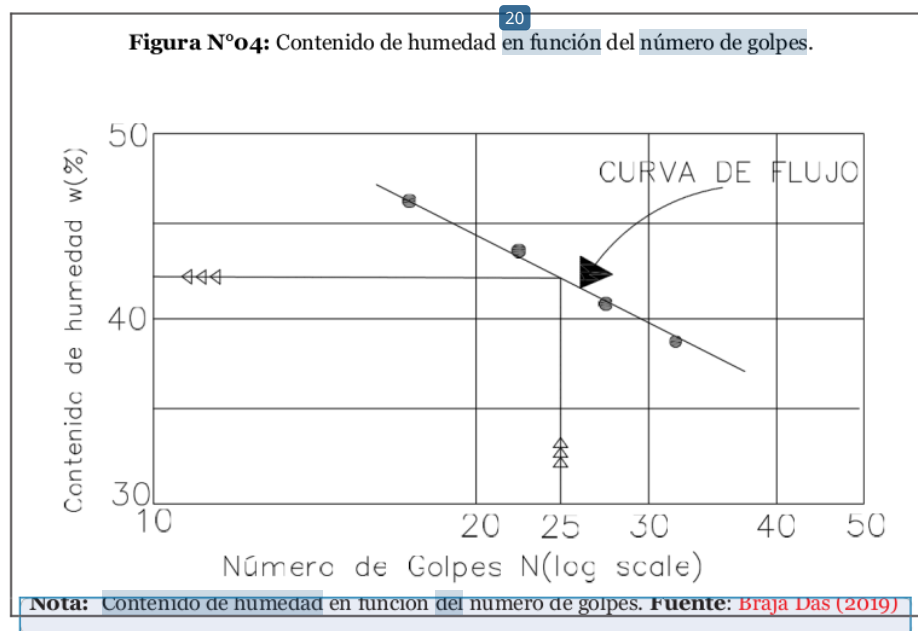
$w_2$  = Contenido de humedad del suelo en porcentaje correspondiente a  $N_2$  golpes.

Nótese que  $w_2$  y  $w_1$  se intercambian para dar un valor positivo, aunque la pendiente de la línea de flujo sea negativa. Así, la ecuación de la línea de flujo puede ser escrita en forma general como:

$$w = -I_F \log N + C \quad (II.2)$$

Donde:

$C$  = Constante.



A partir del análisis de cientos de pruebas de límite de líquidos en 1949, el Cuerpo de

Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, en la Estación Experimental de Vías Navegables de Vicksburg, Mississippi, propuso una ecuación empírica de la forma:

$$LL = w_N \left( \frac{N}{25} \right)^{\tan \beta} \quad (2.3)$$

Donde:

$N$  = es el número de golpes en el dispositivo de límite de líquido para un cierre de ranura de 12,7 mm

$w_N$  = Es la correspondiente al contenido de humedad.

La ecuación 1.17 suele dar buenos resultados para el número de golpes entre 20 y 30. En el caso de los ensayos rutinarios de laboratorio, puede utilizarse para determinar el límite de líquido cuando sólo se realiza un ensayo para un suelo. Este procedimiento se conoce generalmente como el método de un punto y también fue adoptado por ASTM bajo la designación D-4318 (ASTM, 2014). La razón por la que el método de un punto produce resultados bastante buenos es que un pequeño rango de humedad contenido de humedad cuando  $N = 20-30$ .

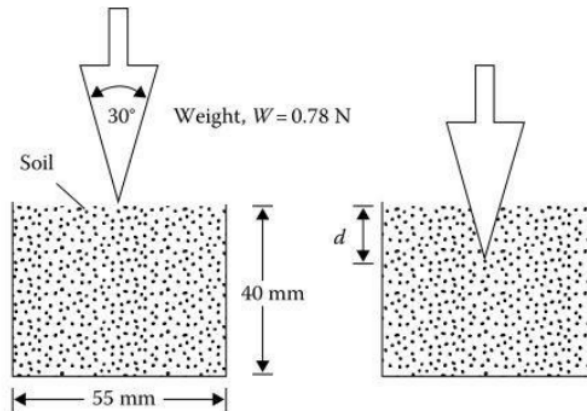
Otro método para determinar el límite líquido, que es popular en Europa y Asia, es el método del cono de caída (British Standard-BS 1377). En este ensayo, el límite líquido se define como el contenido de humedad al que un cono estándar con un ángulo de vértice de  $30^\circ$  y un peso de 0,78 N (80 gf) penetra una distancia  $d = 20$  mm en 5 s cuando se deja caer desde una posición de contacto puntual con la superficie del suelo (Figura 1.26a). Debido a la dificultad de alcanzar el límite líquido en una sola prueba, se pueden realizar cuatro o más ensayos pueden realizarse con distintos contenidos de humedad para determinar la penetración del cono de caída penetración del cono,  $d$ , en 5 s. A continuación se puede trazar un gráfico semilogarítmico con el contenido de humedad  $w$  frente a la penetración del cono  $d$ . El gráfico da como resultado una línea recta. El contenido de humedad correspondiente a  $d = 20$  mm es el límite líquido (Figura 1.26b). A partir de la figura 1.26b, el índice de fluidez puede ser definido como:

$$I_{FC} = \frac{w_2(\%) - w_1(\%)}{\log d_2 - \log d_1} \quad (2.4)$$

donde  $w_1$ ,  $w_2$  son los contenidos de humedad en las penetraciones del cono de  $d_1$  y  $d_2$  respectivamente. Al igual que en el caso del método de la copa de percusión (ASTM D4318), se ha intentado desarrollar la estimación del límite líquido mediante un método de

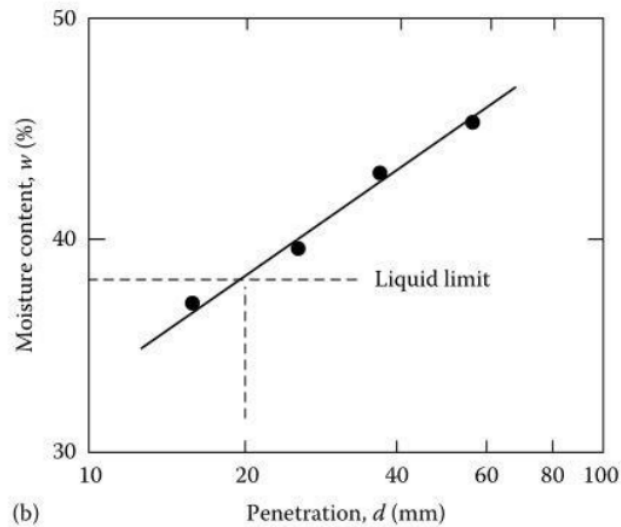
un punto.

**Figura N°05:** Determinación del límite líquido con la penetración de la caída de cono.



**Nota:** límite líquido con la penetración de la caída de cono. **Fuente:** Braja Das (2019)

**Figura N°06:** Gráfica del contenido de humedad versus la penetración del cono para determinación del límite líquido.



**Nota:** Penetración versus contenido de humedad. **Fuente:** Braja Das (2019)

estos son:

☞ **Nagaraj and Jayadeva (1981)**

$$LL = \frac{w}{0,77 \log d} \quad (2.5)$$

$$LL = \frac{w}{0,65 + 0,0175d} \quad (2.6)$$

☞ **Feng (2001)**

$$LL = w \left( \frac{20}{d} \right)^{0.33} \quad (2.7)$$

**Tabla N°02:** Límites de tamaño separado de suelos

| Ciudad                        | Detalles del cono                             | Penetración para el límite líquido |
|-------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------|
| <b>Rusia</b>                  | Ángulo de cono = 30°<br>Masa de cono = 76 gr  | 10                                 |
| <b>Bretaña , Francia</b>      | Ángulo de cono = 30°<br>Masa de cono = 80 gr  | 20                                 |
| <b>India</b>                  | Ángulo de cono = 31°<br>Masa de cono = 148 gr | 20.4                               |
| <b>Suecia, Canada(Québec)</b> | Ángulo de cono = 60°<br>Masa de cono = 60 gr  | 10                                 |

**Fuente:** Elaboración Propia tomado del manuscrito de Mecánica de suelos avanzado de Braja M. DAS

donde  $w$  ( %) es <sup>2</sup> el contenido de humedad para una penetración del cono  $d$  (mm) comprendida entre 15 mm y 25 mm. Las dimensiones del ángulo de la punta del cono, el peso del cono y la penetración (mm) a la que se determina el límite de líquido varían de un país a otro. país. La tabla 1.3 ofrece un resumen de los diferentes conos de caída utilizados en varios países. Varios estudios importantes han demostrado que la resistencia al corte no drenado del suelo en el límite líquido varía entre 1,7 y 2,3 kN/m<sup>2</sup>. Basándose en pruebas realizadas en un gran número de muestras de suelo, Feng (2001) ha dado la siguiente correlación entre los límites líquidos determinados según ASTM D4318 y la norma británica.

$$LL_{(BS)} = 2,6 + 0,94[LL_{(ASTM)}] \quad (2.8)$$

### 2.2.3.2 Límite plástico

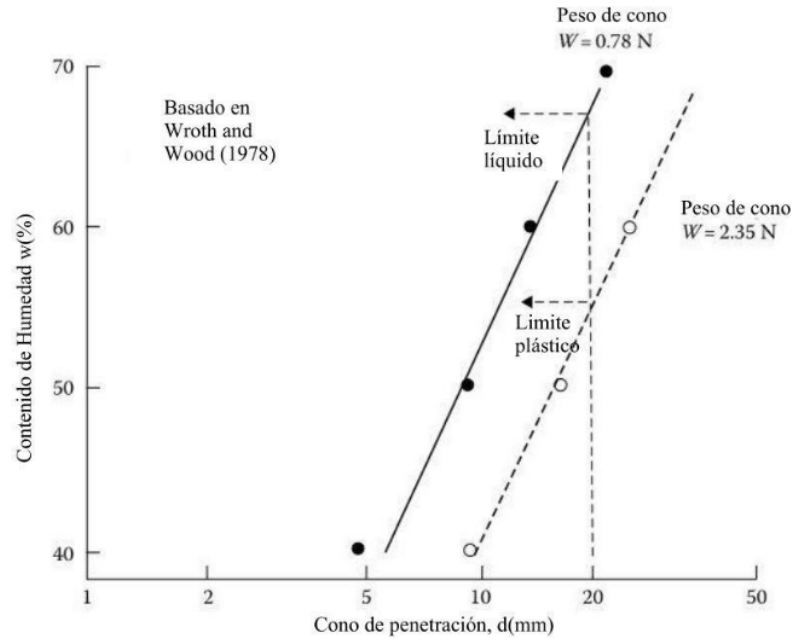


Según Braja Das (2019)<sup>13</sup> el límite plástico se define como el contenido de humedad, en porcentaje, al que el suelo se desmorona cuando se enrolla en hilos de 3,2 mm de diámetro. El límite plástico es el límite inferior de la fase plástica del suelo. La prueba del límite plástico es sencilla y se realiza haciendo rodar manualmente una masa de suelo de tamaño elipsoidal sobre una placa de vidrio esmerilado. El procedimiento para la prueba del límite plástico es el siguiente Designación de prueba ASTM D-4318 (ASTM, 2014).

Como en el caso de la determinación del límite líquido, el método del cono de caída puede ser para obtener el límite plástico. Esto se puede conseguir utilizando un cono de geometría similar, pero con una masa de 2,35 N (240 gf). Se realizan de tres a cuatro pruebas con diferentes contenidos de humedad del suelo y se determinan las correspondientes penetraciones "d" del cono.

El contenido de humedad correspondiente a una penetración de cono de arena de  $d = 20$  mm es el límite plástico. La figura 1.27 muestra el límite líquido y el límite plástico determinados por el ensayo de cono de caída para la arcilla Cambridge Gault reportado por Wroth y Wood (1978).

**Figura N°07:** Límites líquidos y plásticos de la arcilla Cambridge Gault determinados por la prueba del cono de caída.



**Nota:** Contenido de humedad versus cono de penetración. **Fuente:** Braja Das (2019)

La diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de los suelos es definido por el índice de plasticidad (IP).

$$IP = LL - LP \quad (2.9)$$

donde:

LL= Límite líquido

LP= Límite plástico

Sridharan et al. (1999) mostraron que el índice de plasticidad puede correlacionarse con el índice de fluidez obtenido en los ensayos de límite líquido. Según su estudio.

$$IP(\%) = 4,12I_F(\%) \quad (2.10)$$

$$IP(\%) = 0,74I_{FC}(\%) \quad (2.11)$$

### 2.2.3.3 Índice de liquidez

La consistencia relativa de un suelo cohesivo puede definirse mediante una relación denominada el índice de liquidez (IL). Se define como:

$$IL = \frac{w_N - LP}{LL - LP} = \frac{w_N - LP}{IP} \quad (2.12)$$

Donde  $w_N$  es el contenido de humedad natural. De la ecuación 2.12 se desprende que, si  $w_N = LL$ , el índice de liquidez es igual a 1. De nuevo, si  $w_N = LP$ , el índice de liquidez es igual a 0. Así, para un depósito natural de suelo que se encuentra en estado plástico (es decir,  $LL \geq w_N \geq LP$ ), el valor del índice de liquidez varía entre 1 y 0. Un depósito natural con  $w_N \geq LL$  tendrá un índice de liquidez superior a 1. En un estado inalterado, estos suelos pueden ser estables; Sin embargo, un choque repentino puede transformarlos en un estado líquido. Estos suelos se denominan arcillas sensibles.

### 2.2.3.4 Distribución granulométrica del suelo

Para una comprensión básica de la naturaleza del suelo, es necesario conocer la distribución del tamaño del grano presente en una masa de suelo determinada. La distribución granulométrica de los suelos de grano grueso (grava y/o arena) se determina mediante el análisis granulométrico. La tabla 1.5 indica el tamaño de apertura de algunos tamices de estados unidos (Braja Das, 2019).

El porcentaje acumulado en peso de un suelo que pasa un tamiz determinado se denomina porcentaje de finura. La Tabla 2.3 muestra los resultados de un análisis granulométrico para un suelo arenoso. La distribución granulométrica puede utilizarse para determinar algunos de los parámetros básicos del suelo, como el tamaño efectivo, el coeficiente de uniformidad y el coeficiente de gradación (Braja Das, 2019).

El tamaño efectivo de un suelo es el diámetro por el que pasa el 10 % de la masa total del suelo y se denomina  $D_{10}$ . El coeficiente de uniformidad  $C_u$  se define como:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.13)$$

donde  $D_{60}$  es el diámetro por el que pasa el 60 % de la masa total del suelo.

**Tabla N°03:** Tamices estándar de EE. UU.

| Tamiz N° | Tamaño de apertura(mm) |
|----------|------------------------|
| 3        | 6.35                   |
| 4        | 4.75                   |
| 6        | 3.36                   |
| 8        | 2.38                   |
| 10       | 2                      |
| 16       | 1.19                   |
| 20       | 0.84                   |
| 30       | 0.59                   |
| 40       | 0.425                  |
| 50       | 0.297                  |
| 60       | 0.25                   |
| 70       | 0.21                   |
| 100      | 0.149                  |
| 140      | 0.105                  |
| 200      | 0.075                  |
| 270      | 0.053                  |

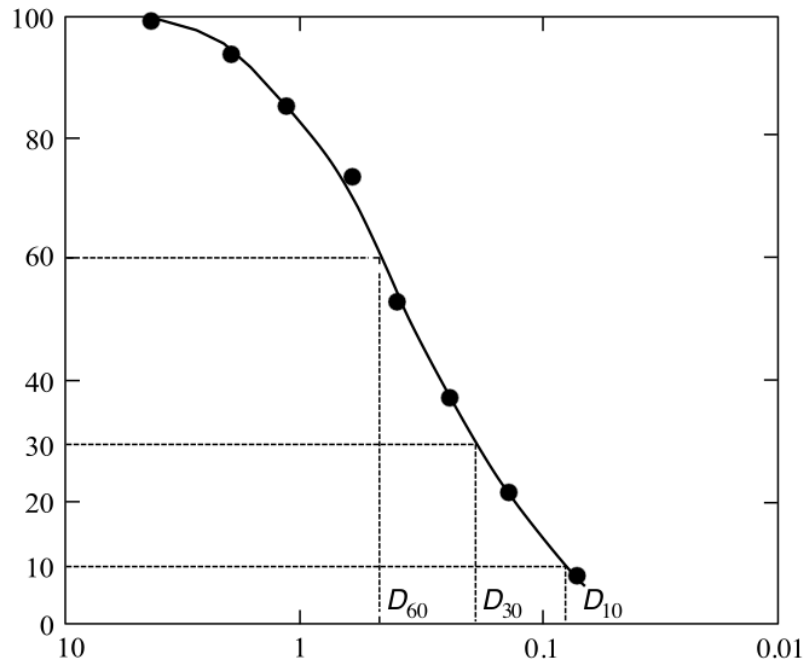
**Fuente:** Elaboración Propia tomado del manuscrito de Mecánica de suelos avanzado de Braja M. DAS

El coeficiente de gradación  $C_c$  se define como:

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{60})(D_{10})} \quad (2.14)$$

donde  $D_{30}$  es el diámetro por el que pasa el 30 % de la masa total del suelo.

Figura N°08: Límites líquidos y de



**Nota:** Límites líquidos y de caída. **Fuente:** Braja Das (2019)

Según Braja Das (2019) Un suelo se denomina bien graduado si la distribución de los tamaños de grano se extiende en un rango bastante amplio. En ese caso, el valor del coeficiente de uniformidad es grande. En general, se considera que un suelo está bien graduado si  $C_u$  es mayor que 4-6 y  $C_c$  está entre 1 y 3. Cuando la mayoría de los granos en una masa de suelo tienen aproximadamente el mismo tamaño, es decir,  $C_u$  está cerca de 1, el suelo se denomina de baja gradación. Un suelo puede tener una combinación de dos o más fracciones de suelo bien graduado, y este tipo de suelo se denomina suelo de grado medio.

La técnica de análisis granulométrico descrita anteriormente es aplicable a los granos de suelo de tamaño superior al n° 200 (0,075 mm). Para los suelos de grano fino, el procedimiento utilizado para la determinación de la distribución granulométrica es el análisis hidrométrico. Se basa en el principio de la sedimentación de los granos del suelo.

#### 2.2.3.5 Relación peso volumen

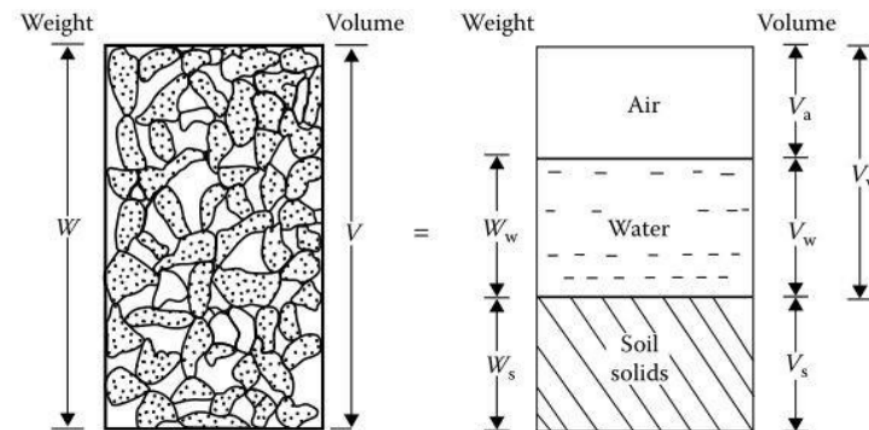
muestra una masa de suelo que tiene un volumen total  $V$  y un peso total  $W$ . Para desarrollar las relaciones peso volumen, las tres fases de la masa de suelo es decir, los sólidos del suelo, el aire y el agua, se han separado en la figura 9.

$$W = W_s + W_w \quad (2.15)$$

$$V = V_s + V_w + V_a \quad (2.16)$$

$$V_v = V_w + V_a \quad (2.17)$$

**Figura N°09:** Relación peso volumen para agregados de suelos masa del suelo para el volumen  $V$  y las 3 fases de la masa de suelo



**Nota:** Grafico de relacion de vacios. **Fuente:** Braja Das (2019)

donde  $W_s$  = peso de los sólidos del suelo

$W_w$  = peso del agua

$V_s$  = volumen de los sólidos del suelo

$V_w$  = volumen de agua

$V_a$  = volumen de aire

The weight of air is assumed to be zero. The volume relations commonly used in soil mechanics are void ratio, porosity, and degree of saturation. La relación de vacíos se define

como la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de los sólidos:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2.18)$$

La porosidad  $n$  se define como la relación entre el volumen de huecos y el volumen total:

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (2.19)$$

Además:  $V = V_s + V_v$

$$n = \frac{V_v}{V_s + V_v} = \frac{\left(\frac{V_v}{V_s}\right)}{\left(\frac{V_s}{V_s}\right) + \left(\frac{V_v}{V_s}\right)} = \frac{e}{1 + e} \quad (2.20)$$

El grado de saturación  $S_r$  es la relación entre el volumen de agua y el volumen de vacíos y se expresa generalmente en porcentaje:

$$S_r(\%) = \frac{V_w}{V_v} (100) \quad (2.21)$$

Las relaciones de peso utilizadas son el contenido de humedad y el peso unitario. La humedad  $w$  se define como la relación entre el peso del agua y el peso de los sólidos del suelo, generalmente expresado en porcentaje:

$$w(\%) = \frac{W_w}{W_s} (100) \quad (2.22)$$

El peso unitario es la relación entre el peso total y el volumen total del suelo agregado:

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (2.23)$$

A veces se denomina peso unitario húmedo, ya que incluye el peso del agua y de los sólidos del suelo. Si todo el espacio vacío está lleno de agua (es decir,  $V_a = 0$ ), se trata de un suelo saturado; la ecuación 2.23 nos dará entonces el peso unitario saturado  $\gamma_{sat}$ .

El peso unitario seco  $\gamma_d$  se define como la relación entre el peso de los sólidos del suelo o el volumen total:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (2.24)$$

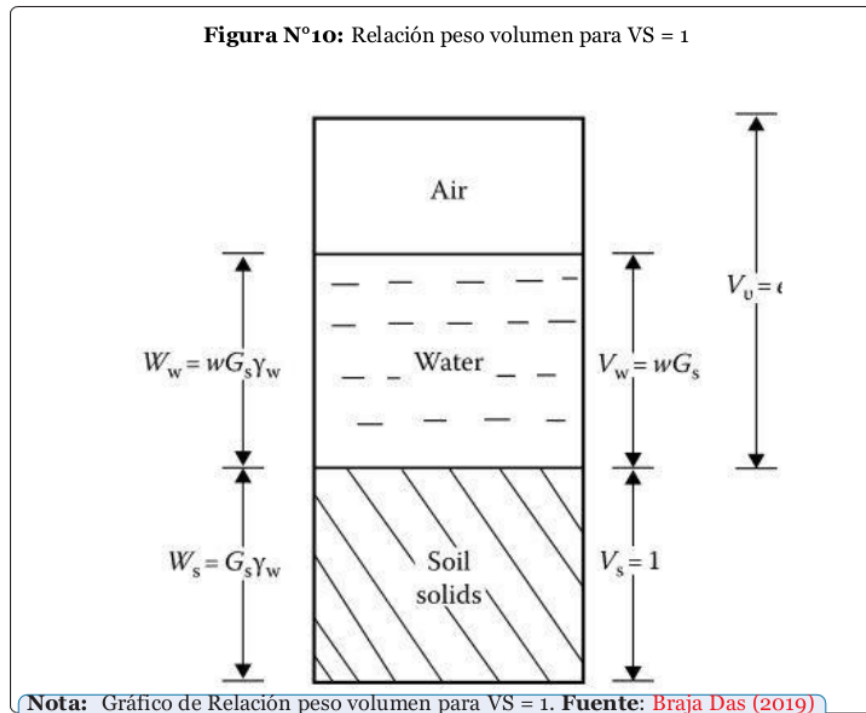
Las relaciones peso-volumen útiles pueden desarrollarse considerando una masa de suelo en el que el volumen de los sólidos del suelo es la unidad, como se muestra en la figura 10. Dado que  $V_s = 1$ , a partir de la definición de relación de vacíos dada en la Ecuación 2.18, el volumen de vacíos es igual a la relación de vacíos  $e$ . El peso de los sólidos del suelo puede ser dado por:  $W_s = G_s \gamma_w V_s = G_s \gamma_w$  Ya que  $V_s = 1$



donde:

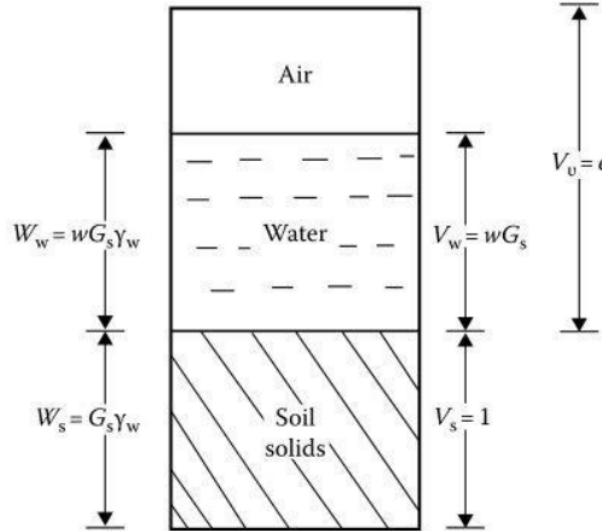
<sup>2</sup>  
 $G_s$  es el peso específico de los sólidos del suelo  $\gamma_w$  es el peso unitario del agua (9,81 kN/m<sup>3</sup>)

<sup>21</sup>  
De la ecuación 2.28, el peso del agua es  $W_w = wW_s = wG_sV_w$ . Por lo tanto, el peso unitario de la humedad es.



**Nota:** Gráfico de Relación peso volumen para  $V_s = 1$ . **Fuente:** Braja Das (2019)

**Figura N° 11:** Relación peso volumen para  $V_s = 1$



**Nota:** Relación peso volumen para  $V_s = 1$ . **Fuente:** Braja Das (2019)

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_v} = \frac{G_s \gamma_w + wG_s \gamma_w}{1 + e} = \frac{G_s \gamma_w (1 + w)}{1 + e} \quad (2.25)$$

El peso unitario seco también puede determinarse a partir de la figura 10 como

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e} \quad (2.26)$$

El grado de saturación puede venir dado por

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{\frac{W_w}{\gamma_w}}{\frac{W_s}{\gamma_w}} = \frac{\frac{wG_s \gamma_w}{\gamma_w}}{\frac{G_s \gamma_w}{\gamma_w}} = \frac{wG_s}{G_s} = w \quad (2.27)$$

Para suelos saturados,  $S_r = 1$ . Así, a partir de la ecuación 2.27

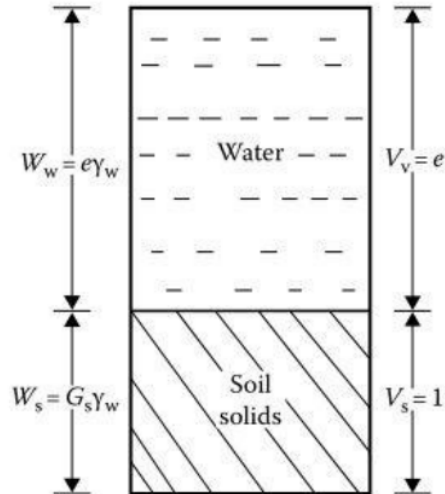
$$e = wG_s \quad (2.28)$$

Si nos referimos a la figura 11, la relación del peso unitario de un suelo saturado puede obtenerse como

$$\gamma_{sat} = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{G_s \gamma_w + e \gamma_w}{1 + e} \quad (2.29)$$

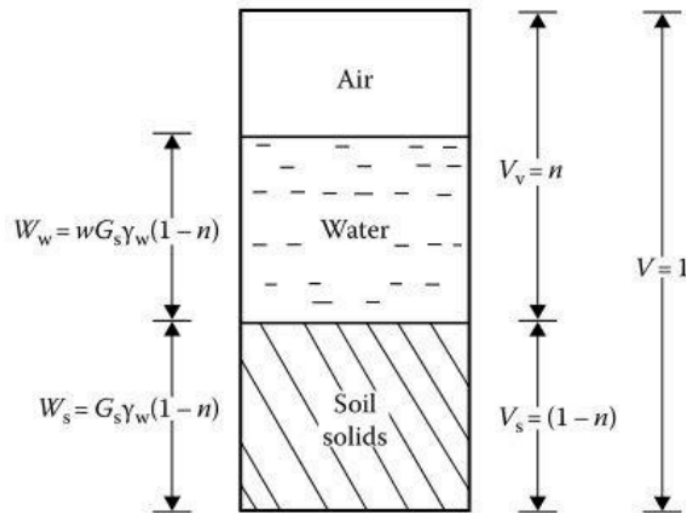
Las relaciones básicas para el peso unitario, como las ecuaciones 2.23, 2.24 y 2.25 en términos de porosidad  $n$  también pueden derivarse considerando una masa de suelo que tiene un volumen total de la unidad como se muestra en la Figura 11. En este caso (para  $V = 1$ ), a partir de la Ecuación 2.19,  $V_o = n$ . Así,  $V_s = V - V_o = 1 - n$

**Figura N°12:** Relación peso volumen para suelo saturado con  $V_s=1$



**Nota:** Relacion peso volumen para suelo saturado con  $V_s=1$ . **Fuente:** Braja Das (2019)

**Figura N°13:** Relación peso volumen para  $V=1$



**Nota:** Relación peso volumen para  $V=1$ . **Fuente:** Braja Das (2019)

19

El peso de los sólidos del suelo es igual a  $(1 - n)G_s\gamma_w$ , y el peso del agua  $W_w = wW_s = w(1 - n)G_s\gamma_w$ . Por lo tanto, el peso unitario húmedo es

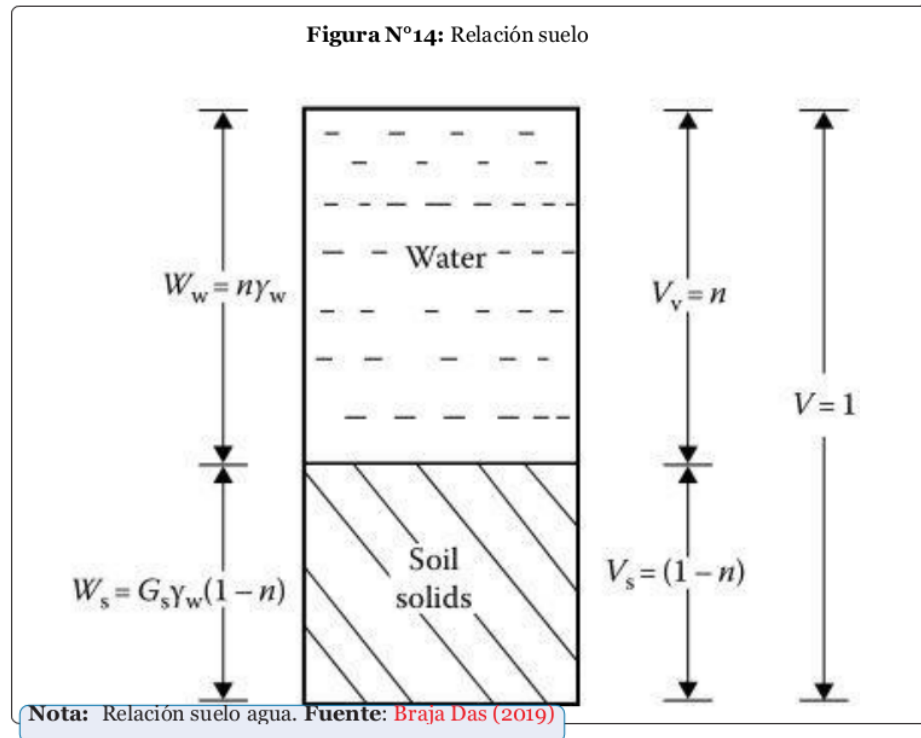
$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{(1-n)G_s\gamma_w + w(1-n)G_s\gamma_w}{1} \quad (2.30)$$

$$\gamma = G_s\gamma_w(1 - n)(1 + w)$$

2

El peso unitario seco es

Si el suelo está saturado



**Tabla N°04:** Relación de vacíos y peso unitario seco.

| 16<br>Tipo de suelo      | Relación de vacío e |        | Pesos unitario seco, Yd |                |
|--------------------------|---------------------|--------|-------------------------|----------------|
|                          | Máximo              | Mínimo | Mínimo (KN/m3)          | Máximo (KN/m3) |
| 16<br>Grava              | 0.6                 | 0.3    | 16                      | 20             |
| Arena gruesa             | 0.75                | 0.35   | 15                      | 19             |
| Arena fina               | 0.85                | 0.4    | 14                      | 19             |
| Arena estándar de Ottawa | 0.8                 | 0.5    | 14                      | 17             |
| Grava arenoso            | 0.7                 | 0.2    | 15                      | 22             |
| Limo arenoso             | 1                   | 0.4    | 13                      | 19             |
| Limo arenoso y grava     | 0.85                | 0.15   | 14                      | 23             |

**Fuente:** Elaboración Propia tomado del manuscrito de Mecánica de suelos avanzado de Braja M. DAS

#### 2.2.3.6 Densidad relativa y compactación relativa

La densidad relativa en términos generales se usa para describir el grado de compactación de los suelos de grano grueso. La densidad relativa  $D_r$  es definido como:

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (2.32)$$

donde:

$e_{\max}$  es el índice de vacío máximo posible

$e_{\min}$  es el índice de vacío mínimo posible

$e$  es el índice de vacío en el estado natural del suelo

La ecuación 2.32 además puede expresarse en términos del peso unitario seco del suelo:

$$\gamma_d(\max) = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e_{\min}} \quad \text{o} \quad e_{\min} = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d(\max)} - 1 \quad (2.33)$$

similarmente:

$$e_{\max} = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d(\min)} - 1 \quad (2.34)$$

$$e = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1 \quad (2.35)$$

donde  $\gamma_d(\max)$ ,  $\gamma_d(\min)$  y  $\gamma_d$  son los pesos unitarios máximos, mínimos y en estado natural del suelo. La sustitución de las ecuaciones 2.33 a 2.35 en la ecuación 2.32 da como resultado

$$D_r = \left[ \frac{\gamma_d(\max)}{\gamma_d} \right] \left[ \frac{\gamma_d - \gamma_d(\min)}{\gamma_d(\max) - \gamma_d(\min)} \right] \quad (2.36)$$

Según Braja Das (2019) La densidad relativa se expresa generalmente en porcentaje. Ha sido utilizada por varios investigadores para correlacionar el ángulo de fricción del suelo, el potencial de licuefacción del suelo, etc. Otro término utilizado ocasionalmente en relación con el grado de compactación de suelos de grano grueso es la compactación relativa,  $R_c$ , que se define como:

$$R_c = \frac{\gamma_d}{\gamma_d(\max)} \quad (2.37)$$

$$R_c = \frac{R_0}{1 - D_r(1 - R_0)}$$

donde  $R_0 = \frac{\gamma_d(\min)}{\gamma_d(\max)}$  Lee y Singh (1971) revisaron 47 suelos diferentes y dieron la relación

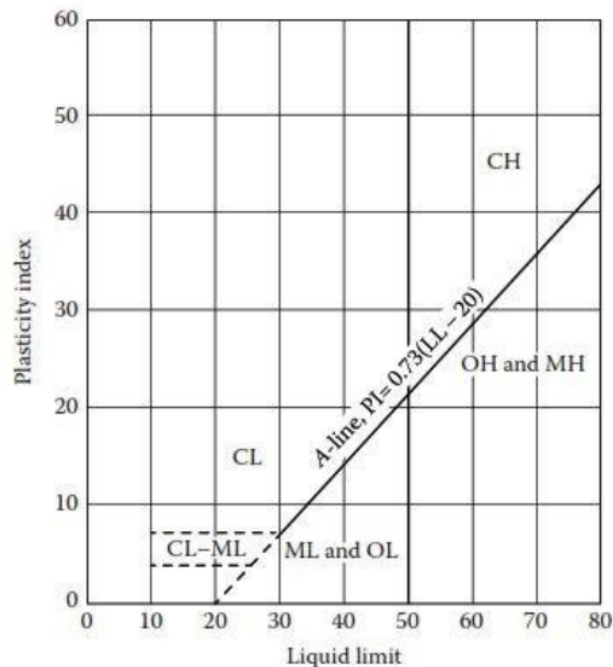
aproximada entre la compactación relativa y la densidad relativa como:

$$R_c = 80 + 0,2D_r \quad (2.38)$$

### 2.2.3.7 Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS)

Según Braja Das (2019) <sup>6</sup> El sistema unificado de clasificación de suelos fue propuesto originalmente por A. Casagrande en 1948 y fue revisado en 1952 por el Cuerpo de Ingenieros y la Oficina de Reclamación de los Estados Unidos. En su forma actual [véase también ASTM D-2487, ASTM (2014)], el sistema es ampliamente utilizado por diversas organizaciones, ingenieros geotécnicos en consultoría privada, y códigos de construcción. Inicialmente, hay dos divisiones principales en este sistema. Un suelo se clasifica como suelo de grano grueso (grava y arena) si más del 50 % es retenido en un tamiz n.º 200 y como suelo de grano fino (limoso y arcilloso) si el 50 % o más pasa por un tamiz n.º 200. . El suelo se clasifica a continuación por una serie de subdivisiones, como se muestra en la tabla

Figura N°15: Tabla de



**Nota:** Tabla de plasticidad. **Fuente:** Braja Das (2019)

De la figura N°13 podemos observar la tabla la clasificación SUCS (sistema unificado de la clasificación de suelos) como se va detallar en la tabla N°04 para los diferentes tipos de suelos donde van contener arena, arcilla, limo, grava y componentes inorgánicos.



26  
Tabla N°05: Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS)

| Mayor división                                                                                                                                    | Símbolo del grupo | Nombre típico                                                            | Criterio o clasificación                                                                                                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Suelo de grano grueso (<50 % pasando el tamiza N°200)<br>Gravas (<50 %de fracción de grueso pasando el tamiz N°4<br>Grava con pocos o ningún fino | GW                | Gravas bien clasificadas; mezclas de grava y arena (pocos o ningún fino) | $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ ; $C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10})(D_{60})}$<br>entre 1 y 3<br>No reúne los dos criterios para GW |
|                                                                                                                                                   | GP                | Gravas mal graduadas; mezclas de grava y arena (pocos o ningún fino)     | No reúne los dos criterios para GW                                                                                                   |
| Grava con finos                                                                                                                                   | GM                | Grava limosa ; combinación de grava arena y limo                         | Límites de Atterberg por debajo de la línea A o índice de plasticidad inferior a 4b                                                  |
|                                                                                                                                                   | GC                | Gravas arcillosas ; combinación de grava , arena y arcilla               | Límites de Atterberg por encima de la línea A con índice de plasticidad superior a 7 b                                               |
| Arena (>50 % de fracción de gruesos que pasa el tamiz N°4<br>Arenas limpias (pocos o ningún fino)                                                 | SW                | Arenas bien graduadas; arenas gravosas (pocos o ningún fino)             | $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ ; $C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10})(D_{60})}$<br>entre 1 y 3<br>No reúne los dos criterios para SW |
|                                                                                                                                                   | SP                | Arenas mal graduadas; arenas gravosas (pocos o ningún fino)              | No reúne los dos criterios para SW                                                                                                   |
| Arenas con finos (cantidad apreciable de finos)                                                                                                   | SM                | Arenas limosas; mezclas de arena y limo                                  | Límites de Atterberg por debajo de la línea A o índice de plasticidad inferior a 4b                                                  |
|                                                                                                                                                   | SC                | Arenas arcillosas; mezclas de arena y arcilla                            | Límites de Atterberg por encima de la línea A con índice de plasticidad superior a 7b                                                |
| Suelos de grano fino ( 50 % que pasa el N° de tamiz 200)                                                                                          |                   |                                                                          |                                                                                                                                      |
| Limos y arcilla (límite de líquido                                                                                                                | ML                | Limos inorgánicos; arenas muy finas                                      |                                                                                                                                      |

inferior a 50)

|    |   |                                                                                                                            |
|----|---|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | 9 | harina de roca; arenas finas limosas o arcillosas                                                                          |
| CL |   | Arcillas inorgánicas (de baja a media plasticidad) arcillas gravosas; arcillas arenosas; arcillas limosas; arcillas magras |
| OL |   | Limos orgánicos; arcillas orgánicas limosas (baja plasticidad)                                                             |

Limos y arcilla (límite líquido superior a superior a 50)

|         |  |                                                                                        |
|---------|--|----------------------------------------------------------------------------------------|
| MH      |  | Limos inorgánicos; micáceos o diatomeos suelos arenosos o limosos finos; limo elástico |
| 6<br>CH |  | Arcillas inorgánicas (alta plasticidad) arcillas grasas                                |
| OH      |  | Arcillas orgánicas (de media a alta plasticidad) limos orgánicos                       |

Lodos altamente orgánicos

|    |  |                                                     |
|----|--|-----------------------------------------------------|
| Pt |  | Turba; mantillo; y otros suelos altamente orgánicos |
|----|--|-----------------------------------------------------|

Fuente: Elaboración Propia tomado del manuscrito de Mecánica de suelos avanzado de Braja M. DAS

### 2.2.3.8 Sistema de clasificación AASHTO

Según Braja Das (2019) Este sistema de clasificación de suelos se desarrolló en 1929 como Sistema de Clasificación de la Administración de Carreteras Públicas. Ha sufrido varias revisiones, siendo la versión actual la propuesta por el Comité de Clasificación de Materiales para Subrasantes y Carreteras de Tipo Granular del Highway Research Board en 1945 [ASTM (2014) Designación de prueba D-3282].

El sistema de clasificación de la AASHTO que se utiliza actualmente figura en Tabla 1.10. Según este sistema, el suelo se clasifica en siete grandes grupos: A-1 a A-7. Los suelos clasificados en los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares, donde el 35 % o menos de las partículas pasan por el tamiz n° 200. Los suelos en los que más del 35 % pasa por el tamiz n° 200 se clasifican en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7. Se trata principalmente de materiales de tipo limo y arcilla. El sistema de clasificación se basa en los siguientes criterios:

1. **Tamaño del grano Grava:** Fracción que pasa el tamiz de 75 mm y se retiene en el n° 10 (2 mm) Tamiz de EE.UU. **Arena:** Fracción que pasa por el tamiz U.S. n° 10 (2 mm) y se retiene en el tamiz U.S. n° 200 (0,075 mm). el tamiz estadounidense n.º 200 (0,075 mm) **Limo y arcilla:** Fracción que pasa el tamiz estadounidense n° 200
2. Plasticidad: El término limoso se aplica cuando las fracciones finas del suelo tienen un índice de plasticidad de 10 o menos. El término arcilloso se aplica cuando las fracciones finas tienen un índice de plasticidad de 11 o más.
3. Si se encuentran guijarros y cantos rodados (de tamaño superior a 75 mm), se excluyen de la parte de la muestra de suelo sobre la que se realiza la clasificación. Sin embargo, se registra el porcentaje de dicho material.

Para clasificar un suelo según la Tabla 5, los datos de prueba se aplican de izquierda a derecha. Por el proceso de eliminación, el primer grupo de la izquierda en el que encajen los datos de la prueba es la clasificación correcta.

Para la evaluación de la calidad de un suelo como material de subrasante para carreteras, se incorpora también un número llamado índice de grupo (IG) con los grupos y subgrupos del suelo. El número se escribe entre paréntesis después de la designación del grupo o subgrupo. El índice de grupo viene dado por la ecuación:

$$GI = (F - 35) [0,2 + 0,005 (LL - 40)] + 0,01 (F - 15) (PI - 10) \quad (2.39)$$

F es el porcentaje que pasa el tamiz n° 200

LL es el límite líquido

PI es el índice de plasticidad

El primer término de la ecuación 2.39, es decir,  $(F - 35) [0,2 + 0,005(LL - 40)]$  es el índice de grupo parcial determinado a partir del límite líquido. El segundo término, es decir,  $0,01(F - 15)(PI - 10)$  es el índice de grupo parcial determinado a partir del índice de plasticidad. A continuación, se indican las reglas para determinar el índice de grupo:

☞ Si la ecuación 2.39 da un valor negativo para el IG, se toma como 0.

☞ El índice de grupo calculado a partir de la ecuación 2.39 se redondea al número entero más cercano (por ejemplo,  $IG = 3,4$  se redondea a 3;  $IG = 3,5$  se redondea a 4).

☞ No hay límite superior para el índice de grupo.

☞ El índice de grupo de los suelos pertenecientes a los grupos A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5 y A-3 es siempre 0.

5 ☞ Al calcular el índice de grupo para los suelos que pertenecen a los grupos A-2-6 y A-2-7, utilice el índice de grupo parcial para PI, o la ecuación 2.40

$$GI = 0,01 (F - 15) (PI - 10) \quad (2.40)$$

En general, la calidad del rendimiento de un suelo como material de subrasante es inversamente proporcional al índice de grupo.

Tabla N°06: Clasificación de los materiales del subsuelo de las carreteras AASHTO

| 8 Materiales granulares (35 % o menos de la muestra total que pasa el tamiz No. 200)            |                                    |        |                      |                                  |        |        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|--------|----------------------|----------------------------------|--------|--------|
| Clasificación general                                                                           |                                    |        |                      |                                  |        |        |
| Clasificación de grupo                                                                          | A-I-a                              | A-I-3  | A-3                  | A-2-4                            | A-2    | A-2-7  |
| Análisis granulométrico                                                                         |                                    |        |                      |                                  |        |        |
| porcentaje que pasa                                                                             |                                    |        |                      |                                  |        |        |
| N°10                                                                                            | 50 máx                             |        |                      |                                  |        |        |
| N°40                                                                                            | 30 máx                             | 50 máx | 50 mín               |                                  |        |        |
| N°200                                                                                           | 15 máx                             | 25 máx | 10 máx               | 35 máx                           | 35 máx | 35 máx |
| Característica de la fracción que pasa                                                          |                                    |        |                      |                                  |        |        |
| N°40                                                                                            |                                    |        |                      |                                  |        |        |
| Límite líquido                                                                                  |                                    |        |                      | 40 máx                           | 41 mín | 41 mín |
| Índice de plasticidad                                                                           | 6 máx                              |        | NP                   | 10 máx                           | 10 máx | 11 mín |
| Tipos habituales de materiales constitutivos                                                    | Fragmentos de piedra grava y arena |        | Finos                | Grava y arena limosa o arcillosa |        |        |
| significativos                                                                                  |                                    |        | Arena                |                                  |        |        |
| Subrasante general                                                                              |                                    |        | De excelente a bueno |                                  |        |        |
| clasificación                                                                                   |                                    |        |                      |                                  |        |        |
| 6 Materiales limo-arcillosos (más del 35 % o del total de la muestra que pasa el tamiz No. 200) |                                    |        |                      |                                  |        |        |
| Clasificación de grupo                                                                          | A-4                                | A-5    | A-6                  | A-7                              | A-7-5  | A-7-6  |
| Análisis granulométrico                                                                         |                                    |        |                      |                                  |        |        |
| (porcentaje que pasa)                                                                           |                                    |        |                      |                                  |        |        |
| N°10                                                                                            |                                    |        |                      |                                  |        |        |
| N°40                                                                                            |                                    |        |                      |                                  |        |        |
| N°200                                                                                           | 36 mín                             | 36 mín | 36 mín               |                                  |        |        |
| Característica de la fracción que pasa                                                          |                                    |        |                      |                                  |        |        |
| N°40                                                                                            |                                    |        |                      |                                  |        |        |
| Límite líquido                                                                                  | 40 máx                             | 41 mín | 40 máx               |                                  |        |        |
| Índice de plasticidad                                                                           | 10 máx                             | 10 máx | 11 mín               |                                  |        |        |

**Tipos habituales de  
materiales constitutivos  
significativos  
Subrasante general  
clasificación**

Suelo limoso

suelo arcilloso

Regular a pobre

*Fuente:* Elaboración Propia tomado del manuscrito de Mecánica de suelos avanzado de Braja M. DAS

### 2.2.3.9 Compactación

La compactación de los rellenos sueltos es una forma sencilla de aumentar la estabilidad y la capacidad de carga de los suelos, y generalmente se consigue utilizando rodillos de rueda lisa, rodillos de pata de oveja, rodillos con ruedas de goma y rodillos vibratorios. Para redactar las especificaciones de compactación sobre el terreno, Las pruebas de compactación se realizan generalmente en el laboratorio. A continuación se describe brevemente el procedimiento del ensayo de compactación Proctor (Braja Das, 2019):

**prueba de compactación Proctor estándar** Proctor (1933) desarrolló por primera vez un ensayo estándar de compactación de suelos en laboratorio, que suele denominarse ensayo Proctor estándar (designación ASTM D-698). La prueba se realiza mediante la compactación de tres capas de suelo en un molde de 944 cm<sup>3</sup> de volumen. Cada capa de suelo se somete a 25 golpes con un martillo de 24,6 N con una caída de 304,8 mm. A partir del volumen conocido del molde, el peso del suelo compactado húmedo en el molde y el contenido de humedad del suelo compactado, el peso unitario seco de la compactación puede determinarse como

$\gamma' = (\text{Peso de la tierra húmeda en el molde}) / (\text{volumen del molde})$

$$\gamma_d = \frac{\gamma'}{1 + w} \quad (2.41)$$

donde:

$\gamma' =$  peso unitario húmedo del suelo compactado

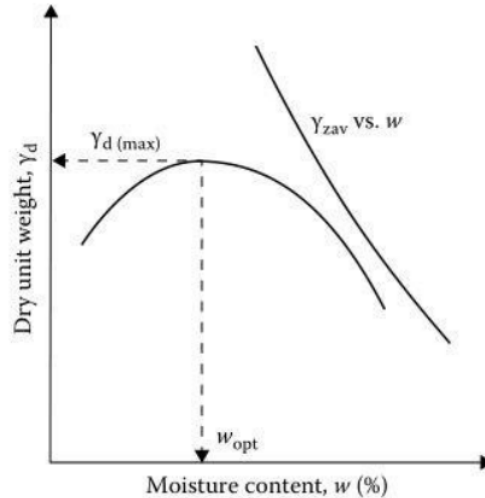
$\gamma_d =$  peso unitario seco del suelo compactado

$w =$  contenido de humedad del suelo.

La prueba puede repetirse varias veces con distintos contenidos de humedad del suelo. Trazando un gráfico de  $\gamma_d$  frente al contenido de humedad correspondiente, puede obtenerse el contenido de humedad óptimo  $w_{opt}$  y el peso unitario seco máximo  $\gamma_d(max)$ . En la Figura 14 también se representa la variación de los pesos unitarios secos, suponiendo que el grado de saturación es del 100 %. Se trata de los pesos unitarios secos máximos teóricos que pueden alcanzarse para un contenido de humedad determinado cuando no haya aire en los espacios vacíos. Con un grado de saturación del 100 %

$$e = wG_s \quad (2.42)$$

**Figura N°16:** Peso unitario seco versus humedad óptima



**Nota:** Peso unitario seco versus humedad óptima. **Fuente:** Braja Das (2019)

El peso unitario seco máximo con un contenido de humedad determinado y con cero vacíos de aire puede venir dado por la ecuación

$$\gamma_{zav} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + w G_s} = \frac{\gamma_w}{\left(\frac{1}{G_s}\right) + w} \quad (2.43)$$

donde  $\gamma_{zav}$  es el peso unitario sin aire (en seco)

Para la prueba de compactación Proctor estándar, la energía de compactación E puede ser expresada como:

$$E = \frac{\left(\frac{24.5 \text{ N}}{\text{golpe}}\right) (3 \text{ capas}) \left(\frac{25 \text{ golpes}}{\text{capa}}\right) (0.3048 \text{ m})}{\frac{944}{10^6} \text{ m}^3} \quad (2.44)$$

$$E = 593.294 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{m}^3 \approx 593 \text{ kN} \cdot \text{m} / \text{m}^3$$

**prueba de compactación Proctor modificado** Con el desarrollo de equipos de compactación más pesados, el ensayo Proctor estándar se ha modificado para representar mejor las condiciones de campo. En el ensayo Proctor modificado (designación ASTM D-1577), se utiliza el mismo molde que en el ensayo Proctor estándar. Sin embargo, el suelo se compacta en 5 capas, con un martillo de 44,5 N dando 25 golpes a cada capa. La altura de caída del martillo es de 457,2 mm. Por lo tanto, el esfuerzo de compactación en el ensayo Proctor modificado es igual a



Traducción realizada con la versión gratuita del traductor [www.DeepL.com/Translator](http://www.DeepL.com/Translator)

$$E = \frac{\left(\frac{25 \text{ golpes}}{\text{capa}}\right)(5 \text{ capas})\left(\frac{44.5 \text{ N}}{\text{golpe}}\right)(0.4572 \text{ m})}{\frac{944}{10^6} \text{ m}^3} \quad (2.45)$$
$$E = 2694.041 \text{ N} - \text{m/m}^3 \approx 2604 \text{ kN} - \text{m/m}^3$$

El peso unitario seco máximo obtenido en el ensayo Proctor modificado será mayor que el obtenido en el ensayo Proctor estándar debido a la aplicación de una mayor energía de compactación. También irá acompañado de un contenido de humedad óptimo más bajo en comparación con el obtenido en la prueba de compactación Proctor estándar.

## 2.3 Marco conceptual

### 2.3.1 Modelamiento de redes neuronales artificiales

La arquitectura de las redes neuronales artificiales se refiere a la composición de los elementos de las redes neuronales, su organización y los parámetros que les afectan. La red neuronal de retropropagación es una de las arquitecturas de redes neuronales más comunes. Esta arquitectura de red neuronal es muy popular porque puede aplicarse a muchas tareas diferentes. La retroalimentación describe cómo esta red neuronal procesa y recuerda patrones. En una red neuronal de avance, las neuronas sólo están conectadas hacia delante. Cada capa de la red neuronal contiene conexiones con la capa siguiente (por ejemplo, desde la entrada a la capa oculta), pero no hay conexiones hacia atrás. La retropropagación describe cómo se entrena este tipo de red neuronal. La retropropagación es una forma de entrenamiento supervisado. Cuando se utiliza un método de entrenamiento supervisado, se debe proporcionar a la red con entradas de muestra y salidas anticipadas, las salidas previstas se comparan con las salidas reales para una entrada determinada a partir de las salidas previstas, el algoritmo de entrenamiento por retropropagación toma un error calculado y ajusta los pesos de las capas hacia atrás desde la capa de salida hasta la capa de entrada, y la mayoría de las redes neuronales tienen las funciones principales de procesamiento de peso, suma y paso de la salida de sus capas a través de funciones de activación (transferencia) donde estas funciones de activación escalan la salida de la red neuronal en rangos adecuados de valores máximos y mínimos donde hay un total de tres tipos de funciones de activación (Gohary et al. 2017).

como son:

Tangente hiperbólica

sigmoidal

lineal

utilizaron tanh en sus modelos de redes neuronales. También probaron la función sigmoidea, la función lineal y otras funciones disponibles en un programa informático NeuroSolution 4, varias veces, produciendo resultados menos precisos; el El algoritmo de aprendizaje utilizado para todas las redes neuronales fue el algoritmo de aprendizaje de retropropagación en el que cada capa alimenta directamente a la capa siguiente. En este estudio, el programa comercial programa informático comercial NeuroSolution 6.03 para desarrollar, entrenar y probar las redes neuronales. La función de activación (transferencia) utilizada en todas las redes neuronales fue tanh, que se representa (Gohary et al. 2017)

$$f(x) = \frac{e^{2x}-1}{e^{2x}+1} \quad (2.46)$$

El error cuadrático medio es:

$$MSE = \frac{\sum_p \sum_{j=1}^p \cdot \sum_{i=1}^n (d_{ij} - y_{ij})^2}{NP} \quad (2.47)$$

donde:

p= número de elementos de procesamiento de salidas

N= número de ejemplos en el conjunto de datos

d<sub>ij</sub>= salida deseada

y<sub>ij</sub>= salida actual

El promedio de MSE para todos los modelos de diferentes oficios se muestra en Tabla 1. La red entrenada se considera aceptable para predecir la productividad con un margen de error satisfactorio. No existe un método específico para determinar el número de capas ocultas y el número de nodos en cada capa. sugirieron empezar con una capa oculta y luego aumentar a dos capas ocultas si el rendimiento con una capa oculta es no es satisfactoria. En general, un número reducido de nodos ocultos dará lugar a un elevado error de entrenamiento y predicción (prueba) porque la red es incapaz de aprender la función. Por otro lado, demasiados nodos ocultos resultará en un bajo error de entrenamiento y un aumento de la potencia de la red, pero requerirá más cálculos y probablemente producirá un problema de producir un problema de sobreajuste (Gohary et al. 2017).

Por lo tanto, la mejor arquitectura de red para un problema específico podría lograrse utilizando el enfoque de prueba y error. En esta investigación, el número de entradas es de 29, y la suma de errores al cuadrado se define como inferior a 0,001. Por lo tanto, una

capa oculta y 20 neuronas en la capa oculta. Esto coincide con Gohary et al. (2017), que determinaron el número de neuronas de la capa oculta como  $2=3$  o el 70-90 % del tamaño de la capa de entrada. En la capa de salida se utiliza una neurona que se denomina k. La Fig. 2 muestra la arquitectura de la red utilizada. Es importante dividir el conjunto de datos en conjuntos de entrenamiento y de prueba (predicción). El conjunto de datos de entrenamiento es responsable del proceso de aprendizaje de la red. El conjunto de datos de prueba, sin embargo, tiene datos que la red no ha utilizado en sus cálculos de entrenamiento. Los datos de prueba miden la capacidad de generalización de la red. No hay ninguna regla que dicte qué porcentaje se asigna exactamente al conjunto de entrenamiento y al conjunto de pruebas. Sin embargo, es importante tener suficientes datos de para que la red converja. El proceso de entrenamiento y prueba es dinámico y continuo, lo que significa que con la disponibilidad de más datos, se pueden realizar más entrenamientos y pruebas. Gohary et al. (2017) afirmaron que "para determinar una cantidad adecuada de datos de entrenamiento y prueba, se consideraron dos divisiones. La primera fue el 90 % de los datos para el entrenamiento y el 10 % para las pruebas. La segunda fue 50 % de los datos para el entrenamiento y 50 % para las pruebas. Tras las pruebas iniciales se vio que los resultados de la primera división eran más precisos". En otro caso, Heravi y Eslamdoost (2015) asignaron el 70 % de los datos para el entrenamiento del modelo. En este estudio, se realizó una división del 75 % de los datos para el entrenamiento y el 25 % para las pruebas. El algoritmo de aprendizaje en la red neuronal de retropropagación tiene dos fases. En primer lugar, la capa de entrada recibe un patrón de entrenamiento de entrada y la red propaga (feedforward) el patrón de entrada de capa a capa hasta que la capa de salida genera el patrón de salida. Una neurona calcula la entrada ponderada de la red basándose en la siguiente ecuación. (Gohary et al. 2017)

$$X = \sum_{i=1}^n x_i w_i - \alpha \quad (2.48)$$

1  
donde:

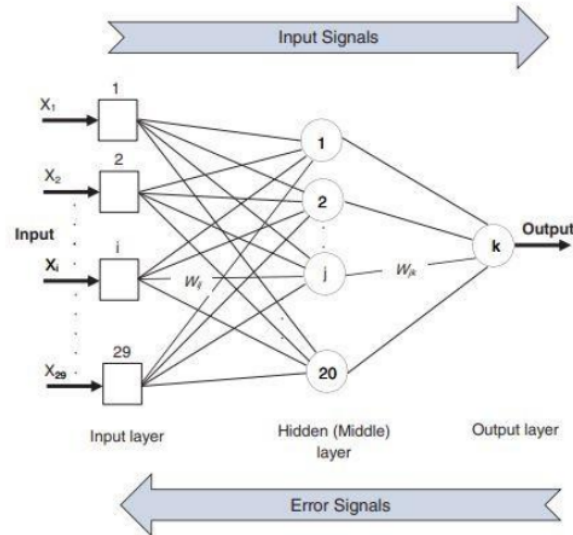
n= número de entradas

$\alpha$ =Límites aplicado a la neurona

1  
A continuación, este valor se pasa por la función de activación. En segundo lugar, si este patrón es diferente de la salida deseada se calcula el error correspondiente y se propaga hacia atrás (back-propagation) a través de la red desde la capa de salida hasta la capa de entrada. A continuación, los pesos de la red de retropropagación se actualizan con los errores asociados de la neurona de salida y se se propagan hacia atrás. (Gohary et al. 2017).

La señal de error en la salida de la neurona k (capa de salida) en la iteración p se define como:

**Figura N°17:** Arquitectura de 3 capas de feed forward con algoritmo de aprendizaje de backpropagation



**Nota:** Entradas a la red neuronal. **Fuente:** Khaled Mahmond

$$e_k(p) = Y_{d,k}(p) - Y_k(p) \quad (2.49)$$

donde:

$Y_{d,k}(p)$  = salida deseada de la neurona k en la iteración p;

$Y_k(p)$  = salida calculada pertinente de la neurona k utilizando la función de activación función de activación utilizada (tanh). El peso  $w_{jk}$  se actualiza mediante:

$$w_{jk}(p + 1) = w_{jk}(p) + \Delta w_{jk}(p) \quad (2.50)$$

donde:

$\Delta w_{jk}(p)$  = corrección del peso. Como la salida de la capa anterior (por ejemplo, la capa oculta) se utiliza como entrada a la siguiente capa (por ejemplo, la capa de salida),  $\Delta w_{jk}(p)$  se define como:

$$\Delta w_{jk}(p) = \theta \times Y_j(p) \times \delta_k(P) \quad (2.51)$$

donde:

$\theta$  = tasa de aprendizaje, una constante positiva menor que la unidad; y  $\delta_k(P)$  = gradiente de error en la neurona k. El gradiente de error se determina como la derivada de la función de activación multiplicada por el error a la salida de la neurona. Para la neurona k en la capa de salida.

$$\delta_k(P) = \frac{\delta_{y_k}(P)}{\delta_{x_k}(P)} \times e_k(p) \quad (2.52)$$

1

donde:

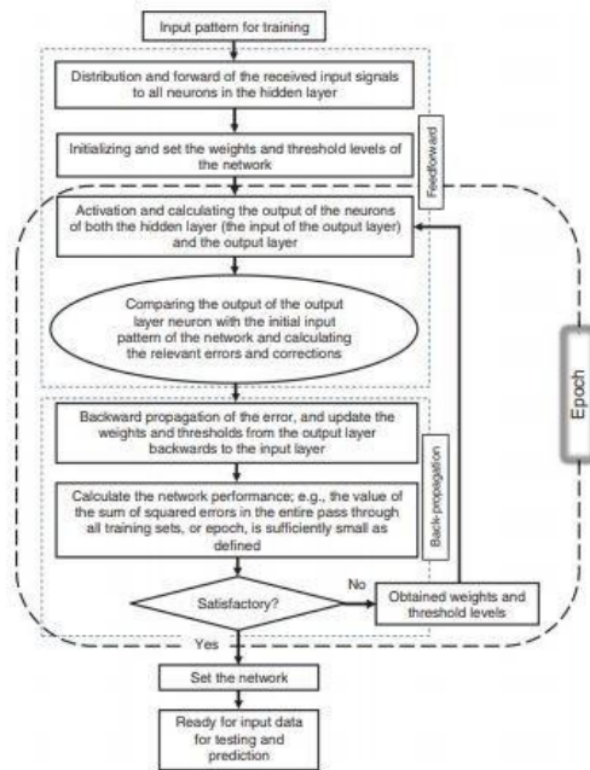
$Y_k(p)$  = salida de la neurona k en la iteración p; y  $X_k(p)$  = entrada neta entrada ponderada a la neurona k en la misma iteración. La Fig. 2.16 muestra el proceso utilizado para el entrenamiento y la predicción (validación) de la red.

#### 2.3.1.1 Prueba de modelo de productividad y validación

Según Gohary et al. (2017):

Después de que la red se entrene durante el número de épocas designado, la red congela los pesos que ha alcanzado. Cuando el sobreajuste y el error de validación comienza a aumentar para un número determinado de épocas, la prueba se detiene y se devuelven los parámetros correspondientes al mínimo de este error de validación.(p.6)

**Figura N°18:** Diagrama de flujo para redes neuronales



**Nota:** Diagrama de flujo para redes neuronales artificiales. **Fuente:** Khaled Mahmond

# III

## MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN

### 3.1 Enfoque.

La investigación se realizará con un enfoque Cuantitativo se podrá operar con cifras el valor de los rendimientos.

### 3.2 Alcance

La investigación se realizará con un enfoque de alcance descriptivo para estimar los parámetros de compactación a partir de los parámetros de clasificación de los suelos y los límites de Atterberg donde realizaremos la operacionalización de variables con sus indicadores para el ingreso a la red neuronal artificial.

### 3.3 Diseño de investigación

El diseño es transversal porque se va recolectar y procesar datos en un solo momento de la investigación de la investigación y no en varios momentos, a esta investigación también se le conoce como transeccional.

### 3.4 Población y muestra

#### 3.4.1 Población

Son todos los resultados de laboratorio de densidad seca y humedad óptima de las muestras de diferentes tipos de suelos de la región geológica de Ayacucho. Muestra

El muestreo no probabilístico discreto de los resultados de laboratorio de densidad seca y humedad óptima del proyecto de pavimentación de la av. ejército de Andrés Avelino Cáceres Ayacucho, 2021.

### 3.5 Hipótesis

#### 3.5.1 Hipótesis general

Con el uso de RNA se puede estimar los parámetros de compactación y resistencia de soporte en suelos de subrasante utilizando redes neuronales artificiales supervisadas en la pavimentación de la av. Ejército Ayacucho, 2021.

#### 3.5.2 Hipótesis específicas



1. Con el uso de RNA se puede estimar parámetros de compactación y resistencia de soporte en suelos de subrasante a partir de la granulométrica de la Av. Ejército Ayacucho, 2021
2. Con el uso de RNA se puede estimar parámetros de compactación y resistencia de soporte en suelos de subrasante a partir de los límites de consistencia de la Av. Ejército Ayacucho, 2021.
3. Con el uso de RNA se puede estimar parámetros de compactación en suelos de subrasante a partir de la clasificación de suelos SUCS Y ASSTHO de la av. Ejército Ayacucho, 2021.

## 3.6 Operacionalización de variables

### 3.6.1 Variables e indicadores

La operacionalización de variables se muestra a continuación en la siguiente tabla:

**Tabla N° 07:** Variables e Indicadores.

| Independiente                                       | Indicadores                 | Medición          |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------|
| Parámetros de compactación y resistencia de soporte | Límite líquido (LL)         | LL                |
|                                                     | Límite Plástico (LP)        | LP                |
|                                                     | Índice de plasticidad (IP)  | IP                |
|                                                     | finos                       | %                 |
|                                                     | gravas                      | %                 |
|                                                     | arena                       | %                 |
|                                                     | Clasif. ASSHTO              | G,S ó C           |
|                                                     | Clasif. SUCS                | G,S ó C           |
| dependiente                                         | Indicadores                 | Medición          |
| Estimación                                          | Densidad seca( $\gamma_d$ ) | $\frac{gf}{cm^3}$ |
|                                                     | Humedad óptima( $w_{opt}$ ) | %                 |

**Fuente:** Elaboración Propia

|                                                                          |  |
|--------------------------------------------------------------------------|--|
| <b>3.7 Técnicas e instrumentos</b>                                       |  |
| <b>3.7.1 Técnicas</b>                                                    |  |
| La técnica de la observación                                             |  |
| La técnica documental de datos                                           |  |
| La técnica del procesamiento de datos                                    |  |
| <b>3.7.2 Instrumentos</b>                                                |  |
| Guía de observación.                                                     |  |
| Paper y libros de investigación.                                         |  |
| Instrumento de la recolección de datos.                                  |  |
| <b>3.8 Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información</b> |  |

1. Análisis de datos de las variables e indicadores.
2. Análisis de consistencia y homogeneidad de los datos.
3. Modelo de regresión lineal múltiple con probabilidad de distribución estadística.
4. Contratación de hipótesis t-student.
5. presentación y publicación de los resultados.

Contrastación de Hipótesis con PROGRAMA SPSS  
Para La densidad máxima seca  
Resumen del modelo para la densidad máxima seca

| Model | R                 | R Square | Adjusted R Square | Std. Error of the Estimate | Change Statistics |          |     |     |
|-------|-------------------|----------|-------------------|----------------------------|-------------------|----------|-----|-----|
|       |                   |          |                   |                            | R Square Change   | F Change | df1 | df2 |
| 1     | ,178 <sup>a</sup> | ,032     | ,016              | ,22553                     | ,032              | 2,005    | 8   | 489 |

a. Predictors: (Constant), SUCS, LÍMITE\_PLÁSTICO, GRAVA, ARENA, INDICE\_PLASTICIDAD, AASTHO, LIMITE\_LIQUIDO, FINOS

b. Dependent Variable: DENS.MAXIMA

ANOVA<sup>a</sup>

| Model | Sum of Squares |        | df  | Mean Square | F     | Sig.              |
|-------|----------------|--------|-----|-------------|-------|-------------------|
| 1     | Regression     | ,816   | 8   | ,102        | 2,005 | ,044 <sup>b</sup> |
|       | Residual       | 24,873 | 489 | ,051        |       |                   |
|       | Total          | 25,689 | 497 |             |       |                   |

a. Dependent Variable: DENS.MAXIMA

b. Predictors: (Constant), SUCS, LÍMITE\_PLÁSTICO, GRAVA, ARENA, INDICE\_PLASTICIDAD, AASTHO, LIMITE\_LIQUIDO, FINOS

En la tabla ANOVA podemos observar el valor de la prueba F aceptable donde tenemos un nivel de significancia aceptable de 4.4%.

Coefficients<sup>a</sup>

| Model | Unstandardized Coefficients |            | Standardized Coefficients Beta | t     | Sig. | 95.0% Confidence Interval for B |             |
|-------|-----------------------------|------------|--------------------------------|-------|------|---------------------------------|-------------|
|       | B                           | Std. Error |                                |       |      | Lower Bound                     | Upper Bound |
| 1     | (Constant)                  | 1,858      | ,819                           | 2,269 | ,024 | ,249                            | 3,467       |
|       | LÍMITE_LIQUIDO              | -,010      | ,015                           | -,675 | ,500 | -,041                           | ,020        |
|       | LÍMITE_PLÁSTICO             | ,016       | ,015                           | 1,065 | ,287 | -,014                           | ,046        |
|       | ÍNDICE_PLÁSTICIDAD          | ,007       | ,016                           | ,457  | ,648 | -,024                           | ,038        |
|       | GRAVA                       | -,005      | ,008                           | -,582 | ,561 | -,020                           | ,011        |
|       | ARENA                       | -,005      | ,008                           | -,683 | ,495 | -,021                           | ,010        |
|       | FINOS                       | -,005      | ,008                           | -,690 | ,490 | -,021                           | ,010        |
|       | AASTHO                      | ,013       | ,011                           | 1,148 | ,251 | -,009                           | ,035        |
|       | SUCS                        | ,000       | ,000                           | 1,803 | ,072 | ,000                            | ,001        |

a. Dependent Variable: DENS.MAXIMA

Como se puede apreciar la contrastación de hipótesis de las variables de entrada para la densidad seca máxima, los coeficientes de la regresión lineal múltiple, donde también se puede apreciar el t-student para cada variable y el nivel de significancia para cada variable independiente del modelo es aceptable para todos los Sig. Según el T student teórico como se observa en la tabla de coeficientes, lo cual nos indica que se puede utilizar el modelo de redes neuronales para predecir resultados estimados.

Contrastación de hipótesis para el contenido de humedad óptimo

| ANOVA <sup>a</sup> |                   |     |                  |      |                   |
|--------------------|-------------------|-----|------------------|------|-------------------|
| Modelo             | Suma de cuadrados | gl  | Media cuadrática | F    | Sig.              |
| 1                  |                   |     |                  |      |                   |
| Regresión          | 251,994           | 8   | 31,499           | ,795 | ,607 <sup>b</sup> |
| Residuo            | 19375,329         | 489 | 39,622           |      |                   |
| Total              | 19627,323         | 497 |                  |      |                   |

a. Variable dependiente: CONTENIDO\_HUMEDAD

b. Predictores: (Constante), SUCS, LÍMITE\_PLÁSTICO, GRAVA, ARENA, INDICE\_PLASTICIDAD, AASTHO, LÍMITE\_LÍQUIDO, FINOS

| Coeficientes <sup>a</sup> |                                |             |                             |       |                                     |                 |
|---------------------------|--------------------------------|-------------|-----------------------------|-------|-------------------------------------|-----------------|
| Modelo                    | Coeficientes no estandarizados |             | Coeficientes estandarizados |       | 95.0% intervalo de confianza para B |                 |
|                           | B                              | Desv. Error | Beta                        | t     | Límite inferior                     | Límite superior |
| 1                         |                                |             |                             |       |                                     |                 |
| (Constante)               | -21,530                        | 22,857      |                             | -,942 | -,66,441                            | 23,380          |
| LÍMITE_LÍQUIDO            | ,234                           | ,432        | ,327                        | ,541  | -,616                               | 1,084           |
| LÍMITE_PLÁSTICO           | -,279                          | ,427        | -,233                       | -,654 | -,117                               | ,559            |
| INDICE_PLASTICIDAD        | -,207                          | ,440        | -,190                       | -,469 | -,1071                              | ,658            |
| GRAVA                     | ,342                           | ,216        | 1,208                       | 1,581 | -,083                               | ,767            |
| ARENA                     | ,372                           | ,216        | ,802                        | 1,722 | -,052                               | ,797            |
| FINOS                     | ,341                           | ,216        | 1,397                       | 1,582 | -,082                               | ,764            |
| AASTHO                    | -,007                          | ,317        | -,001                       | -,021 | -,630                               | ,617            |
| SUCS                      | -,003                          | ,004        | -,029                       | -,637 | -,010                               | ,005            |

a. Variable dependiente: CONTENIDO\_HUMEDAD

Como se puede apreciar la contrastación de hipótesis utilizando coeficientes de la regresión lineal múltiple, donde también se puede apreciar el t-student para cada variable y el nivel de significancia para cada variable independiente del modelo es aceptable para todos los Sig. Según el T student teórico como se observa en la tabla de coeficientes para la variable de salida como es el contenido de humedad óptimo.

### 3.9 Desarrollo de la investigación

Para el desarrollo de la tesis se recolectó los datos de laboratorio para los resultados de los Próctor, previo resultado se obtuvo los datos para los límites de Atterberg y los parámetros de clasificación de los suelos.

#### 3.9.1 Simbología de los tipos de suelos según SUCS y AASHTO

Para el ingreso a la red neuronal se necesitan normalizar los datos de entrenamiento, validación y prueba por lo que los resultados para el tipo de suelos según SUCS y AASHTO son reemplazados por valores numéricos y luego normalizados para el aprendizaje de la red neuronal.

Tabla N°08: Simbología para la normalización e ingreso a la red

| Ingreso a la red | SUCS | Ingreso a la red | AASHTO |
|------------------|------|------------------|--------|
| 1                | GW   | 20               | A-1    |
| 2                | GP   | 21               | A-3    |

Capítulo III. Método de la investigación

|    |    |             |
|----|----|-------------|
| 3  | GM | A-2-4       |
| 4  | GC | A-2-5       |
| 5  | SW | 22<br>A-2-6 |
| 6  | SP | A-2-7       |
| 7  | SM | A-4         |
| 8  | SC | 23<br>A-5   |
| 9  | ML | A-6         |
| 10 | CL | A-7         |
| 11 | OL | 24<br>A-7-5 |
| 12 | MH | A-7-6       |
| 13 | CH |             |

|    |    |
|----|----|
| 14 | OH |
| 15 | PT |

**Fuente:** Elaboración Propia con hojas de cálculos

### 3.9.2 Normalización de datos

Para la normalización de los datos se necesitan conocer los parámetros estadísticos como la media, mínimo, máximo y desviación estándar de los valores originales para la obtención de los valores normalizados según las fórmulas descritos debajo.

**Tabla N°09:** Valores estadísticos de los parámetros de ingreso

| Estadística                  | N° de datos | Media | Mínimo | Máximo |
|------------------------------|-------------|-------|--------|--------|
| <b>Límite liquido</b>        | 500.00      | 32.26 | 14.78  | 65.14  |
| <b>Límite plástico</b>       | 500.00      | 21.47 | 9.85   | 43.59  |
| <b>Índice de plasticidad</b> | 500.00      | 10.83 | 2.92   | 36.59  |
| <b>% Grava</b>               | 500.00      | 88.21 | 0.00   | 176.42 |
| <b>% Arena</b>               | 500.00      | 31.73 | 1.04   | 73.48  |
| <b>% fina</b>                | 500.00      | 36.14 | 0.64   | 95.97  |
| <b>Máx. Densidad</b>         | 500.00      | 1.74  | 1.15   | 2.45   |
| <b>Humed. Óptimo</b>         | 500.00      | 14.95 | 1.13   | 28.77  |

**Fuente:** Elaboración Propia con hojas de cálculo

**Fórmulas para la normalización de los valores originales** Las fórmulas descritas debajo se utilizan para la normalización de los valores originales en valores normalizados para el ingreso a la red, ya que la función de activación del logaritmo sigmoidal y tangencial solo permite valores entre los rangos de -1 a 1 y de 0 a 1 para su convergencia por lo que es necesario normalizar los datos a procesar como se observa las fórmulas siguientes la normalización son realizadas utilizando las siguientes fórmulas.

$$X_{\text{norm}} = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (\text{III.1})$$

$$X_{\text{norm}} = \frac{x - \text{mean}(x)}{\text{std}(x)} \quad (\text{III.2})$$



En las tablas 3.4 y 3.5 se observan los valores originales y normalizados de todos los datos ingresado a la red neuronal artificial.

Tabla N° 10: Parámetros o valores ingresados a la red neuronal artificial

| Límite líquido | Límite plástico | Índice plasticidad | % Grava | % Arena | % fina | AASTHO_N | SUCS_N | Máx. Dens. | Seca | Humedad Óptima |
|----------------|-----------------|--------------------|---------|---------|--------|----------|--------|------------|------|----------------|
| 33.94          | 20.62           | 13.32              | 47.80   | 30.90   | 47.80  | 22.00    | 8.00   | 1.60       |      | 22.45          |
| 41.16          | 22.21           | 18.95              | 16.10   | 49.04   | 34.86  | 24.00    | 4.00   | 1.79       |      | 9.75           |
| 41.08          | 23.03           | 18.05              | 13.04   | 37.17   | 49.79  | 22.00    | 8.00   | 1.53       |      | 16.30          |
| 26.79          | 19.37           | 7.42               | 12.60   | 45.18   | 42.22  | 24.00    | 8.00   | 1.44       |      | 19.49          |
| 38.05          | 29.36           | 8.69               | 13.38   | 46.04   | 40.57  | 22.00    | 8.00   | 2.11       |      | 8.40           |
| 34.28          | 26.31           | 7.97               | 28.78   | 24.68   | 46.55  | 24.00    | 4.00   | 1.74       |      | 18.50          |
| 35.18          | 24.50           | 10.68              | 34.65   | 38.17   | 27.18  | 22.00    | 8.00   | 1.69       |      | 17.05          |
| 30.27          | 21.60           | 8.67               | 41.03   | 46.71   | 12.26  | 22.00    | 7.00   | 2.14       |      | 6.85           |
| 27.07          | 19.58           | 7.49               | 58.74   | 35.90   | 5.36   | 22.00    | 1.00   | 2.03       |      | 7.35           |
| 27.14          | 23.35           | 3.80               | 38.09   | 52.43   | 9.48   | 20.00    | 6.00   | 2.03       |      | 7.35           |
| 30.49          | 21.97           | 8.51               | 0.00    | 29.15   | 70.85  | 24.00    | 9.00   | 2.04       |      | 8.72           |
| 30.88          | 22.45           | 8.43               | 0.39    | 32.36   | 67.25  | 24.00    | 10.00  | 1.55       |      | 21.96          |
| 38.68          | 28.26           | 10.43              | 0.00    | 22.55   | 77.45  | 23.00    | 10.00  | 1.33       |      | 42.00          |
| 33.92          | 25.26           | 8.66               | 0.16    | 35.20   | 64.64  | 23.00    | 9.00   | 2.17       |      | 4.37           |
| 31.20          | 20.83           | 10.37              | 0.07    | 29.76   | 70.17  | 23.00    | 10.00  | 2.01       |      | 6.88           |
| 33.03          | 26.95           | 6.07               | 0.88    | 43.39   | 55.74  | 24.00    | 10.00  | 2.18       |      | 6.24           |
| 64.14          | 32.42           | 31.72              | 63.51   | 30.12   | 6.37   | 22.00    | 2.00   | 1.89       |      | 10.85          |
| 34.22          | 28.32           | 5.91               | 19.24   | 43.05   | 37.71  | 24.00    | 8.00   | 1.99       |      | 9.18           |
| 31.04          | 23.87           | 7.18               | 55.83   | 37.97   | 6.20   | 22.00    | 2.00   | 1.90       |      | 7.85           |
| 28.06          | 19.45           | 8.71               | 59.16   | 34.58   | 6.25   | 22.00    | 1.00   | 1.89       |      | 10.85          |
| 29.98          | 21.76           | 8.23               | 66.65   | 29.94   | 3.41   | 22.00    | 1.00   | 1.99       |      | 9.18           |
| 19.37          | 13.88           | 5.49               | 11.48   | 30.93   | 57.60  | 23.00    | 10.00  | 1.90       |      | 7.85           |
| 26.17          | 18.86           | 7.32               | 59.52   | 25.05   | 15.44  | 22.00    | 4.00   | 2.10       |      | 8.65           |
| 30.72          | 19.20           | 11.62              | 49.14   | 17.77   | 33.09  | 22.00    | 4.00   | 1.60       |      | 22.45          |
| 26.80          | 18.14           | 7.66               | 0.00    | 7.09    | 92.91  | 24.00    | 10.00  | 1.79       |      | 9.75           |
| 36.59          | 29.28           | 7.30               | 62.50   | 18.43   | 19.07  | 22.00    | 4.00   | 1.53       |      | 16.30          |
| 37.10          | 28.58           | 8.52               | 2.90    | 14.28   | 82.82  | 24.00    | 9.00   | 1.44       |      | 19.49          |
| 25.60          | 19.96           | 5.63               | 16.06   | 49.96   | 33.98  | 22.00    | 8.00   | 1.99       |      | 7.47           |
| 23.78          | 15.88           | 7.90               | 58.26   | 25.78   | 15.96  | 22.00    | 4.00   | 1.51       |      | 19.05          |
| 28.16          | 19.45           | 8.71               | 28.20   | 47.85   | 23.95  | 22.00    | 7.00   | 1.53       |      | 25.70          |
| 29.98          | 21.76           | 8.23               | 34.22   | 47.78   | 18.00  | 22.00    | 7.00   | 1.44       |      | 19.49          |
| 23.78          | 15.88           | 7.90               | 26.84   | 54.36   | 18.80  | 22.00    | 7.00   | 1.53       |      | 16.30          |

|       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| 23.40 | 15.62 | 7.77  | 5.94  | 64.52 | 29.53 | 22.00 | 7.00  | 1.79 | 9.75  |
| 42.64 | 23.25 | 19.39 | 25.91 | 64.06 | 10.03 | 20.00 | 5.00  | 1.60 | 22.45 |
| 31.78 | 23.06 | 8.72  | 46.08 | 37.27 | 16.65 | 22.00 | 3.00  | 2.10 | 8.65  |
| 41.67 | 20.09 | 21.59 | 20.65 | 44.29 | 35.06 | 24.00 | 8.00  | 1.64 | 18.51 |
| 52.31 | 27.65 | 24.66 | 4.62  | 41.57 | 53.81 | 24.00 | 10.00 | 1.65 | 20.09 |
| 50.48 | 28.78 | 21.70 | 0.00  | 17.31 | 82.63 | 24.00 | 13.00 | 1.64 | 21.28 |
| 41.97 | 21.79 | 20.18 | 0.16  | 35.20 | 64.64 | 23.00 | 10.00 | 2.17 | 4.37  |
| 43.21 | 27.40 | 15.81 | 0.06  | 17.31 | 82.63 | 24.00 | 13.00 | 1.53 | 25.70 |
| 39.39 | 32.67 | 6.72  | 0.16  | 35.20 | 64.64 | 23.00 | 10.00 | 1.51 | 19.05 |
| 39.94 | 25.52 | 14.42 | 0.07  | 29.76 | 70.17 | 23.00 | 9.00  | 1.99 | 7.47  |
| 43.53 | 29.21 | 14.32 | 0.88  | 43.39 | 55.74 | 23.00 | 10.00 | 1.64 | 18.51 |
| 39.21 | 27.99 | 11.22 | 58.97 | 29.25 | 11.78 | 22.00 | 2.00  | 1.65 | 20.09 |
| 40.41 | 24.09 | 16.33 | 59.17 | 30.37 | 10.46 | 22.00 | 2.00  | 1.64 | 21.28 |
| 14.78 | 9.85  | 4.93  | 69.32 | 25.10 | 5.57  | 20.00 | 1.00  | 2.05 | 6.33  |
| 25.47 | 19.47 | 6.00  | 64.12 | 28.04 | 7.83  | 22.00 | 2.00  | 1.53 | 16.30 |
| 25.11 | 19.38 | 5.73  | 45.68 | 44.29 | 10.03 | 22.00 | 2.00  | 1.44 | 19.49 |
| 21.27 | 17.14 | 4.13  | 49.69 | 40.64 | 9.67  | 22.00 | 4.00  | 1.45 | 34.63 |
| 32.47 | 26.54 | 5.93  | 27.34 | 61.59 | 11.07 | 22.00 | 5.00  | 1.45 | 34.63 |
| 26.08 | 19.71 | 6.38  | 7.69  | 69.62 | 22.69 | 22.00 | 7.00  | 1.60 | 22.45 |
| 23.79 | 18.29 | 5.51  | 13.58 | 68.19 | 18.23 | 22.00 | 7.00  | 1.53 | 16.30 |
| 22.64 | 17.48 | 5.16  | 22.54 | 61.34 | 16.12 | 22.00 | 7.00  | 1.44 | 19.49 |
| 25.50 | 18.96 | 6.53  | 45.84 | 34.21 | 19.94 | 22.00 | 3.00  | 2.06 | 7.54  |
| 21.27 | 17.14 | 4.13  | 41.41 | 36.75 | 21.84 | 22.00 | 3.00  | 1.94 | 6.60  |
| 23.38 | 18.53 | 4.85  | 0.06  | 4.19  | 95.76 | 24.00 | 10.00 | 1.43 | 19.89 |
| 24.14 | 18.96 | 5.18  | 3.09  | 16.35 | 80.56 | 24.00 | 10.00 | 2.17 | 4.37  |
| 25.56 | 20.96 | 4.60  | 0.29  | 9.38  | 90.33 | 24.00 | 9.00  | 2.10 | 8.65  |
| 21.60 | 17.15 | 4.46  | 0.30  | 12.47 | 87.22 | 24.00 | 10.00 | 1.60 | 22.45 |
| 14.78 | 9.85  | 4.93  | 25.83 | 26.62 | 47.55 | 24.00 | 8.00  | 1.56 | 18.00 |
| 21.27 | 17.14 | 4.13  | 5.30  | 27.26 | 67.44 | 24.00 | 10.00 | 1.75 | 12.56 |
| 32.47 | 26.54 | 6.93  | 56.47 | 29.80 | 13.73 | 22.00 | 3.00  | 1.86 | 8.07  |
| 26.08 | 19.71 | 6.38  | 49.18 | 30.15 | 20.67 | 22.00 | 3.00  | 1.53 | 16.30 |
| 23.79 | 18.29 | 5.51  | 47.45 | 32.72 | 19.83 | 22.00 | 3.00  | 1.44 | 19.49 |
| 22.64 | 17.48 | 5.16  | 0.35  | 3.68  | 95.97 | 24.00 | 31.00 | 2.08 | 7.02  |
| 25.50 | 18.96 | 6.53  | 0.00  | 7.73  | 92.27 | 24.00 | 10.00 | 1.94 | 6.60  |
| 21.27 | 17.14 | 4.13  | 0.41  | 4.85  | 94.73 | 24.00 | 13.00 | 1.43 | 19.89 |

|       |       |       |       |       |       |       |        |      |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------|-------|
| 23.38 | 18.53 | 4.85  | 0.00  | 17.27 | 82.73 | 24.00 | 10.00  | 2.00 | 9.80  |
| 24.14 | 18.96 | 5.18  | 0.00  | 12.58 | 87.42 | 24.00 | 9.00   | 1.30 | 30.34 |
| 25.56 | 20.96 | 4.60  | 9.12  | 23.31 | 67.57 | 23.00 | 10.00  | 1.48 | 25.77 |
| 21.60 | 17.15 | 4.46  | 51.12 | 20.61 | 28.27 | 22.00 | 4.00   | 1.44 | 27.60 |
| 24.86 | 19.89 | 4.97  | 39.52 | 31.41 | 29.07 | 22.00 | 4.00   | 2.17 | 4.37  |
| 33.94 | 20.62 | 13.32 | 0.23  | 21.91 | 77.86 | 24.00 | 10.00  | 1.70 | 13.40 |
| 41.16 | 22.21 | 18.95 | 5.21  | 19.81 | 74.94 | 24.00 | 9.00   | 2.01 | 10.60 |
| 41.08 | 23.03 | 18.05 | 38.94 | 11.75 | 49.32 | 24.00 | 3.00   | 1.84 | 16.09 |
| 26.79 | 19.37 | 7.42  | 66.01 | 25.21 | 8.78  | 20.00 | 2.00   | 1.71 | 23.14 |
| 38.05 | 29.36 | 8.69  | 51.29 | 41.38 | 7.33  | 20.00 | 1.00   | 1.69 | 21.18 |
| 34.28 | 26.31 | 7.97  | 40.25 | 52.11 | 7.65  | 20.00 | 6.00   | 1.73 | 17.57 |
| 35.18 | 24.50 | 10.68 | 42.55 | 33.81 | 23.64 | 22.00 | 4.00   | 1.77 | 21.28 |
| 30.27 | 21.60 | 8.67  | 24.52 | 45.78 | 29.70 | 22.00 | 7.00   | 1.90 | 11.82 |
| 27.07 | 19.58 | 7.49  | 44.78 | 35.97 | 19.24 | 22.00 | 4.00   | 1.74 | 22.27 |
| 27.14 | 23.35 | 3.80  | 54.02 | 30.51 | 15.47 | 22.00 | 34.00  | 1.73 | 16.03 |
| 30.49 | 21.97 | 8.51  | 54.07 | 34.33 | 11.60 | 22.00 | 243.00 | 2.00 | 7.60  |
| 30.88 | 22.45 | 8.43  | 57.20 | 36.09 | 6.71  | 22.00 | 14.00  | 2.08 | 7.83  |
| 36.68 | 28.26 | 10.43 | 65.10 | 29.54 | 5.36  | 22.00 | 14.00  | 1.70 | 13.40 |
| 33.92 | 25.26 | 8.66  | 34.68 | 37.27 | 28.05 | 22.00 | 8.00   | 2.17 | 4.37  |
| 31.20 | 20.83 | 10.37 | 34.68 | 37.27 | 28.05 | 22.00 | 8.00   | 2.01 | 9.48  |
| 33.03 | 26.95 | 6.07  | 48.17 | 26.72 | 25.11 | 22.00 | 4.00   | 1.82 | 17.10 |
| 64.14 | 32.42 | 31.72 | 68.34 | 19.20 | 12.46 | 22.00 | 4.00   | 1.91 | 9.71  |
| 34.22 | 28.32 | 5.91  | 62.04 | 15.99 | 21.97 | 22.00 | 4.00   | 2.20 | 7.88  |
| 31.04 | 23.87 | 7.18  | 47.30 | 29.39 | 23.30 | 22.00 | 4.00   | 2.07 | 7.97  |
| 27.63 | 18.38 | 9.25  | 15.02 | 44.08 | 40.90 | 23.00 | 7.00   | 1.51 | 31.03 |
| 48.15 | 30.09 | 18.07 | 3.25  | 68.03 | 28.72 | 22.00 | 7.00   | 1.47 | 26.81 |
| 64.14 | 32.42 | 31.72 | 23.07 | 51.31 | 25.62 | 22.00 | 7.00   | 1.97 | 7.79  |
| 34.22 | 28.32 | 5.91  | 30.78 | 41.81 | 27.41 | 22.00 | 8.00   | 1.95 | 7.96  |
| 31.04 | 23.87 | 7.18  | 2.98  | 10.33 | 86.69 | 24.00 | 10.00  | 1.98 | 8.22  |
| 33.92 | 25.26 | 8.66  | 19.19 | 13.94 | 66.87 | 24.00 | 13.00  | 1.95 | 8.49  |
| 31.20 | 20.83 | 10.37 | 63.10 | 18.16 | 18.14 | 22.00 | 4.00   | 1.96 | 6.61  |
| 33.03 | 26.95 | 6.07  | 12.29 | 18.26 | 69.45 | 24.00 | 10.00  | 1.97 | 7.71  |
| 30.49 | 21.97 | 8.51  | 2.20  | 23.07 | 74.73 | 24.00 | 10.00  | 1.95 | 7.49  |
| 30.88 | 22.45 | 8.43  | 45.32 | 22.99 | 31.69 | 22.00 | 4.00   | 1.73 | 11.77 |
| 38.68 | 28.26 | 10.43 | 24.54 | 27.92 | 47.54 | 24.00 | 8.00   | 1.86 | 9.38  |

|       |       |       |          |       |       |       |       |      |       |
|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| 34.28 | 26.31 | 7.97  | 0.92     | 8.77  | 90.31 | 24.00 | 13.00 | 1.55 | 10.17 |
| 35.18 | 24.50 | 10.68 | 19.61    | 27.33 | 53.06 | 24.00 | 10.00 | 1.55 | 22.51 |
| 30.27 | 21.60 | 8.67  | 3.01     | 15.58 | 81.41 | 24.00 | 10.00 | 1.49 | 16.57 |
| 26.79 | 19.37 | 7.42  | 36.31    | 21.29 | 42.40 | 24.00 | 4.00  | 1.68 | 12.44 |
| 38.05 | 29.35 | 8.69  | 37.45    | 16.86 | 45.69 | 24.00 | 4.00  | 1.78 | 18.20 |
| 33.94 | 20.62 | 13.32 | 29.89    | 29.34 | 40.77 | 24.00 | 4.00  | 1.61 | 15.23 |
| 41.16 | 22.21 | 18.95 | 5.63     | 17.00 | 77.37 | 24.00 | 10.00 | 1.71 | 10.02 |
| 41.08 | 23.03 | 18.05 | 0.31     | 15.70 | 83.99 | 24.00 | 31.00 | 1.67 | 11.95 |
| 24.86 | 19.89 | 4.97  | 27.11    | 24.07 | 48.82 | 24.00 | 4.00  | 1.70 | 11.71 |
| 46.72 | 24.67 | 22.05 | 30.01    | 25.88 | 44.11 | 24.00 | 4.00  | 1.70 | 1.75  |
| 21.61 | 13.33 | 8.28  | 19.31    | 16.62 | 64.07 | 24.00 | 10.00 | 1.63 | 8.86  |
| 23.72 | 12.24 | 11.47 | 76.53    | 19.10 | 4.36  | 22.00 | 1.00  | 1.52 | 16.84 |
| 33.72 | 18.12 | 15.60 | 38.24    | 28.53 | 33.22 | 22.00 | 4.00  | 1.62 | 12.30 |
| 28.91 | 15.12 | 13.78 | 20388.00 | 27.37 | 51.76 | 24.00 | 10.00 | 1.50 | 17.12 |
| 26.81 | 17.44 | 9.37  | 21.67    | 26.37 | 51.96 | 24.00 | 10.00 | 1.56 | 16.22 |
| 26.70 | 16.62 | 10.08 | 18.86    | 20.76 | 60.37 | 24.00 | 10.00 | 1.53 | 16.09 |
| 34.71 | 14.69 | 20.02 | 33.89    | 22.31 | 43.80 | 24.00 | 4.00  | 1.51 | 16.95 |
| 36.23 | 16.56 | 19.67 | 57.29    | 25.94 | 16.78 | 20.00 | 3.00  | 1.77 | 8.66  |
| 21.05 | 13.12 | 7.93  | 42.67    | 39.64 | 17.69 | 20.00 | 3.00  | 1.80 | 8.55  |
| 14.78 | 9.85  | 4.93  | 19.26    | 22.75 | 57.99 | 23.00 | 9.00  | 1.82 | 9.69  |
| 48.15 | 30.09 | 18.07 | 11.97    | 20.88 | 67.15 | 24.00 | 9.00  | 1.73 | 11.84 |
| 27.63 | 18.38 | 9.25  | 27.47    | 19.01 | 53.52 | 24.00 | 12.00 | 1.70 | 12.17 |
| 48.72 | 24.67 | 22.05 | 1.05     | 24.88 | 74.07 | 24.00 | 10.00 | 1.74 | 18.50 |
| 21.61 | 13.33 | 8.28  | 0.38     | 11.40 | 88.22 | 24.00 | 10.00 | 1.69 | 17.05 |
| 23.72 | 12.24 | 11.47 | 0.16     | 15.79 | 84.05 | 24.00 | 10.00 | 2.11 | 8.40  |
| 33.72 | 18.12 | 15.60 | 0.68     | 17.49 | 81.83 | 23.00 | 10.00 | 2.19 | 8.80  |
| 28.91 | 15.12 | 13.78 | 8.85     | 39.71 | 51.44 | 24.00 | 9.00  | 1.88 | 10.59 |
| 26.81 | 17.44 | 9.37  | 1.68     | 22.43 | 75.88 | 23.00 | 9.00  | 1.78 | 16.55 |
| 26.70 | 16.62 | 10.08 | 4.33     | 28.49 | 67.17 | 23.00 | 9.00  | 2.03 | 11.45 |
| 34.71 | 14.69 | 20.02 | 20.00    | 15.10 | 64.89 | 24.00 | 9.00  | 1.42 | 33.46 |
| 36.23 | 16.56 | 19.67 | 21.49    | 23.59 | 54.92 | 23.00 | 10.00 | 1.58 | 15.16 |
| 21.05 | 13.12 | 7.93  | 22.98    | 15.25 | 61.77 | 23.00 | 10.00 | 2.15 | 7.13  |
| 21.70 | 16.57 | 5.13  | 1.70     | 10.21 | 88.09 | 23.00 | 9.00  | 1.59 | 22.25 |
| 34.28 | 26.31 | 7.97  | 0.11     | 12.54 | 87.35 | 24.00 | 9.00  | 1.95 | 10.98 |
| 35.18 | 24.50 | 10.68 | 42.89    | 33.75 | 23.36 | 22.00 | 4.00  | 2.04 | 9.38  |

|       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| 30.27 | 21.60 | 8.67  | 42.58 | 38.57 | 18.85 | 22.00 | 4.00  | 1.62 | 19.95 |
| 30.49 | 31.97 | 8.51  | 60.02 | 14.99 | 24.98 | 24.00 | 10.00 | 2.04 | 10.10 |
| 30.88 | 22.45 | 8.43  | 61.91 | 22.45 | 15.64 | 22.00 | 6.00  | 1.74 | 11.33 |
| 38.68 | 28.26 | 10.43 | 40.25 | 52.11 | 7.65  | 20.00 | 13.00 | 1.73 | 13.54 |
| 33.92 | 25.26 | 8.66  | 2.70  | 25.11 | 72.19 | 24.00 | 12.00 | 1.69 | 16.99 |
| 31.20 | 20.83 | 10.37 | 8.22  | 31.43 | 60.35 | 24.00 | 12.00 | 2.05 | 7.53  |
| 33.03 | 26.95 | 6.07  | 2.05  | 49.02 | 48.93 | 24.00 | 7.00  | 1.84 | 13.41 |
| 36.98 | 20.36 | 16.62 | 22.26 | 67.35 | 10.39 | 20.00 | 57.00 | 1.57 | 24.19 |
| 34.22 | 28.32 | 5.91  | 29.09 | 9.97  | 60.95 | 24.00 | 10.00 | 1.69 | 19.27 |
| 31.04 | 23.87 | 7.18  | 35.38 | 7.79  | 56.83 | 24.00 | 10.00 | 1.79 | 17.50 |
| 31.24 | 18.15 | 13.09 | 36.89 | 43.46 | 19.65 | 20.00 | 87.00 | 1.64 | 13.10 |
| 44.42 | 18.40 | 26.02 | 52.93 | 37.14 | 9.93  | 20.00 | 23.00 | 1.77 | 14.89 |
| 33.94 | 20.62 | 13.32 | 40.53 | 43.99 | 15.48 | 20.00 | 7.00  | 1.82 | 13.61 |
| 41.16 | 22.21 | 18.95 | 28.30 | 45.20 | 26.50 | 22.00 | 8.00  | 1.76 | 12.48 |
| 41.08 | 23.03 | 18.05 | 32.58 | 41.40 | 26.02 | 22.00 | 8.00  | 1.80 | 13.19 |
| 26.79 | 19.37 | 7.42  | 23.82 | 37.44 | 38.74 | 24.00 | 7.00  | 2.02 | 12.48 |
| 48.03 | 31.89 | 16.14 | 30.78 | 37.33 | 31.90 | 22.00 | 7.00  | 1.61 | 18.40 |
| 38.05 | 29.36 | 8.69  | 27.24 | 20.83 | 51.93 | 24.00 | 10.00 | 1.75 | 12.00 |
| 34.28 | 26.31 | 7.97  | 15.73 | 36.37 | 47.91 | 23.00 | 7.00  | 1.73 | 14.10 |
| 35.18 | 24.50 | 10.68 | 46.31 | 37.24 | 16.45 | 20.00 | 3.00  | 1.86 | 13.57 |
| 30.27 | 21.60 | 8.67  | 4.46  | 69.34 | 26.34 | 22.00 | 7.00  | 1.60 | 20.46 |
| 30.49 | 21.97 | 8.51  | 25.63 | 30.21 | 44.15 | 23.00 | 7.00  | 1.86 | 13.57 |
| 30.88 | 22.45 | 8.43  | 2.74  | 38.95 | 58.31 | 24.00 | 10.00 | 1.94 | 6.35  |
| 38.68 | 28.26 | 10.43 | 2.42  | 26.58 | 71.00 | 24.00 | 9.00  | 2.15 | 7.69  |
| 33.92 | 25.26 | 8.66  | 20.98 | 51.95 | 27.08 | 22.00 | 7.00  | 2.18 | 6.96  |
| 31.20 | 20.83 | 10.37 | 0.00  | 4.67  | 95.33 | 24.00 | 10.00 | 2.17 | 4.93  |
| 33.03 | 26.95 | 6.07  | 3.23  | 42.37 | 54.41 | 23.00 | 9.00  | 1.82 | 13.52 |
| 36.98 | 20.36 | 16.62 | 56.82 | 38.95 | 4.23  | 20.00 | 1.00  | 1.86 | 13.57 |
| 34.22 | 28.32 | 5.91  | 51.29 | 41.38 | 7.23  | 20.00 | 13.00 | 1.80 | 13.50 |
| 31.04 | 23.87 | 7.18  | 25.81 | 54.41 | 19.78 | 22.00 | 87.00 | 1.85 | 8.66  |
| 31.24 | 18.15 | 13.09 | 51.29 | 41.38 | 7.33  | 20.00 | 13.00 | 1.82 | 9.20  |
| 44.42 | 18.40 | 26.02 | 60.30 | 22.86 | 16.84 | 22.00 | 4.00  | 1.87 | 8.49  |
| 28.51 | 20.77 | 7.74  | 25.81 | 54.41 | 19.78 | 22.00 | 87.00 | 1.88 | 7.50  |
| 48.47 | 29.25 | 19.22 | 16.10 | 49.04 | 34.86 | 22.00 | 8.00  | 1.79 | 9.75  |
| 36.65 | 22.06 | 14.59 | 13.04 | 37.17 | 49.79 | 23.00 | 8.00  | 1.79 | 9.16  |

|       |       |       |       |       |       |       |         |      |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|------|-------|
| 32.55 | 19.81 | 12.74 | 13.60 | 45.18 | 42.22 | 24.00 | 8.00    | 2.00 | 7.30  |
| 30.22 | 19.13 | 11.08 | 13.38 | 46.04 | 40.57 | 23.00 | 8.00    | 1.98 | 9.81  |
| 44.24 | 24.24 | 20.00 | 28.78 | 24.68 | 46.55 | 24.00 | 4.00    | 1.77 | 17.21 |
| 45.54 | 22.27 | 23.27 | 34.65 | 38.17 | 27.18 | 22.00 | 8.00    | 1.67 | 19.40 |
| 46.42 | 20.76 | 25.66 | 9.60  | 44.04 | 46.36 | 24.00 | 8.00    | 1.64 | 18.20 |
| 33.78 | 21.57 | 12.21 | 26.11 | 23.51 | 50.38 | 24.00 | 10.00   | 1.68 | 19.16 |
| 14.78 | 9.85  | 4.93  | 12.87 | 25.24 | 61.89 | 24.00 | 10.00   | 1.65 | 18.32 |
| 24.86 | 19.89 | 4.97  | 47.34 | 19.54 | 33.13 | 22.00 | 3.00    | 1.69 | 18.96 |
| 33.94 | 20.62 | 13.32 | 26.94 | 23.37 | 49.70 | 23.00 | 3.00    | 1.64 | 14.56 |
| 41.16 | 22.21 | 18.95 | 63.36 | 20.47 | 16.17 | 20.00 | 3.00    | 2.17 | 4.37  |
| 41.08 | 23.03 | 18.05 | 71.87 | 13.97 | 14.16 | 20.00 | 3.00    | 2.12 | 2.54  |
| 32.05 | 23.29 | 8.76  | 72.22 | 16.44 | 11.35 | 22.00 | 24.00   | 2.19 | 6.43  |
| 32.05 | 23.29 | 8.76  | 42.55 | 33.81 | 23.64 | 20.00 | 67.00   | 1.44 | 27.60 |
| 26.79 | 19.37 | 7.42  | 24.52 | 45.78 | 29.70 | 22.00 | 4.00    | 1.15 | 28.43 |
| 48.03 | 31.89 | 16.14 | 44.78 | 35.97 | 19.24 | 22.00 | 7.00    | 1.38 | 31.56 |
| 38.05 | 29.36 | 8.69  | 54.02 | 30.51 | 15.47 | 22.00 | 4.00    | 1.48 | 25.77 |
| 34.28 | 26.31 | 7.97  | 54.07 | 34.33 | 11.60 | 22.00 | 43.00   | 1.44 | 23.25 |
| 35.18 | 24.50 | 10.68 | 53.22 | 36.75 | 10.03 | 22.00 | 243.00  | 1.30 | 30.34 |
| 30.27 | 21.60 | 8.67  | 64.34 | 31.59 | 4.06  | 20.00 | 1.00    | 1.28 | 27.56 |
| 30.49 | 21.97 | 8.51  | 34.29 | 36.91 | 28.80 | 22.00 | 87.00   | 2.14 | 6.70  |
| 30.88 | 22.45 | 8.43  | 52.05 | 39.08 | 8.87  | 20.00 | 14.00   | 2.05 | 5.37  |
| 38.68 | 28.26 | 10.43 | 43.84 | 36.45 | 19.71 | 20.00 | 43.00   | 2.08 | 7.08  |
| 33.92 | 25.26 | 8.66  | 45.64 | 40.94 | 13.42 | 22.00 | 3.00    | 1.96 | 4.56  |
| 31.20 | 20.83 | 10.37 | 45.10 | 44.35 | 10.55 | 20.00 | 148.00  | 2.06 | 7.19  |
| 33.03 | 26.95 | 6.07  | 57.09 | 27.38 | 15.54 | 22.00 | 4.00    | 1.96 | 6.42  |
| 36.98 | 20.36 | 16.62 | 47.28 | 42.46 | 10.26 | 20.00 | 1410.00 | 2.04 | 10.50 |
| 34.22 | 28.32 | 6.91  | 56.74 | 27.27 | 16.00 | 22.00 | 4.00    | 1.90 | 8.45  |
| 31.04 | 23.87 | 7.18  | 46.27 | 37.49 | 16.23 | 22.00 | 4.00    | 2.05 | 6.33  |
| 31.24 | 18.16 | 13.09 | 47.86 | 31.51 | 20.63 | 24.00 | 4.00    | 1.96 | 4.62  |
| 24.36 | 18.00 | 6.35  | 21.77 | 31.37 | 46.87 | 24.00 | 8.00    | 1.91 | 2.86  |
| 48.47 | 29.25 | 19.22 | 42.65 | 44.82 | 12.53 | 20.00 | 87.00   | 1.55 | 28.20 |
| 36.65 | 22.06 | 14.59 | 46.02 | 36.73 | 17.26 | 22.00 | 4.00    | 1.47 | 27.52 |
| 32.55 | 19.81 | 12.74 | 14.06 | 47.28 | 38.66 | 24.00 | 8.00    | 1.36 | 25.64 |
| 30.22 | 19.13 | 11.08 | 5.98  | 42.17 | 51.86 | 24.00 | 10.00   | 1.65 | 25.17 |
| 44.24 | 24.24 | 20.00 | 43.39 | 40.66 | 15.94 | 22.00 | 4.00    | 1.57 | 26.53 |

|       |       |       |       |       |       |       |        |      |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------|-------|
| 45.54 | 22.27 | 23.27 | 6.04  | 18.31 | 75.65 | 24.00 | 12.00  | 1.54 | 22.12 |
| 46.42 | 20.76 | 25.66 | 42.67 | 48.36 | 8.97  | 20.00 | 57.00  | 1.60 | 27.12 |
| 33.78 | 21.57 | 12.21 | 29.74 | 31.59 | 38.68 | 23.00 | 87.00  | 1.71 | 18.14 |
| 50.42 | 22.32 | 28.09 | 26.72 | 41.63 | 31.66 | 22.00 | 8.00   | 1.58 | 15.23 |
| 40.98 | 21.66 | 19.31 | 27.07 | 58.02 | 14.91 | 22.00 | 147.00 | 1.96 | 9.29  |
| 65.14 | 33.33 | 31.81 | 4.71  | 12.64 | 82.64 | 20.00 | 87.00  | 1.77 | 7.34  |
| 54.75 | 32.74 | 22.01 | 54.72 | 35.66 | 9.62  | 24.00 | 10.00  | 2.05 | 7.31  |
| 41.74 | 15.92 | 25.82 | 52.87 | 39.51 | 7.62  | 22.00 | 241.00 | 1.94 | 6.58  |
| 42.67 | 36.15 | 6.52  | 38.85 | 33.06 | 28.09 | 22.00 | 242.00 | 1.82 | 4.23  |
| 35.44 | 19.13 | 16.30 | 35.35 | 33.09 | 31.56 | 22.00 | 43.00  | 1.97 | 10.50 |
| 35.07 | 24.39 | 10.68 | 13.13 | 24.16 | 62.72 | 24.00 | 10.00  | 1.84 | 9.56  |
| 43.87 | 26.99 | 16.89 | 56.76 | 17.40 | 25.84 | 22.00 | 43.00  | 1.81 | 7.46  |
| 14.78 | 9.85  | 4.93  | 45.16 | 48.11 | 6.73  | 20.00 | 67.00  | 1.68 | 18.00 |
| 43.90 | 23.20 | 20.70 | 44.19 | 53.64 | 2.18  | 20.00 | 6.00   | 1.58 | 14.38 |
| 40.90 | 21.10 | 19.80 | 38.45 | 56.83 | 4.73  | 20.00 | 6.00   | 1.50 | 12.43 |
| 28.31 | 17.50 | 10.58 | 45.09 | 54.28 | 0.64  | 20.00 | 2.00   | 1.57 | 23.00 |
| 33.50 | 17.34 | 16.16 | 14.12 | 31.72 | 54.16 | 23.00 | 10.00  | 1.50 | 21.13 |
| 58.33 | 21.98 | 36.36 | 57.19 | 17.05 | 25.76 | 22.00 | 3.00   | 1.41 | 19.43 |
| 41.45 | 18.60 | 22.85 | 39.69 | 28.56 | 31.75 | 22.00 | 4.00   | 1.80 | 12.00 |
| 45.15 | 20.31 | 24.84 | 55.33 | 36.20 | 8.47  | 22.00 | 3.00   | 1.72 | 10.32 |
| 48.95 | 20.25 | 28.70 | 0.09  | 25.10 | 74.82 | 24.00 | 9.00   | 1.68 | 8.51  |
| 43.73 | 18.63 | 25.09 | 44.21 | 40.95 | 14.83 | 22.00 | 143.00 | 1.91 | 9.60  |
| 43.20 | 17.24 | 25.96 | 27.52 | 52.83 | 19.65 | 20.00 | 87.00  | 1.82 | 7.56  |
| 57.67 | 21.08 | 36.59 | 49.90 | 38.89 | 11.21 | 22.00 | 8.00   | 1.77 | 5.46  |
| 48.12 | 19.86 | 28.26 | 60.42 | 30.99 | 8.60  | 22.00 | 243.00 | 1.65 | 17.39 |
| 34.79 | 18.18 | 16.60 | 40.33 | 34.26 | 25.41 | 22.00 | 43.00  | 1.58 | 16.00 |
| 37.20 | 15.93 | 21.27 | 52.95 | 32.57 | 14.48 | 20.00 | 43.00  | 1.49 | 12.32 |
| 39.93 | 22.14 | 17.78 | 65.90 | 29.73 | 4.38  | 22.00 | 1.00   | 1.62 | 19.50 |
| 33.68 | 19.67 | 14.00 | 38.94 | 11.75 | 49.32 | 24.00 | 4.00   | 1.57 | 16.23 |
| 45.65 | 21.31 | 24.35 | 40.63 | 55.46 | 3.91  | 20.00 | 6.00   | 1.49 | 15.12 |
| 33.51 | 17.53 | 15.99 | 40.81 | 46.08 | 13.11 | 20.00 | 7.00   | 1.95 | 12.16 |
| 19.66 | 13.06 | 6.60  | 14.76 | 40.10 | 45.14 | 23.00 | 7.00   | 1.83 | 10.37 |
| 37.69 | 21.31 | 16.39 | 22.20 | 61.47 | 16.33 | 22.00 | 8.00   | 1.80 | 7.00  |
| 34.21 | 21.56 | 12.65 | 27.22 | 54.27 | 18.51 | 22.00 | 87.00  | 1.95 | 11.19 |
| 31.82 | 17.08 | 14.74 | 25.61 | 58.37 | 16.02 | 22.00 | 8.00   | 1.57 | 13.30 |



|       |       |       |       |       |       |       |        |      |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------|-------|
| 43.90 | 23.20 | 20.70 | 68.49 | 27.01 | 4.50  | 22.00 | 1.00   | 1.32 | 9.56  |
| 14.78 | 9.85  | 4.93  | 22.85 | 37.12 | 40.03 | 23.00 | 7.00   | 1.92 | 12.58 |
| 31.24 | 15.15 | 13.09 | 59.16 | 34.58 | 6.25  | 22.00 | 41.00  | 1.79 | 10.62 |
| 27.28 | 16.93 | 10.35 | 9.60  | 44.04 | 46.36 | 24.00 | 8.00   | 1.89 | 13.54 |
| 30.81 | 19.92 | 10.89 | 26.11 | 23.51 | 50.38 | 24.00 | 10.00  | 1.79 | 9.43  |
| 30.33 | 21.64 | 8.69  | 24.39 | 40.54 | 35.06 | 23.00 | 8.00   | 1.59 | 12.52 |
| 32.87 | 25.15 | 7.72  | 25.63 | 30.21 | 44.15 | 23.00 | 7.00   | 1.79 | 13.89 |
| 46.83 | 32.79 | 14.04 | 2.32  | 34.00 | 63.69 | 23.00 | 109.00 | 1.53 | 12.26 |
| 31.97 | 22.79 | 9.18  | 56.61 | 9.50  | 33.89 | 22.00 | 3.00   | 1.52 | 12.25 |
| 33.29 | 23.14 | 10.15 | 0.00  | 19.38 | 80.62 | 24.00 | 9.00   | 1.86 | 10.97 |
| 30.78 | 21.46 | 9.33  | 69.49 | 15.27 | 15.24 | 22.00 | 3.00   | 1.71 | 9.64  |
| 31.47 | 22.34 | 9.12  | 57.69 | 23.25 | 19.06 | 22.00 | 4.00   | 1.93 | 10.70 |
| 32.69 | 22.32 | 10.37 | 36.18 | 44.95 | 18.88 | 22.00 | 7.00   | 1.77 | 10.62 |
| 27.70 | 17.65 | 10.04 | 18.10 | 44.85 | 37.05 | 24.00 | 7.00   | 1.86 | 11.73 |
| 32.05 | 22.91 | 9.31  | 42.41 | 33.11 | 24.49 | 22.00 | 4.00   | 1.78 | 10.12 |
| 30.35 | 20.73 | 9.62  | 60.02 | 14.99 | 24.98 | 22.00 | 3.00   | 1.97 | 11.05 |
| 29.96 | 18.88 | 11.08 | 51.29 | 41.38 | 7.33  | 20.00 | 31.00  | 1.79 | 8.59  |
| 33.19 | 22.61 | 10.59 | 51.29 | 41.38 | 7.33  | 20.00 | 31.00  | 1.58 | 13.81 |
| 34.35 | 23.84 | 10.51 | 51.29 | 41.38 | 7.33  | 20.00 | 31.00  | 1.51 | 12.38 |
| 32.90 | 23.39 | 9.51  | 61.91 | 22.46 | 15.64 | 20.00 | 3.00   | 1.60 | 12.53 |
| 32.80 | 23.32 | 9.48  | 43.94 | 44.67 | 11.39 | 22.00 | 68.00  | 1.57 | 12.74 |
| 31.59 | 22.03 | 9.56  | 49.53 | 35.70 | 14.77 | 22.00 | 4.00   | 1.29 | 11.49 |
| 30.72 | 19.20 | 11.52 | 60.21 | 34.06 | 5.72  | 20.00 | 31.00  | 1.59 | 12.83 |
| 25.80 | 18.14 | 7.66  | 35.77 | 42.77 | 21.46 | 22.00 | 7.00   | 1.46 | 11.52 |
| 26.17 | 18.86 | 7.32  | 42.28 | 41.97 | 15.75 | 20.00 | 3.00   | 2.17 | 4.37  |
| 35.21 | 23.16 | 12.04 | 40.61 | 50.34 | 9.05  | 20.00 | 31.00  | 2.08 | 3.56  |
| 34.79 | 23.70 | 11.09 | 23.36 | 60.32 | 16.32 | 20.00 | 7.00   | 2.17 | 4.37  |
| 35.21 | 23.16 | 12.04 | 39.00 | 53.40 | 7.59  | 20.00 | 31.00  | 2.08 | 3.58  |
| 34.79 | 23.70 | 11.09 | 39.08 | 52.86 | 8.06  | 20.00 | 75.00  | 2.05 | 6.33  |
| 32.28 | 23.08 | 9.10  | 24.04 | 50.02 | 25.95 | 22.00 | 8.00   | 1.92 | 2.47  |
| 33.19 | 24.92 | 8.26  | 45.10 | 44.35 | 10.35 | 20.00 | 41.00  | 1.70 | 22.45 |
| 34.90 | 26.20 | 8.70  | 47.28 | 42.46 | 10.26 | 20.00 | 41.00  | 1.63 | 20.41 |
| 36.87 | 19.31 | 17.56 | 42.65 | 44.82 | 12.53 | 20.00 | 78.00  | 1.58 | 19.34 |
| 29.22 | 16.71 | 12.51 | 46.02 | 36.73 | 17.26 | 22.00 | 4.00   | 1.53 | 13.70 |
| 29.25 | 19.97 | 9.28  | 65.29 | 17.76 | 16.96 | 22.00 | 4.00   | 1.46 | 12.12 |

|       |       |       |       |       |       |       |        |      |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------|-------|
| 30.77 | 22.57 | 8.19  | 5.98  | 42.17 | 51.85 | 24.00 | 10.00  | 1.60 | 16.02 |
| 31.99 | 17.83 | 14.16 | 6.04  | 18.31 | 75.65 | 24.00 | 12.00  | 1.46 | 14.23 |
| 27.50 | 18.45 | 9.05  | 42.67 | 48.36 | 8.97  | 20.00 | 53.00  | 1.42 | 11.26 |
| 29.50 | 17.38 | 12.12 | 29.74 | 31.59 | 38.68 | 23.00 | 87.00  | 1.64 | 18.30 |
| 24.60 | 15.42 | 9.18  | 26.72 | 41.63 | 31.65 | 22.00 | 8.00   | 1.65 | 10.30 |
| 45.26 | 19.19 | 26.07 | 41.51 | 44.74 | 13.75 | 20.00 | 7.00   | 1.53 | 9.34  |
| 46.60 | 28.20 | 18.30 | 30.71 | 30.48 | 38.81 | 23.00 | 4.00   | 1.70 | 9.80  |
| 26.56 | 20.29 | 6.27  | 61.37 | 27.68 | 10.95 | 20.00 | 32.00  | 1.59 | 7.47  |
| 27.56 | 18.90 | 8.66  | 58.24 | 30.40 | 11.36 | 20.00 | 32.00  | 1.43 | 19.90 |
| 24.77 | 17.49 | 7.27  | 21.11 | 28.02 | 50.88 | 24.00 | 10.00  | 1.35 | 16.62 |
| 19.44 | 15.23 | 4.21  | 13.21 | 67.99 | 18.80 | 20.00 | 7.00   | 1.32 | 9.37  |
| 25.92 | 15.68 | 10.24 | 8.71  | 40.83 | 50.46 | 23.00 | 9.00   | 1.65 | 13.57 |
| 30.27 | 17.89 | 12.38 | 1.29  | 43.51 | 55.21 | 24.00 | 12.00  | 1.60 | 12.28 |
| 25.91 | 16.16 | 9.75  | 5.75  | 46.38 | 47.87 | 23.00 | 7.00   | 1.55 | 12.03 |
| 29.74 | 31.63 | 8.11  | 40.26 | 54.60 | 5.14  | 20.00 | 67.00  | 1.86 | 10.51 |
| 19.05 | 15.26 | 3.79  | 10.54 | 24.46 | 65.00 | 22.00 | 23.00  | 1.75 | 9.46  |
| 29.78 | 21.53 | 8.25  | 66.01 | 25.21 | 8.78  | 22.00 | 41.00  | 1.73 | 9.04  |
| 23.58 | 14.84 | 8.74  | 40.25 | 52.11 | 7.65  | 20.00 | 243.00 | 1.91 | 9.60  |
| 27.56 | 16.57 | 10.99 | 54.02 | 30.51 | 15.47 | 20.00 | 67.00  | 1.83 | 9.62  |
| 29.56 | 17.98 | 11.58 | 54.07 | 34.33 | 11.60 | 22.00 | 234.00 | 1.68 | 17.20 |
| 19.60 | 15.50 | 4.10  | 53.22 | 36.75 | 10.03 | 20.00 | 234.00 | 1.58 | 16.30 |
| 28.66 | 21.68 | 6.98  | 34.29 | 36.91 | 28.80 | 22.00 | 78.00  | 1.54 | 15.03 |
| 24.38 | 19.74 | 4.64  | 53.22 | 36.75 | 10.03 | 20.00 | 234.00 | 1.48 | 16.22 |
| 42.80 | ..32  | 9.48  | 52.05 | 39.08 | 8.87  | 20.00 | 41.00  | 1.34 | 14.16 |
| 24.48 | 16.71 | 7.78  | 62.89 | 22.64 | 14.48 | 22.00 | 43.00  | 2.16 | 6.12  |
| 35.92 | 27.47 | 8.45  | 1.05  | 24.88 | 74.07 | 24.00 | 10.00  | 2.15 | 4.26  |
| 26.00 | 17.80 | 8.20  | 1.68  | 22.43 | 75.88 | 23.00 | 9.00   | 2.12 | 3.46  |
| 25.82 | 19.33 | 6.49  | 9.94  | 44.61 | 45.44 | 24.00 | 7.00   | 1.64 | 21.28 |
| 26.09 | 19.81 | 6.27  | 39.00 | 53.40 | 7.59  | 20.00 | 57.00  | 1.51 | 20.31 |
| 43.03 | 30.99 | 12.04 | 24.04 | 50.02 | 25.95 | 22.00 | 8.00   | 1.46 | 19.08 |
| 24.64 | 16.92 | 7.72  | 4.33  | 28.49 | 67.17 | 23.00 | 9.00   | 1.79 | 18.60 |
| 42.39 | 24.81 | 17.58 | 50.62 | 20.24 | 29.14 | 22.00 | 3.00   | 1.64 | 17.26 |
| 49.12 | 30.59 | 18.53 | 76.82 | 18.52 | 4.66  | 22.00 | 1.00   | 1.57 | 15.35 |
| 30.97 | 25.38 | 5.59  | 2.19  | 10.31 | 87.50 | 24.00 | 12.00  | 1.73 | 9.73  |
| 28.60 | 23.12 | 5.47  | 20.25 | 47.78 | 31.97 | 22.00 | 7.00   | 1.65 | 8.40  |

|       |       |       |       |       |       |       |        |      |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------|-------|
| 26.68 | 22.57 | 4.11  | 23.21 | 40.17 | 36.62 | 23.00 | 7.00   | 1.56 | 7.13  |
| 29.45 | 18.93 | 10.52 | 58.74 | 29.69 | 11.57 | 20.00 | 23.00  | 1.99 | 8.87  |
| 36.76 | 23.09 | 13.67 | 68.32 | 26.18 | 5.50  | 20.00 | 41.00  | 1.90 | 7.00  |
| 33.04 | 20.25 | 12.80 | 44.44 | 36.36 | 19.21 | 20.00 | 3.00   | 1.85 | 6.53  |
| 20.90 | 16.13 | 4.77  | 0.00  | 22.83 | 77.17 | 24.00 | 10.00  | 1.78 | 5.40  |
| 38.22 | 22.24 | 15.98 | 24.89 | 41.32 | 33.79 | 23.00 | 8.00   | 1.76 | 12.07 |
| 37.57 | 23.23 | 14.34 | 52.03 | 32.60 | 15.37 | 23.00 | 4.00   | 1.67 | 11.21 |
| 35.53 | 23.64 | 11.89 | 26.46 | 57.31 | 16.22 | 20.00 | 7.00   | 1.64 | 8.00  |
| 33.28 | 23.44 | 9.83  | 25.54 | 58.35 | 16.11 | 20.00 | 8.00   | 1.70 | 13.64 |
| 33.07 | 23.08 | 9.99  | 50.00 | 43.11 | 6.89  | 20.00 | 134.00 | 1.66 | 12.30 |
| 24.44 | 17.99 | 6.45  | 36.30 | 39.93 | 23.77 | 23.00 | 87.00  | 1.85 | 8.63  |
| 23.26 | 17.15 | 6.11  | 45.21 | 33.72 | 21.02 | 23.00 | 4.00   | 1.75 | 7.52  |
| 42.12 | 32.18 | 9.94  | 0.24  | 9.62  | 90.14 | 24.00 | 9.00   | 1.71 | 4.00  |
| 42.63 | 33.97 | 8.66  | 8.00  | 33.30 | 58.70 | 23.00 | 109.00 | 2.05 | 6.33  |
| 37.48 | 25.07 | 12.41 | 13.72 | 18.64 | 67.64 | 23.00 | 9.00   | 1.96 | 5.03  |
| 39.99 | 22.83 | 17.15 | 24.83 | 38.03 | 37.13 | 23.00 | 8.00   | 1.92 | 3.42  |
| 38.92 | 22.82 | 16.10 | 20.89 | 73.48 | 5.64  | 22.00 | 68.00  | 2.12 | 6.46  |
| 25.15 | 19.86 | 5.29  | 9.44  | 46.73 | 43.83 | 23.00 | 8.00   | 1.96 | 5.38  |
| 26.55 | 20.85 | 5.69  | 23.28 | 38.70 | 38.02 | 23.00 | 8.00   | 1.92 | 3.00  |
| 36.63 | 24.22 | 12.41 | 65.42 | 24.73 | 9.85  | 22.00 | 34.00  | 1.98 | 10.58 |
| 30.61 | 24.97 | 5.64  | 22.88 | 38.56 | 38.57 | 24.00 | 8.00   | 1.88 | 9.12  |
| 31.95 | 22.29 | 9.66  | 9.44  | 46.73 | 43.83 | 20.00 | 8.00   | 1.79 | 5.00  |
| 30.61 | 26.98 | 3.63  | 1.63  | 20.56 | 77.81 | 24.00 | 10.00  | 1.97 | 12.00 |
| 32.39 | 23.13 | 9.26  | 49.18 | 26.28 | 24.54 | 22.00 | 4.00   | 2.03 | 10.72 |
| 26.22 | 20.01 | 6.21  | 55.39 | 14.19 | 30.42 | 22.00 | 4.00   | 1.75 | 9.23  |
| 26.97 | 17.00 | 9.98  | 41.72 | 38.60 | 19.68 | 22.00 | 3.00   | 1.71 | 6.03  |
| 44.88 | 33.11 | 11.77 | 30.67 | 38.07 | 31.26 | 22.00 | 8.00   | 1.72 | 13.93 |
| 43.44 | 32.91 | 10.52 | 27.24 | 20.83 | 51.93 | 24.00 | 10.00  | 1.68 | 13.12 |
| 41.85 | 28.29 | 13.56 | 44.21 | 40.95 | 14.83 | 20.00 | 4.00   | 1.64 | 10.05 |
| 29.55 | 20.56 | 8.99  | 45.21 | 40.62 | 14.17 | 23.00 | 4.00   | 1.94 | 7.66  |
| 41.44 | 21.25 | 20.19 | 27.52 | 52.83 | 19.65 | 20.00 | 87.00  | 1.79 | 6.27  |
| 41.08 | 25.67 | 15.41 | 43.78 | 43.26 | 12.96 | 23.00 | 43.00  | 1.76 | 4.13  |
| 27.60 | 19.56 | 8.04  | 57.29 | 25.94 | 16.78 | 22.00 | 6.00   | 1.98 | 10.21 |
| 29.18 | 25.52 | 3.66  | 42.67 | 39.64 | 17.69 | 24.00 | 10.00  | 1.95 | 9.36  |
| 27.33 | 19.20 | 8.13  | 57.29 | 25.94 | 16.78 | 20.00 | 3.00   | 1.93 | 6.15  |

|       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| 32.79 | 22.86 | 9.94  | 33.89 | 22.31 | 43.80 | 24.00 | 4.00  | 1.99 | 10.24 |
| 31.03 | 24.10 | 6.93  | 19.31 | 16.62 | 64.07 | 24.00 | 10.00 | 1.90 | 6.03  |
| 21.02 | 14.49 | 6.52  | 76.53 | 19.10 | 4.36  | 23.00 | 1.00  | 1.61 | 14.99 |
| 24.89 | 18.65 | 6.24  | 38.24 | 28.53 | 33.22 | 22.00 | 4.00  | 1.33 | 13.03 |
| 24.14 | 18.04 | 6.10  | 37.45 | 16.86 | 45.69 | 24.00 | 4.00  | 1.28 | 7.54  |
| 26.36 | 19.48 | 6.88  | 29.89 | 29.34 | 40.77 | 24.00 | 4.00  | 1.56 | 14.74 |
| 41.32 | 30.82 | 10.50 | 0.31  | 15.70 | 83.99 | 24.00 | 13.00 | 1.42 | 12.31 |
| 26.57 | 19.35 | 7.22  | 45.32 | 22.99 | 31.69 | 22.00 | 4.00  | 1.36 | 8.03  |
| 46.14 | 29.51 | 16.63 | 24.54 | 27.92 | 47.54 | 24.00 | 8.00  | 2.05 | 6.33  |
| 47.38 | 24.83 | 22.95 | 0.92  | 8.77  | 90.31 | 24.00 | 13.00 | 1.98 | 4.38  |
| 20.89 | 15.23 | 5.66  | 19.61 | 27.33 | 53.06 | 24.00 | 10.00 | 1.92 | 1.13  |
| 20.08 | 15.08 | 5.00  | 47.30 | 29.39 | 23.30 | 22.00 | 4.00  | 2.17 | 4.37  |
| 38.22 | 25.52 | 12.70 | 38.50 | 38.35 | 23.15 | 22.00 | 4.00  | 2.11 | 3.48  |
| 37.67 | 25.18 | 12.49 | 45.28 | 40.28 | 14.44 | 22.00 | 4.00  | 2.09 | 2.15  |
| 23.20 | 16.36 | 6.36  | 22.43 | 49.75 | 27.82 | 22.00 | 8.00  | 1.60 | 15.00 |
| 22.98 | 16.77 | 6.21  | 22.99 | 52.23 | 24.78 | 22.00 | 41.00 | 1.40 | 13.00 |
| 21.68 | 15.44 | 6.25  | 10.54 | 24.46 | 65.00 | 23.00 | 10.00 | 1.35 | 10.24 |
| 19.59 | 14.65 | 4.94  | 0.44  | 7.86  | 91.71 | 23.00 | 9.00  | 1.64 | 21.28 |
| 19.10 | 15.18 | 3.93  | 0.00  | 13.51 | 86.49 | 23.00 | 9.00  | 1.53 | 20.40 |
| 18.75 | 14.67 | 4.08  | 3.59  | 30.59 | 65.83 | 23.00 | 9.00  | 1.47 | 18.00 |
| 17.23 | 13.25 | 3.98  | 46.00 | 38.23 | 15.77 | 20.00 | 3.00  | 1.43 | 16.00 |
| 23.20 | 15.38 | 7.81  | 53.60 | 34.40 | 12.00 | 20.00 | 41.00 | 1.65 | 20.09 |
| 22.98 | 15.94 | 7.04  | 62.72 | 29.43 | 7.85  | 20.00 | 4.00  | 1.55 | 19.23 |
| 23.40 | 13.84 | 9.56  | 57.56 | 36.95 | 5.49  | 20.00 | 4.00  | 1.53 | 15.00 |
| 27.36 | 16.72 | 10.64 | 47.00 | 31.92 | 21.08 | 22.00 | 3.00  | 1.85 | 12.82 |
| 24.38 | 16.44 | 7.94  | 59.84 | 28.83 | 11.33 | 20.00 | 32.00 | 1.75 | 10.49 |
| 24.69 | 16.67 | 8.02  | 54.26 | 29.47 | 16.27 | 20.00 | 3.00  | 1.77 | 15.72 |
| 31.54 | 21.06 | 10.48 | 73.10 | 20.18 | 6.72  | 20.00 | 32.00 | 1.65 | 13.42 |
| 32.37 | 20.98 | 11.39 | 4.71  | 12.64 | 82.64 | 24.00 | 10.00 | 1.63 | 14.81 |
| 20.18 | 14.11 | 6.07  | 2.12  | 23.75 | 74.13 | 24.00 | 10.00 | 1.35 | 12.67 |
| 19.04 | 13.80 | 5.24  | 54.72 | 35.66 | 9.62  | 22.00 | 32.00 | 1.25 | 9.73  |
| 20.25 | 13.77 | 6.47  | 52.87 | 39.51 | 7.62  | 22.00 | 3.00  | 1.72 | 13.60 |
| 20.63 | 13.82 | 6.82  | 13.13 | 24.16 | 62.72 | 24.00 | 10.00 | 1.67 | 11.57 |
| 18.73 | 13.38 | 5.36  | 45.16 | 48.11 | 6.73  | 20.00 | 67.00 | 1.61 | 9.03  |
| 19.29 | 13.45 | 5.84  | 38.45 | 53.83 | 4.73  | 20.00 | 6.00  | 1.65 | 17.59 |

|       |       |       |         |       |       |       |       |      |       |
|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| 20.18 | 14.11 | 6.07  | 57.19   | 17.05 | 25.76 | 22.00 | 3.00  | 1.55 | 16.04 |
| 19.04 | 13.80 | 5.24  | 28.65   | 42.83 | 28.53 | 22.00 | 8.00  | 1.50 | 12.12 |
| 26.63 | 17.60 | 9.03  | 39.69   | 28.56 | 31.75 | 22.00 | 4.00  | 1.68 | 18.10 |
| 25.77 | 17.43 | 8.34  | 0.16    | 15.79 | 84.05 | 24.00 | 10.00 | 1.58 | 16.35 |
| 20.05 | 13.62 | 6.43  | 1.05    | 24.88 | 74.07 | 24.00 | 10.00 | 1.52 | 12.16 |
| 20.94 | 14.41 | 6.53  | 0.68    | 17.49 | 81.83 | 23.00 | 10.00 | 2.01 | 5.53  |
| 25.89 | 18.10 | 7.79  | 9.94    | 44.61 | 45.44 | 23.00 | 7.00  | 1.90 | 3.47  |
| 26.57 | 19.35 | 7.22  | 1.68    | 22.43 | 75.88 | 23.00 | 9.00  | 1.88 | 2.06  |
| 26.82 | 18.41 | 8.41  | 4.33    | 28.49 | 67.17 | 23.00 | 8.00  | 1.91 | 11.17 |
| 27.36 | 19.46 | 7.91  | 50.62   | 20.24 | 29.14 | 22.00 | 3.00  | 1.80 | 8.00  |
| 19.94 | 15.30 | 4.65  | 7682.00 | 18.52 | 4.66  | 22.00 | 1.00  | 1.77 | 6.48  |
| 18.95 | 13.79 | 5.15  | 79.10   | 14.44 | 6.45  | 22.00 | 24.00 | 1.43 | 19.90 |
| 24.31 | 16.53 | 7.78  | 59.66   | 9.21  | 31.13 | 22.00 | 3.00  | 1.39 | 17.32 |
| 24.29 | 16.76 | 7.53  | 0.68    | 17.49 | 81.83 | 22.00 | 10.00 | 1.35 | 15.23 |
| 19.77 | 13.62 | 6.15  | 9.94    | 44.61 | 45.44 | 23.00 | 7.00  | 1.72 | 9.06  |
| 21.95 | 15.08 | 6.87  | 1.68    | 22.43 | 75.88 | 23.00 | 9.00  | 1.64 | 8.12  |
| 37.60 | 26.41 | 11.19 | 1.05    | 24.88 | 74.07 | 23.00 | 10.00 | 1.59 | 7.03  |
| 38.18 | 26.43 | 11.75 | 0.38    | 11.40 | 88.22 | 24.00 | 10.00 | 1.55 | 6.00  |
| 30.15 | 23.08 | 7.07  | 1.63    | 20.56 | 77.81 | 24.00 | 9.00  | 1.71 | 11.20 |
| 29.16 | 20.32 | 8.84  | 49.18   | 26.28 | 24.54 | 22.00 | 4.00  | 1.65 | 10.24 |
| 29.26 | 19.28 | 9.98  | 20.30   | 41.89 | 37.81 | 24.00 | 8.00  | 1.62 | 8.12  |
| 20.15 | 17.23 | 2.92  | 43.87   | 22.09 | 34.05 | 22.00 | 4.00  | 1.67 | 10.24 |
| 28.47 | 19.44 | 9.03  | 55.39   | 14.19 | 30.42 | 22.00 | 4.00  | 1.58 | 7.64  |
| 23.57 | 18.30 | 5.27  | 8.29    | 16.16 | 75.54 | 24.00 | 10.00 | 1.55 | 5.12  |
| 33.79 | 22.69 | 11.11 | 9.59    | 34.29 | 56.13 | 23.00 | 10.00 | 1.70 | 10.88 |
| 32.71 | 21.23 | 11.48 | 2.56    | 22.31 | 75.12 | 24.00 | 13.00 | 1.63 | 9.32  |
| 36.62 | 24.32 | 12.30 | 3.81    | 22.53 | 73.66 | 24.00 | 10.00 | 1.54 | 8.23  |
| 36.08 | 23.14 | 12.95 | 18.91   | 35.22 | 45.87 | 23.00 | 8.00  | 1.52 | 6.03  |
| 49.13 | 29.60 | 19.60 | 27.15   | 26.82 | 46.03 | 23.00 | 4.00  | 1.76 | 9.42  |
| 32.03 | 21.79 | 10.24 | 7.92    | 26.12 | 65.96 | 23.00 | 10.00 | 1.68 | 8.67  |
| 49.67 | 28.14 | 21.53 | 27.94   | 25.11 | 46.95 | 24.00 | 4.00  | 1.65 | 18.72 |
| 42.27 | 25.03 | 17.25 | 47.14   | 47.34 | 5.52  | 20.00 | 81.00 | 1.57 | 17.12 |
| 45.03 | 25.08 | 19.95 | 16.68   | 16.51 | 66.81 | 24.00 | 12.00 | 1.48 | 13.42 |
| 30.61 | 20.41 | 10.20 | 15.31   | 14.54 | 70.14 | 24.00 | 9.00  | 1.43 | 9.12  |
| 42.63 | 29.07 | 13.56 | 22.36   | 18.22 | 59.42 | 24.00 | 12.00 | 1.62 | 16.85 |

|       |       |       |       |       |       |       |        |      |         |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------|---------|
| 35.61 | 23.23 | 12.38 | 23.56 | 21.55 | 54.89 | 24.00 | 10.00  | 1.74 | 1107.00 |
| 31.96 | 21.35 | 10.60 | 49.21 | 28.34 | 22.45 | 22.00 | 3.00   | 1.69 | 10.00   |
| 53.62 | 26.54 | 27.09 | 46.44 | 26.90 | 26.67 | 22.00 | 3.00   | 1.68 | 7.32    |
| 44.08 | 21.70 | 22.37 | 43.66 | 24.33 | 32.02 | 22.00 | 3.00   | 1.73 | 10.33   |
| 52.08 | 28.60 | 23.48 | 38.66 | 31.66 | 29.69 | 22.00 | 4.00   | 1.67 | 12.81   |
| 36.24 | 23.42 | 12.82 | 38.03 | 29.19 | 32.77 | 22.00 | 3.00   | 1.69 | 12.09   |
| 40.96 | 25.82 | 15.14 | 42.35 | 22.10 | 35.55 | 24.00 | 4.00   | 1.86 | 13.57   |
| 25.46 | 17.88 | 7.58  | 66.33 | 18.26 | 15.40 | 22.00 | 3.00   | 1.80 | 12.45   |
| 29.51 | 21.29 | 8.21  | 40.77 | 24.58 | 34.65 | 22.00 | 4.00   | 1.75 | 8.03    |
| 29.37 | 21.44 | 7.92  | 42.41 | 33.11 | 24.49 | 22.00 | 4.00   | 2.05 | 6.33    |
| 33.84 | 23.50 | 10.34 | 5.21  | 19.81 | 74.97 | 24.00 | 9.00   | 1.91 | 1.23    |
| 44.04 | 31.16 | 12.88 | 54.03 | 28.19 | 17.78 | 22.00 | 43.00  | 2.17 | 4.37    |
| 41.32 | 30.82 | 10.50 | 29.46 | 32.16 | 38.38 | 24.00 | 7.00   | 2.05 | 6.33    |
| 26.57 | 19.35 | 7.22  | 41.46 | 32.70 | 25.84 | 22.00 | 43.00  | 1.97 | 5.31    |
| 14.78 | 9.85  | 4.93  | 72.15 | 21.03 | 6.82  | 20.00 | 41.00  | 1.95 | 7.32    |
| 14.78 | 9.85  | 4.93  | 22.00 | 6.44  | 71.55 | 24.00 | 9.00   | 1.88 | 5.38    |
| 42.67 | 36.15 | 6.52  | 39.75 | 8.96  | 51.29 | 23.00 | 109.00 | 1.95 | 7.32    |
| 35.44 | 19.13 | 16.30 | 20.65 | 44.29 | 35.06 | 24.00 | 8.00   | 1.88 | 5.68    |
| 35.07 | 24.39 | 10.68 | 34.13 | 44.01 | 21.86 | 20.00 | 87.00  | 2.02 | 8.21    |
| 35.69 | 23.54 | 12.15 | 63.75 | 30.02 | 6.23  | 20.00 | 23.00  | 1.48 | 20.48   |
| 39.83 | 25.46 | 14.37 | 50.26 | 37.50 | 12.24 | 20.00 | 4.00   | 1.34 | 22.27   |
| 39.04 | 27.49 | 11.56 | 50.24 | 37.52 | 12.24 | 20.00 | 4.00   | 1.53 | 27.83   |
| 40.00 | 25.62 | 14.39 | 0.00  | 41.82 | 58.18 | 23.00 | 9.00   | 1.41 | 16.15   |
| 47.36 | 29.96 | 17.40 | 21.99 | 19.20 | 58.81 | 23.00 | 10.00  | 1.51 | 20.44   |
| 37.15 | 28.86 | 8.29  | 24.98 | 59.92 | 15.09 | 20.00 | 8.00   | 1.39 | 18.45   |
| 41.05 | 25.67 | 15.38 | 53.23 | 39.12 | 7.65  | 22.00 | 41.00  | 1.53 | 20.82   |
| 42.06 | 30.59 | 11.47 | 62.48 | 30.90 | 6.61  | 22.00 | 24.00  | 1.34 | 27.98   |
| 41.49 | 25.51 | 15.98 | 46.42 | 37.83 | 15.74 | 22.00 | 4.00   | 1.52 | 21.46   |
| 35.79 | 26.12 | 9.67  | 34.25 | 48.10 | 17.65 | 20.00 | 8.00   | 1.50 | 21.33   |
| 35.34 | 22.85 | 12.50 | 32.41 | 46.08 | 21.51 | 22.00 | 9.00   | 1.86 | 13.57   |
| 35.29 | 27.26 | 8.03  | 38.96 | 34.08 | 26.97 | 22.00 | 4.00   | 1.86 | 13.57   |
| 22.46 | 16.81 | 5.65  | 43.09 | 36.20 | 20.71 | 22.00 | 4.00   | 1.81 | 13.00   |
| 28.58 | 21.11 | 7.47  | 74.20 | 18.92 | 6.58  | 22.00 | 23.00  | 1.53 | 20.82   |
| 23.21 | 17.88 | 5.33  | 79.33 | 15.45 | 5.22  | 22.00 | 23.00  | 1.87 | 13.57   |
| 23.21 | 19.06 | 4.16  | 76.07 | 20.61 | 3.32  | 22.00 | 1.00   | 1.85 | 6.54    |

|       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| 31.34 | 24.62 | 6.72  | 73.99 | 21.78 | 4.23  | 22.00 | 1.00  | 1.75 | 4.56  |
| 47.37 | 32.29 | 15.08 | 76.20 | 15.84 | 7.96  | 20.00 | 23.00 | 1.65 | 2.31  |
| 27.58 | 20.72 | 6.86  | 50.83 | 15.64 | 33.53 | 22.00 | 3.00  | 1.60 | 20.46 |
| 23.32 | 17.34 | 5.97  | 0.00  | 4.67  | 95.33 | 24.00 | 10.00 | 1.50 | 18.12 |
| 36.28 | 24.93 | 11.35 | 3.23  | 42.37 | 54.41 | 23.00 | 9.00  | 1.47 | 13.58 |
| 38.28 | 27.65 | 10.63 | 45.96 | 20.83 | 33.22 | 22.00 | 4.00  | 1.81 | 12.15 |
| 27.60 | 19.56 | 8.04  | 4.33  | 28.09 | 67.57 | 24.00 | 10.00 | 1.75 | 10.52 |
| 24.99 | 18.20 | 6.79  | 2.79  | 14.87 | 82.34 | 24.00 | 9.00  | 1.55 | 22.53 |
| 32.51 | 25.76 | 6.75  | 15.73 | 36.37 | 47.91 | 23.00 | 7.00  | 1.44 | 21.12 |
| 21.56 | 15.85 | 5.71  | 12.87 | 25.24 | 61.89 | 24.00 | 10.00 | 1.35 | 17.25 |
| 40.52 | 25.89 | 14.64 | 47.34 | 19.54 | 33.13 | 22.00 | 3.00  | 1.68 | 12.44 |
| 29.18 | 20.54 | 8.64  | 26.94 | 23.37 | 49.70 | 23.00 | 3.00  | 1.61 | 15.23 |
| 39.67 | 24.47 | 15.20 | 63.36 | 20.47 | 16.17 | 20.00 | 3.00  | 1.50 | 14.00 |
| 27.94 | 19.44 | 8.51  | 0.00  | 34.43 | 65.57 | 23.00 | 9.00  | 1.46 | 12.35 |
| 26.36 | 19.48 | 6.88  | 5.09  | 40.23 | 54.67 | 24.00 | 13.00 | 1.63 | 11.38 |
| 44.04 | 31.16 | 12.88 | 0.00  | 32.81 | 67.19 | 24.00 | 9.00  | 1.46 | 10.01 |
| 41.32 | 30.82 | 10.50 | 29.14 | 38.12 | 32.74 | 22.00 | 8.00  | 1.40 | 8.45  |
| 22.13 | 13.99 | 8.15  | 16.08 | 47.45 | 36.47 | 23.00 | 8.00  | 1.70 | 12.18 |
| 25.79 | 13.96 | 11.84 | 70.70 | 8.69  | 20.61 | 22.00 | 4.00  | 1.63 | 11.10 |
| 27.62 | 18.53 | 9.10  | 55.92 | 10.83 | 33.25 | 22.00 | 4.00  | 1.60 | 9.00  |
| 20.21 | 13.49 | 6.71  | 8.10  | 12.79 | 79.10 | 24.00 | 10.00 | 1.51 | 16.96 |
| 28.29 | 18.48 | 9.82  | 36.14 | 44.91 | 18.95 | 22.00 | 8.00  | 1.40 | 15.00 |
| 19.93 | 14.97 | 4.96  | 31.88 | 54.34 | 13.79 | 22.00 | 8.00  | 1.82 | 16.44 |
| 20.75 | 15.00 | 5.75  | 14.59 | 12.14 | 73.27 | 24.00 | 9.00  | 1.71 | 19.25 |
| 20.53 | 14.81 | 5.72  | 45.29 | 17.33 | 37.38 | 24.00 | 3.00  | 1.78 | 17.76 |
| 18.74 | 14.98 | 3.76  | 2.25  | 13.49 | 84.26 | 24.00 | 9.00  | 1.71 | 19.25 |
| 19.15 | 14.98 | 4.17  | 0.24  | 18.23 | 81.54 | 23.00 | 10.00 | 1.78 | 17.76 |
| 19.92 | 14.91 | 5.01  | 43.95 | 15.69 | 40.36 | 23.00 | 3.00  | 1.64 | 23.10 |
| 22.13 | 13.99 | 8.15  | 35.22 | 46.61 | 18.17 | 22.00 | 8.00  | 1.93 | 10.75 |
| 25.79 | 13.96 | 11.84 | 34.12 | 50.24 | 15.64 | 22.00 | 8.00  | 1.77 | 9.12  |
| 29.35 | 18.89 | 10.46 | 64.14 | 23.42 | 12.44 | 22.00 | 4.00  | 1.70 | 6.57  |
| 27.62 | 18.53 | 9.10  | 51.29 | 41.38 | 7.33  | 20.00 | 31.00 | 1.85 | 11.86 |
| 29.39 | 17.02 | 12.38 | 55.33 | 36.20 | 8.47  | 20.00 | 41.00 | 1.99 | 8.84  |
| 20.21 | 13.49 | 6.71  | 90.72 | 5.32  | 3.95  | 22.00 | 1.00  | 2.19 | 8.80  |
| 32.49 | 18.91 | 13.57 | 85.57 | 11.23 | 3.19  | 22.00 | 1.00  | 1.98 | 8.72  |

Capítulo III. Método de la investigación

|       |       |      |       |       |       |       |        |      |        |
|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|--------|------|--------|
| 28.29 | 18.48 | 9.82 | 0.09  | 25.10 | 74.82 | 24.00 | 9.00   | 2.17 | 4.32   |
| 20.75 | 15.00 | 5.75 | 16.39 | 19.72 | 63.89 | 24.00 | 10.00  | 1.75 | 11.16  |
| 14.78 | 9.85  | 4.93 | 87.28 | 7.31  | 5.42  | 22.00 | 143.00 | 2.19 | 8.80   |
| 14.78 | 9.85  | 4.93 | 81.82 | 1.04  | 5.14  | 22.00 | 43.00  | 1.85 | 7.30   |
| 21.70 | 16.57 | 5.13 | 0.49  | 36.13 | 63.38 | 24.00 | 13.00  | 1.98 | 9.60   |
| 33.67 | 25.85 | 7.82 | 3.63  | 34.05 | 62.32 | 24.00 | 9.00   | 1.43 | 29.00  |
| 31.34 | 24.36 | 6.98 | 0.00  | 48.31 | 51.69 | 23.00 | 12.00  | 1.91 | 5.00   |
| 29.19 | 23.40 | 5.79 | 37.48 | 36.45 | 26.07 | 22.00 | 3.00   | 2.32 | 5.60   |
| 52.27 | 43.59 | 8.67 | 27.05 | 46.48 | 26.46 | 23.00 | 7.00   | 2.13 | 10.20  |
| 51.62 | 41.76 | 9.87 | 1.63  | 20.56 | 77.81 | 24.00 | 10.00  | 2.45 | 804.00 |
| 34.28 | 27.80 | 6.48 | 49.18 | 26.28 | 24.54 | 22.00 | 4.00   | 2.22 | 6.90   |
| 36.17 | 29.79 | 6.38 | 43.87 | 22.09 | 34.05 | 22.00 | 4.00   | 2.06 | 7.60   |

Fuente: Elaboración Propia utilizando el programa Win Edit



Tabla N°11: Parámetros o datos normalizados ingresados a la red neuronal artificial

| Límite líquido | Límite plástico | Índice plasticidad | % Grava | % Arena | % fina | AASTHO_N | SUCS_N | Máx. Dens. | Seca | Humedad Óptima |
|----------------|-----------------|--------------------|---------|---------|--------|----------|--------|------------|------|----------------|
| 0.517          | 0.488           | 0.537              | 0.499   | 0.494   | 0.561  | 0.456    | 0.495  | 0.446      |      | 0.503          |
| 0.588          | 0.511           | 0.621              | 0.498   | 0.620   | 0.493  | 0.706    | 0.493  | 0.519      |      | 0.497          |
| 0.588          | 0.523           | 0.607              | 0.498   | 0.538   | 0.572  | 0.456    | 0.495  | 0.420      |      | 0.500          |
| 0.446          | 0.469           | 0.449              | 0.498   | 0.593   | 0.532  | 0.706    | 0.495  | 0.386      |      | 0.501          |
| 0.557          | 0.617           | 0.468              | 0.498   | 0.599   | 0.523  | 0.456    | 0.495  | 0.644      |      | 0.496          |
| 0.520          | 0.572           | 0.458              | 0.499   | 0.451   | 0.555  | 0.706    | 0.493  | 0.500      |      | 0.501          |
| 0.529          | 0.545           | 0.498              | 0.499   | 0.544   | 0.453  | 0.456    | 0.495  | 0.481      |      | 0.500          |
| 0.480          | 0.502           | 0.468              | 0.499   | 0.603   | 0.375  | 0.456    | 0.495  | 0.653      |      | 0.496          |
| 0.448          | 0.472           | 0.450              | 0.499   | 0.529   | 0.339  | 0.456    | 0.492  | 0.612      |      | 0.496          |
| 0.449          | 0.528           | 0.396              | 0.499   | 0.643   | 0.360  | 0.206    | 0.494  | 0.612      |      | 0.496          |
| 0.482          | 0.508           | 0.466              | 0.498   | 0.482   | 0.682  | 0.706    | 0.495  | 0.614      |      | 0.496          |
| 0.486          | 0.515           | 0.464              | 0.498   | 0.504   | 0.663  | 0.706    | 0.496  | 0.426      |      | 0.502          |
| 0.564          | 0.601           | 0.494              | 0.498   | 0.437   | 0.717  | 0.581    | 0.496  | 0.343      |      | 0.511          |
| 0.516          | 0.557           | 0.468              | 0.498   | 0.524   | 0.649  | 0.581    | 0.495  | 0.664      |      | 0.494          |
| 0.489          | 0.491           | 0.493              | 0.498   | 0.486   | 0.678  | 0.581    | 0.496  | 0.604      |      | 0.496          |
| 0.508          | 0.582           | 0.429              | 0.498   | 0.580   | 0.603  | 0.706    | 0.496  | 0.668      |      | 0.495          |
| 0.817          | 0.663           | 0.810              | 0.499   | 0.489   | 0.344  | 0.456    | 0.493  | 0.558      |      | 0.497          |
| 0.519          | 0.602           | 0.427              | 0.498   | 0.578   | 0.508  | 0.706    | 0.495  | 0.594      |      | 0.497          |
| 0.488          | 0.536           | 0.446              | 0.499   | 0.543   | 0.343  | 0.456    | 0.493  | 0.560      |      | 0.496          |
| 0.458          | 0.470           | 0.469              | 0.499   | 0.520   | 0.343  | 0.456    | 0.492  | 0.558      |      | 0.497          |
| 0.477          | 0.505           | 0.461              | 0.499   | 0.488   | 0.328  | 0.456    | 0.492  | 0.594      |      | 0.497          |
| 0.372          | 0.388           | 0.421              | 0.498   | 0.494   | 0.613  | 0.581    | 0.496  | 0.560      |      | 0.496          |
| 0.440          | 0.462           | 0.448              | 0.499   | 0.454   | 0.391  | 0.456    | 0.493  | 0.637      |      | 0.496          |
| 0.485          | 0.467           | 0.512              | 0.499   | 0.404   | 0.484  | 0.456    | 0.493  | 0.446      |      | 0.503          |
| 0.446          | 0.451           | 0.453              | 0.498   | 0.330   | 0.798  | 0.706    | 0.496  | 0.519      |      | 0.497          |
| 0.543          | 0.616           | 0.448              | 0.499   | 0.408   | 0.410  | 0.456    | 0.493  | 0.420      |      | 0.500          |
| 0.548          | 0.606           | 0.466              | 0.498   | 0.380   | 0.745  | 0.706    | 0.495  | 0.386      |      | 0.501          |
| 0.434          | 0.478           | 0.423              | 0.498   | 0.626   | 0.489  | 0.456    | 0.495  | 0.596      |      | 0.496          |
| 0.416          | 0.418           | 0.457              | 0.499   | 0.459   | 0.394  | 0.456    | 0.493  | 0.410      |      | 0.501          |
| 0.459          | 0.470           | 0.469              | 0.499   | 0.611   | 0.436  | 0.456    | 0.495  | 0.418      |      | 0.504          |
| 0.477          | 0.505           | 0.461              | 0.499   | 0.611   | 0.405  | 0.456    | 0.495  | 0.386      |      | 0.501          |
| 0.416          | 0.418           | 0.457              | 0.498   | 0.656   | 0.409  | 0.456    | 0.495  | 0.420      |      | 0.500          |

|       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.412 | 0.414 | 0.455 | 0.498 | 0.726 | 0.465 | 0.456 | 0.495 | 0.519 | 0.497 |
| 0.603 | 0.527 | 0.627 | 0.498 | 0.723 | 0.363 | 0.206 | 0.494 | 0.446 | 0.503 |
| 0.495 | 0.524 | 0.469 | 0.499 | 0.538 | 0.398 | 0.456 | 0.493 | 0.637 | 0.496 |
| 0.593 | 0.480 | 0.660 | 0.498 | 0.587 | 0.494 | 0.706 | 0.495 | 0.460 | 0.501 |
| 0.699 | 0.592 | 0.705 | 0.498 | 0.568 | 0.593 | 0.706 | 0.496 | 0.465 | 0.502 |
| 0.681 | 0.609 | 0.661 | 0.498 | 0.400 | 0.744 | 0.706 | 0.497 | 0.462 | 0.502 |
| 0.596 | 0.505 | 0.639 | 0.498 | 0.524 | 0.649 | 0.581 | 0.496 | 0.664 | 0.494 |
| 0.609 | 0.588 | 0.574 | 0.498 | 0.400 | 0.744 | 0.706 | 0.497 | 0.418 | 0.504 |
| 0.571 | 0.666 | 0.439 | 0.498 | 0.524 | 0.649 | 0.581 | 0.496 | 0.410 | 0.501 |
| 0.576 | 0.560 | 0.553 | 0.498 | 0.486 | 0.678 | 0.581 | 0.495 | 0.596 | 0.496 |
| 0.612 | 0.615 | 0.552 | 0.498 | 0.580 | 0.603 | 0.581 | 0.496 | 0.460 | 0.501 |
| 0.569 | 0.597 | 0.506 | 0.499 | 0.483 | 0.372 | 0.456 | 0.493 | 0.465 | 0.502 |
| 0.581 | 0.539 | 0.582 | 0.499 | 0.491 | 0.365 | 0.456 | 0.493 | 0.462 | 0.502 |
| 0.326 | 0.328 | 0.412 | 0.500 | 0.454 | 0.340 | 0.206 | 0.492 | 0.621 | 0.495 |
| 0.433 | 0.471 | 0.428 | 0.499 | 0.475 | 0.352 | 0.456 | 0.493 | 0.420 | 0.500 |
| 0.429 | 0.469 | 0.424 | 0.499 | 0.587 | 0.363 | 0.456 | 0.493 | 0.386 | 0.501 |
| 0.391 | 0.436 | 0.401 | 0.499 | 0.561 | 0.361 | 0.456 | 0.493 | 0.388 | 0.508 |
| 0.502 | 0.575 | 0.427 | 0.499 | 0.706 | 0.369 | 0.456 | 0.494 | 0.388 | 0.508 |
| 0.439 | 0.474 | 0.434 | 0.498 | 0.762 | 0.429 | 0.456 | 0.495 | 0.446 | 0.503 |
| 0.416 | 0.453 | 0.421 | 0.498 | 0.752 | 0.406 | 0.456 | 0.495 | 0.420 | 0.500 |
| 0.404 | 0.441 | 0.416 | 0.498 | 0.704 | 0.395 | 0.456 | 0.495 | 0.386 | 0.501 |
| 0.433 | 0.463 | 0.436 | 0.499 | 0.517 | 0.415 | 0.456 | 0.493 | 0.624 | 0.496 |
| 0.391 | 0.436 | 0.401 | 0.499 | 0.535 | 0.425 | 0.456 | 0.493 | 0.579 | 0.495 |
| 0.412 | 0.457 | 0.411 | 0.498 | 0.310 | 0.813 | 0.706 | 0.496 | 0.382 | 0.501 |
| 0.419 | 0.463 | 0.416 | 0.498 | 0.394 | 0.733 | 0.706 | 0.496 | 0.664 | 0.494 |
| 0.433 | 0.493 | 0.408 | 0.498 | 0.346 | 0.784 | 0.706 | 0.495 | 0.637 | 0.496 |
| 0.394 | 0.436 | 0.405 | 0.498 | 0.367 | 0.768 | 0.706 | 0.496 | 0.446 | 0.503 |
| 0.326 | 0.328 | 0.412 | 0.498 | 0.465 | 0.560 | 0.706 | 0.495 | 0.431 | 0.501 |
| 0.391 | 0.436 | 0.401 | 0.498 | 0.469 | 0.664 | 0.706 | 0.496 | 0.505 | 0.498 |
| 0.502 | 0.575 | 0.442 | 0.499 | 0.487 | 0.382 | 0.456 | 0.493 | 0.547 | 0.496 |
| 0.439 | 0.474 | 0.434 | 0.499 | 0.489 | 0.419 | 0.456 | 0.493 | 0.420 | 0.500 |
| 0.416 | 0.453 | 0.421 | 0.499 | 0.507 | 0.414 | 0.456 | 0.493 | 0.386 | 0.501 |
| 0.404 | 0.441 | 0.416 | 0.498 | 0.306 | 0.814 | 0.706 | 0.503 | 0.632 | 0.496 |
| 0.433 | 0.463 | 0.436 | 0.498 | 0.334 | 0.794 | 0.706 | 0.496 | 0.579 | 0.495 |
| 0.391 | 0.436 | 0.401 | 0.498 | 0.314 | 0.807 | 0.706 | 0.497 | 0.382 | 0.501 |

|       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.412 | 0.457 | 0.411 | 0.498 | 0.400 | 0.744 | 0.706 | 0.496 | 0.602 | 0.497 |
| 0.419 | 0.463 | 0.416 | 0.498 | 0.368 | 0.769 | 0.706 | 0.495 | 0.330 | 0.506 |
| 0.433 | 0.493 | 0.408 | 0.498 | 0.442 | 0.665 | 0.581 | 0.496 | 0.401 | 0.504 |
| 0.394 | 0.436 | 0.405 | 0.499 | 0.423 | 0.459 | 0.456 | 0.493 | 0.386 | 0.505 |
| 0.427 | 0.477 | 0.413 | 0.499 | 0.498 | 0.463 | 0.456 | 0.493 | 0.664 | 0.494 |
| 0.517 | 0.488 | 0.537 | 0.498 | 0.432 | 0.719 | 0.706 | 0.496 | 0.484 | 0.499 |
| 0.588 | 0.511 | 0.621 | 0.498 | 0.418 | 0.704 | 0.706 | 0.495 | 0.602 | 0.497 |
| 0.588 | 0.523 | 0.607 | 0.499 | 0.362 | 0.569 | 0.706 | 0.493 | 0.539 | 0.500 |
| 0.446 | 0.469 | 0.449 | 0.499 | 0.455 | 0.356 | 0.206 | 0.493 | 0.489 | 0.503 |
| 0.557 | 0.617 | 0.468 | 0.499 | 0.567 | 0.349 | 0.206 | 0.492 | 0.480 | 0.502 |
| 0.520 | 0.572 | 0.458 | 0.499 | 0.641 | 0.351 | 0.206 | 0.494 | 0.497 | 0.500 |
| 0.529 | 0.545 | 0.498 | 0.499 | 0.514 | 0.434 | 0.456 | 0.493 | 0.510 | 0.502 |
| 0.480 | 0.502 | 0.468 | 0.498 | 0.597 | 0.466 | 0.456 | 0.495 | 0.562 | 0.498 |
| 0.448 | 0.472 | 0.450 | 0.499 | 0.529 | 0.411 | 0.456 | 0.493 | 0.501 | 0.503 |
| 0.449 | 0.528 | 0.396 | 0.499 | 0.492 | 0.392 | 0.456 | 0.504 | 0.495 | 0.500 |
| 0.482 | 0.508 | 0.466 | 0.499 | 0.518 | 0.371 | 0.456 | 0.578 | 0.601 | 0.496 |
| 0.486 | 0.515 | 0.464 | 0.499 | 0.530 | 0.346 | 0.456 | 0.497 | 0.629 | 0.496 |
| 0.544 | 0.601 | 0.494 | 0.499 | 0.485 | 0.339 | 0.456 | 0.497 | 0.483 | 0.499 |
| 0.516 | 0.557 | 0.468 | 0.499 | 0.538 | 0.458 | 0.456 | 0.495 | 0.664 | 0.494 |
| 0.489 | 0.491 | 0.493 | 0.499 | 0.538 | 0.458 | 0.456 | 0.495 | 0.604 | 0.497 |
| 0.508 | 0.582 | 0.429 | 0.499 | 0.465 | 0.442 | 0.456 | 0.493 | 0.532 | 0.500 |
| 0.817 | 0.663 | 0.810 | 0.500 | 0.414 | 0.376 | 0.456 | 0.493 | 0.565 | 0.497 |
| 0.519 | 0.602 | 0.427 | 0.499 | 0.391 | 0.426 | 0.456 | 0.493 | 0.678 | 0.496 |
| 0.488 | 0.536 | 0.446 | 0.499 | 0.484 | 0.433 | 0.456 | 0.493 | 0.625 | 0.496 |
| 0.454 | 0.455 | 0.477 | 0.498 | 0.585 | 0.525 | 0.581 | 0.495 | 0.411 | 0.507 |
| 0.658 | 0.628 | 0.608 | 0.498 | 0.751 | 0.461 | 0.456 | 0.495 | 0.395 | 0.505 |
| 0.817 | 0.663 | 0.810 | 0.498 | 0.635 | 0.445 | 0.456 | 0.495 | 0.587 | 0.496 |
| 0.519 | 0.602 | 0.427 | 0.499 | 0.570 | 0.454 | 0.456 | 0.495 | 0.580 | 0.496 |
| 0.488 | 0.536 | 0.446 | 0.498 | 0.352 | 0.765 | 0.706 | 0.496 | 0.591 | 0.496 |
| 0.516 | 0.557 | 0.468 | 0.498 | 0.377 | 0.661 | 0.706 | 0.497 | 0.580 | 0.496 |
| 0.489 | 0.491 | 0.493 | 0.499 | 0.406 | 0.406 | 0.456 | 0.493 | 0.584 | 0.495 |
| 0.508 | 0.582 | 0.429 | 0.498 | 0.407 | 0.675 | 0.706 | 0.496 | 0.590 | 0.496 |
| 0.482 | 0.508 | 0.466 | 0.498 | 0.440 | 0.702 | 0.706 | 0.496 | 0.581 | 0.496 |
| 0.486 | 0.515 | 0.464 | 0.499 | 0.440 | 0.477 | 0.456 | 0.493 | 0.495 | 0.498 |
| 0.564 | 0.601 | 0.494 | 0.498 | 0.474 | 0.560 | 0.706 | 0.495 | 0.544 | 0.497 |

|       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.520 | 0.572 | 0.458 | 0.498 | 0.342 | 0.784 | 0.706 | 0.497 | 0.427 | 0.497 |
| 0.529 | 0.545 | 0.498 | 0.498 | 0.470 | 0.589 | 0.706 | 0.496 | 0.426 | 0.503 |
| 0.480 | 0.502 | 0.468 | 0.498 | 0.389 | 0.737 | 0.706 | 0.496 | 0.405 | 0.500 |
| 0.446 | 0.469 | 0.449 | 0.499 | 0.428 | 0.533 | 0.706 | 0.493 | 0.479 | 0.498 |
| 0.557 | 0.617 | 0.468 | 0.499 | 0.397 | 0.550 | 0.706 | 0.493 | 0.515 | 0.501 |
| 0.517 | 0.488 | 0.537 | 0.499 | 0.483 | 0.524 | 0.706 | 0.493 | 0.450 | 0.499 |
| 0.588 | 0.511 | 0.621 | 0.498 | 0.398 | 0.716 | 0.706 | 0.496 | 0.488 | 0.497 |
| 0.588 | 0.523 | 0.607 | 0.498 | 0.389 | 0.751 | 0.706 | 0.503 | 0.473 | 0.498 |
| 0.427 | 0.477 | 0.413 | 0.499 | 0.447 | 0.567 | 0.706 | 0.493 | 0.483 | 0.498 |
| 0.644 | 0.548 | 0.667 | 0.499 | 0.460 | 0.542 | 0.706 | 0.493 | 0.484 | 0.493 |
| 0.394 | 0.380 | 0.462 | 0.498 | 0.396 | 0.646 | 0.706 | 0.496 | 0.457 | 0.497 |
| 0.415 | 0.364 | 0.510 | 0.500 | 0.413 | 0.333 | 0.456 | 0.492 | 0.415 | 0.500 |
| 0.514 | 0.451 | 0.571 | 0.499 | 0.478 | 0.485 | 0.456 | 0.493 | 0.453 | 0.498 |
| 0.467 | 0.406 | 0.544 | 0.998 | 0.470 | 0.582 | 0.706 | 0.496 | 0.408 | 0.500 |
| 0.446 | 0.441 | 0.478 | 0.498 | 0.463 | 0.583 | 0.706 | 0.496 | 0.431 | 0.500 |
| 0.445 | 0.428 | 0.489 | 0.498 | 0.424 | 0.627 | 0.706 | 0.496 | 0.420 | 0.500 |
| 0.524 | 0.400 | 0.637 | 0.499 | 0.435 | 0.540 | 0.706 | 0.493 | 0.412 | 0.500 |
| 0.539 | 0.428 | 0.631 | 0.499 | 0.460 | 0.398 | 0.206 | 0.493 | 0.512 | 0.496 |
| 0.389 | 0.377 | 0.457 | 0.499 | 0.555 | 0.403 | 0.206 | 0.493 | 0.524 | 0.496 |
| 0.326 | 0.328 | 0.412 | 0.498 | 0.438 | 0.615 | 0.581 | 0.495 | 0.532 | 0.497 |
| 0.658 | 0.628 | 0.608 | 0.498 | 0.425 | 0.663 | 0.706 | 0.495 | 0.495 | 0.498 |
| 0.454 | 0.455 | 0.477 | 0.499 | 0.412 | 0.591 | 0.706 | 0.496 | 0.485 | 0.498 |
| 0.663 | 0.548 | 0.667 | 0.498 | 0.453 | 0.699 | 0.706 | 0.496 | 0.500 | 0.501 |
| 0.394 | 0.380 | 0.462 | 0.498 | 0.360 | 0.773 | 0.706 | 0.496 | 0.481 | 0.500 |
| 0.415 | 0.364 | 0.510 | 0.498 | 0.390 | 0.751 | 0.706 | 0.496 | 0.644 | 0.496 |
| 0.514 | 0.451 | 0.571 | 0.498 | 0.402 | 0.740 | 0.581 | 0.496 | 0.672 | 0.496 |
| 0.467 | 0.406 | 0.544 | 0.498 | 0.555 | 0.580 | 0.706 | 0.495 | 0.552 | 0.497 |
| 0.446 | 0.441 | 0.478 | 0.498 | 0.436 | 0.708 | 0.581 | 0.495 | 0.514 | 0.500 |
| 0.445 | 0.428 | 0.489 | 0.498 | 0.478 | 0.663 | 0.581 | 0.495 | 0.612 | 0.498 |
| 0.524 | 0.400 | 0.637 | 0.498 | 0.385 | 0.651 | 0.706 | 0.495 | 0.375 | 0.508 |
| 0.539 | 0.428 | 0.631 | 0.498 | 0.444 | 0.599 | 0.581 | 0.496 | 0.437 | 0.499 |
| 0.389 | 0.377 | 0.457 | 0.498 | 0.386 | 0.634 | 0.581 | 0.496 | 0.659 | 0.496 |
| 0.395 | 0.428 | 0.415 | 0.498 | 0.351 | 0.772 | 0.581 | 0.495 | 0.442 | 0.503 |
| 0.520 | 0.572 | 0.458 | 0.498 | 0.368 | 0.769 | 0.706 | 0.495 | 0.581 | 0.497 |
| 0.529 | 0.545 | 0.498 | 0.499 | 0.514 | 0.433 | 0.456 | 0.493 | 0.615 | 0.497 |

|       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.480 | 0.502 | 0.468 | 0.499 | 0.547 | 0.409 | 0.456 | 0.493 | 0.452 | 0.502 |
| 0.482 | 0.556 | 0.466 | 0.499 | 0.384 | 0.441 | 0.706 | 0.496 | 0.614 | 0.497 |
| 0.486 | 0.515 | 0.464 | 0.499 | 0.436 | 0.392 | 0.456 | 0.494 | 0.498 | 0.498 |
| 0.564 | 0.601 | 0.494 | 0.499 | 0.641 | 0.351 | 0.206 | 0.497 | 0.495 | 0.499 |
| 0.516 | 0.557 | 0.468 | 0.498 | 0.454 | 0.689 | 0.706 | 0.496 | 0.480 | 0.500 |
| 0.489 | 0.491 | 0.493 | 0.498 | 0.498 | 0.627 | 0.706 | 0.496 | 0.620 | 0.496 |
| 0.508 | 0.582 | 0.429 | 0.498 | 0.619 | 0.567 | 0.706 | 0.495 | 0.538 | 0.499 |
| 0.547 | 0.484 | 0.586 | 0.498 | 0.746 | 0.365 | 0.206 | 0.512 | 0.434 | 0.503 |
| 0.519 | 0.602 | 0.427 | 0.499 | 0.350 | 0.630 | 0.706 | 0.496 | 0.479 | 0.501 |
| 0.488 | 0.536 | 0.446 | 0.499 | 0.335 | 0.609 | 0.706 | 0.496 | 0.519 | 0.500 |
| 0.490 | 0.451 | 0.534 | 0.499 | 0.581 | 0.414 | 0.206 | 0.523 | 0.460 | 0.498 |
| 0.621 | 0.455 | 0.726 | 0.499 | 0.537 | 0.363 | 0.206 | 0.500 | 0.510 | 0.499 |
| 0.517 | 0.488 | 0.537 | 0.499 | 0.585 | 0.392 | 0.206 | 0.495 | 0.532 | 0.499 |
| 0.588 | 0.511 | 0.621 | 0.499 | 0.593 | 0.449 | 0.456 | 0.495 | 0.509 | 0.498 |
| 0.588 | 0.523 | 0.607 | 0.499 | 0.567 | 0.447 | 0.456 | 0.495 | 0.522 | 0.498 |
| 0.446 | 0.469 | 0.449 | 0.498 | 0.539 | 0.514 | 0.706 | 0.495 | 0.608 | 0.498 |
| 0.657 | 0.655 | 0.579 | 0.499 | 0.539 | 0.478 | 0.456 | 0.495 | 0.452 | 0.501 |
| 0.557 | 0.617 | 0.468 | 0.499 | 0.425 | 0.583 | 0.706 | 0.496 | 0.502 | 0.498 |
| 0.520 | 0.572 | 0.458 | 0.498 | 0.532 | 0.562 | 0.581 | 0.495 | 0.496 | 0.499 |
| 0.529 | 0.545 | 0.498 | 0.499 | 0.538 | 0.397 | 0.206 | 0.493 | 0.546 | 0.499 |
| 0.480 | 0.502 | 0.468 | 0.498 | 0.760 | 0.449 | 0.456 | 0.495 | 0.446 | 0.502 |
| 0.482 | 0.508 | 0.466 | 0.498 | 0.490 | 0.542 | 0.581 | 0.495 | 0.546 | 0.499 |
| 0.486 | 0.515 | 0.464 | 0.498 | 0.550 | 0.616 | 0.706 | 0.496 | 0.578 | 0.495 |
| 0.564 | 0.601 | 0.494 | 0.498 | 0.464 | 0.683 | 0.706 | 0.495 | 0.656 | 0.496 |
| 0.516 | 0.557 | 0.468 | 0.498 | 0.640 | 0.452 | 0.456 | 0.495 | 0.668 | 0.496 |
| 0.489 | 0.491 | 0.493 | 0.498 | 0.313 | 0.810 | 0.706 | 0.496 | 0.666 | 0.495 |
| 0.508 | 0.582 | 0.429 | 0.498 | 0.573 | 0.596 | 0.581 | 0.495 | 0.531 | 0.499 |
| 0.547 | 0.484 | 0.586 | 0.499 | 0.550 | 0.333 | 0.206 | 0.492 | 0.546 | 0.499 |
| 0.519 | 0.602 | 0.427 | 0.499 | 0.567 | 0.348 | 0.206 | 0.497 | 0.523 | 0.499 |
| 0.488 | 0.536 | 0.446 | 0.498 | 0.657 | 0.414 | 0.456 | 0.523 | 0.544 | 0.496 |
| 0.490 | 0.451 | 0.534 | 0.499 | 0.567 | 0.349 | 0.206 | 0.497 | 0.532 | 0.497 |
| 0.621 | 0.455 | 0.726 | 0.499 | 0.439 | 0.399 | 0.456 | 0.493 | 0.548 | 0.496 |
| 0.463 | 0.490 | 0.454 | 0.498 | 0.657 | 0.414 | 0.456 | 0.523 | 0.552 | 0.496 |
| 0.661 | 0.616 | 0.625 | 0.498 | 0.619 | 0.493 | 0.456 | 0.495 | 0.518 | 0.497 |
| 0.544 | 0.509 | 0.556 | 0.498 | 0.538 | 0.572 | 0.581 | 0.495 | 0.520 | 0.497 |

Capítulo III. Método de la investigación

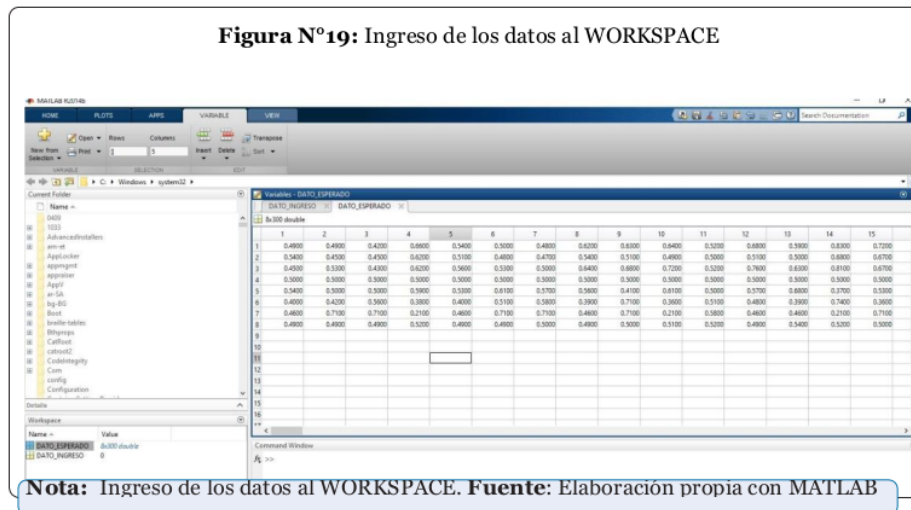
|       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.503 | 0.476 | 0.528 | 0.498 | 0.593 | 0.532 | 0.706 | 0.495 | 0.600 | 0.496 |
| 0.480 | 0.466 | 0.504 | 0.498 | 0.599 | 0.523 | 0.581 | 0.495 | 0.594 | 0.497 |
| 0.619 | 0.541 | 0.636 | 0.499 | 0.451 | 0.555 | 0.706 | 0.493 | 0.512 | 0.500 |
| 0.632 | 0.512 | 0.685 | 0.499 | 0.544 | 0.453 | 0.456 | 0.495 | 0.471 | 0.501 |
| 0.641 | 0.490 | 0.720 | 0.498 | 0.585 | 0.554 | 0.706 | 0.495 | 0.462 | 0.501 |
| 0.515 | 0.502 | 0.521 | 0.498 | 0.443 | 0.575 | 0.706 | 0.496 | 0.475 | 0.501 |
| 0.326 | 0.328 | 0.412 | 0.498 | 0.455 | 0.635 | 0.706 | 0.496 | 0.467 | 0.501 |
| 0.427 | 0.477 | 0.413 | 0.499 | 0.416 | 0.484 | 0.456 | 0.493 | 0.481 | 0.501 |
| 0.517 | 0.488 | 0.537 | 0.498 | 0.442 | 0.571 | 0.581 | 0.493 | 0.460 | 0.499 |
| 0.588 | 0.511 | 0.621 | 0.499 | 0.422 | 0.395 | 0.206 | 0.493 | 0.664 | 0.494 |
| 0.588 | 0.523 | 0.607 | 0.500 | 0.377 | 0.385 | 0.206 | 0.493 | 0.646 | 0.494 |
| 0.498 | 0.527 | 0.469 | 0.500 | 0.394 | 0.370 | 0.456 | 0.501 | 0.671 | 0.495 |
| 0.498 | 0.527 | 0.469 | 0.499 | 0.514 | 0.434 | 0.206 | 0.516 | 0.386 | 0.505 |
| 0.446 | 0.469 | 0.449 | 0.498 | 0.597 | 0.466 | 0.456 | 0.493 | 0.273 | 0.505 |
| 0.657 | 0.655 | 0.579 | 0.499 | 0.529 | 0.411 | 0.456 | 0.495 | 0.362 | 0.507 |
| 0.557 | 0.617 | 0.468 | 0.499 | 0.492 | 0.392 | 0.456 | 0.493 | 0.401 | 0.504 |
| 0.520 | 0.572 | 0.458 | 0.499 | 0.518 | 0.371 | 0.456 | 0.507 | 0.385 | 0.503 |
| 0.529 | 0.545 | 0.498 | 0.499 | 0.535 | 0.363 | 0.456 | 0.578 | 0.330 | 0.506 |
| 0.480 | 0.502 | 0.468 | 0.499 | 0.499 | 0.332 | 0.206 | 0.492 | 0.323 | 0.505 |
| 0.482 | 0.508 | 0.466 | 0.499 | 0.536 | 0.462 | 0.456 | 0.523 | 0.654 | 0.496 |
| 0.486 | 0.515 | 0.464 | 0.499 | 0.551 | 0.357 | 0.206 | 0.497 | 0.619 | 0.495 |
| 0.564 | 0.601 | 0.494 | 0.499 | 0.533 | 0.414 | 0.206 | 0.507 | 0.632 | 0.496 |
| 0.516 | 0.557 | 0.468 | 0.499 | 0.564 | 0.381 | 0.456 | 0.493 | 0.583 | 0.495 |
| 0.489 | 0.491 | 0.493 | 0.499 | 0.587 | 0.366 | 0.206 | 0.545 | 0.624 | 0.496 |
| 0.508 | 0.582 | 0.429 | 0.499 | 0.470 | 0.392 | 0.456 | 0.493 | 0.585 | 0.495 |
| 0.547 | 0.484 | 0.586 | 0.499 | 0.574 | 0.364 | 0.206 | 0.992 | 0.614 | 0.497 |
| 0.519 | 0.602 | 0.442 | 0.499 | 0.469 | 0.394 | 0.456 | 0.493 | 0.560 | 0.496 |

Fuente: Elaboración Propia realizado con el programa Win edit

### 3.9.3 Exportación de los datos del WORKSPACE a la nntool

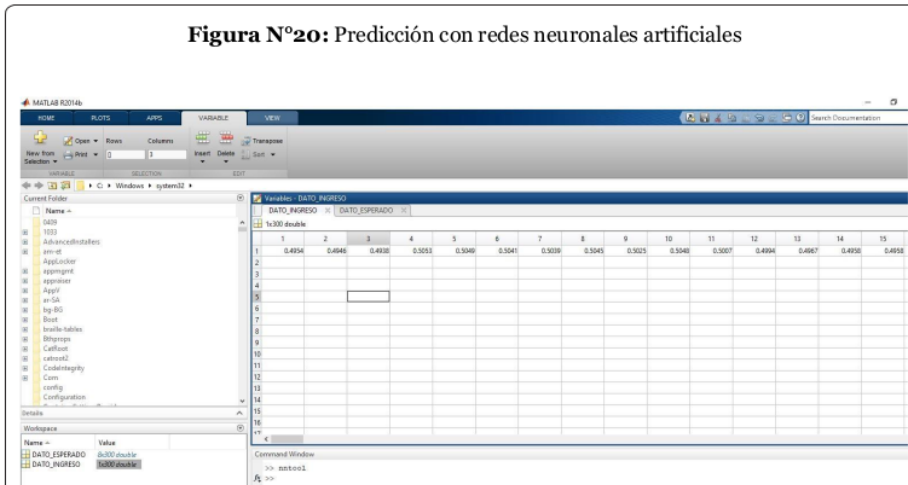
Primeramente se utilizó la técnica del procesamiento de datos utilizando hojas de cálculo para ordenar y comodar los parámetros de las entradas a la red neuronal luego se exportó al WORKSPACE (área de trabajo de MATLAB) una vez ordenado como matriz en número de filas y columnas compatibles para su procesamiento de datos se exportó al nntool(network neural tool) mas conocido como herramientas de redes neuronales para el diseño de la arquitectura de la red.

Figura N°19: Ingreso de los datos al WORKSPACE



El ingreso de los datos previa normalización se cuentan con datos esperados como objetivo para el aprendizaje y para predecir los valores de la densidad máxima seca y el contenido de humedad óptimo, los cuales serán predecidos por a red neuronal artificial donde podemos apreciar el ingreso de los datos al WORKSPACE para la utilización del nntool y del nftool herramientas y espacio de trabajo para redes neuronales con MATLAB.

Figura N°20: Predicción con redes neuronales artificiales

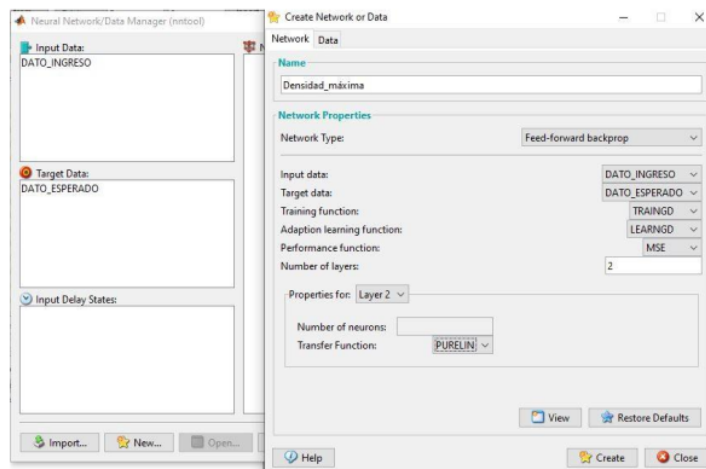


**Nota:** Predicción con redes neuronales artificiales. **Fuente:** Elaboración propia con MATLAB

### 3.9.4 Creación de la arquitectura de la red neuronal artificial

La herramienta de MATLAB imprescindible para redes neuronales artificiales es el nntool (network neural tool), herramientas de redes neuronales artificiales, el cual se encarga de crear la arquitectura de la red el ingreso de los datos del WORKSPACE a la herramienta nntool y la configuración para el ingreso de los datos.

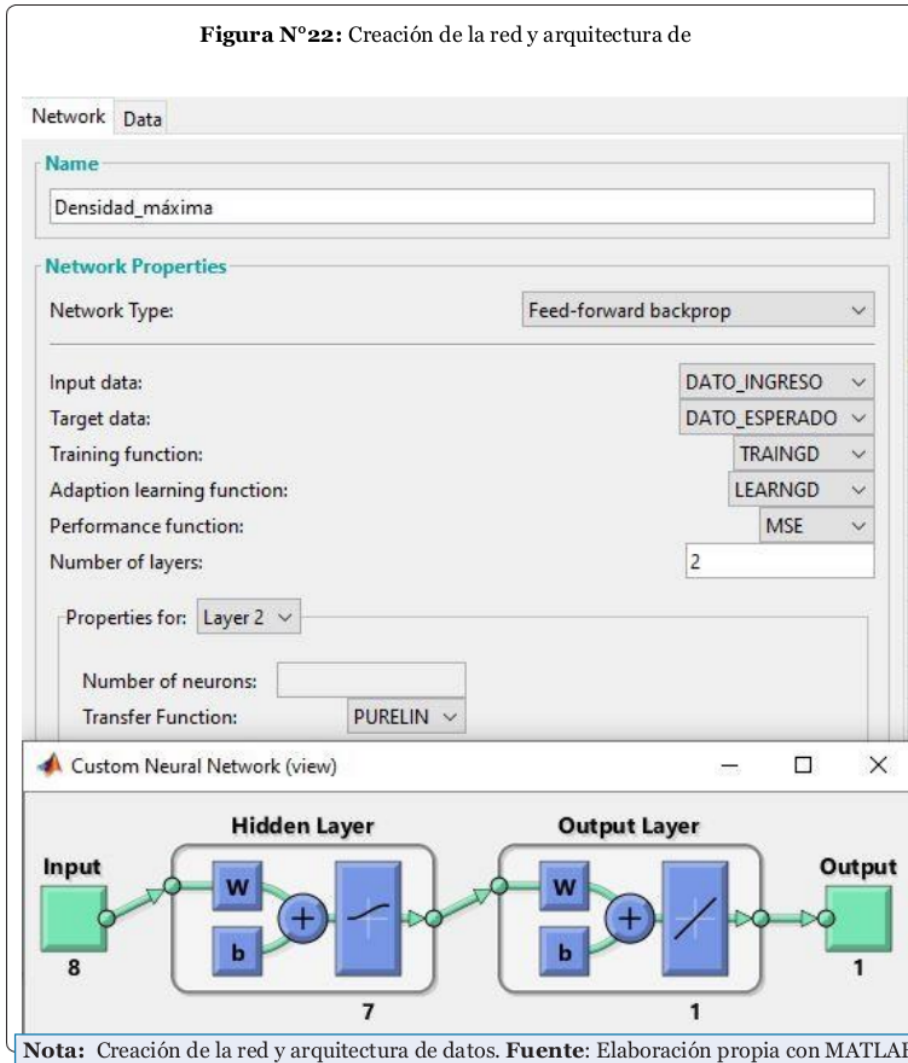
Figura N°21: Exportación de los datos del workspace al nntool de MATLAB



**Nota:** Exportación de los datos de l workspace al nntool de MATLAB. **Fuente:** Elaboración propia



Figura N°22: Creación de la red y arquitectura de



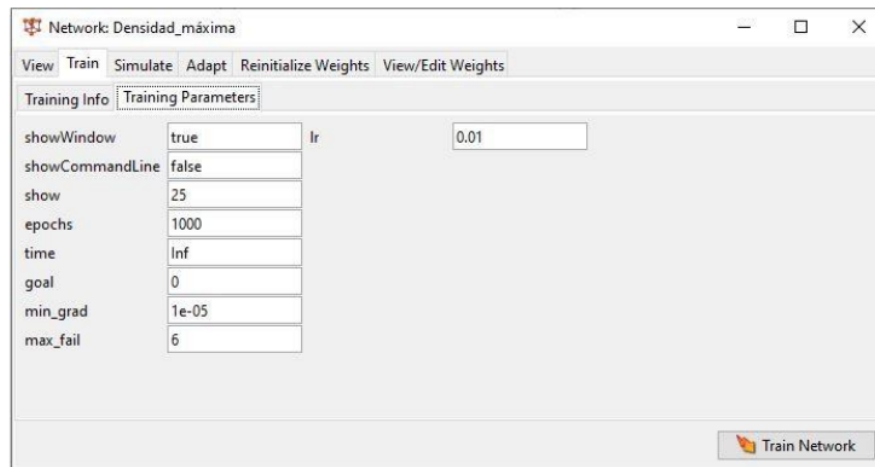
La arquitectura de la red tiene 3 capas una capa de entrada o input layer, la capa oculta o hidden layer y la capa de salida output layer donde se utiliza la función de activación lineal para el ingreso a la capa oculta tanto como a la capa de salida, donde tenemos 7 neuronas en la capa oculta como se aprecia en la arquitectura de la red y para salida o output layer tenemos una sola neurona, donde tenemos 8 parámetros de entrada a la red y una de salida.

### 3.9.5 Configuración para el entrenamiento de la red

Luego de exportar los datos normalizados al WORKSPACE, los datos necesitan dividirse en tres grupos, donde el primer grupo es para el entrenamiento de la red neuronal artificial

el segundo <sup>15</sup> la validación y el tercero la prueba, tributando el 80 % para entrenamiento y el 20 % para la validación y la prueba del total de datos recolectados, podemos configurar los parámetros del entrenamiento para la iteración teniendo en cuenta las épocas de procesamiento de datos a tomar, el error cuadrático medio, etc.

**Figura N°23:** Configuración de los parametros de entrenamiento

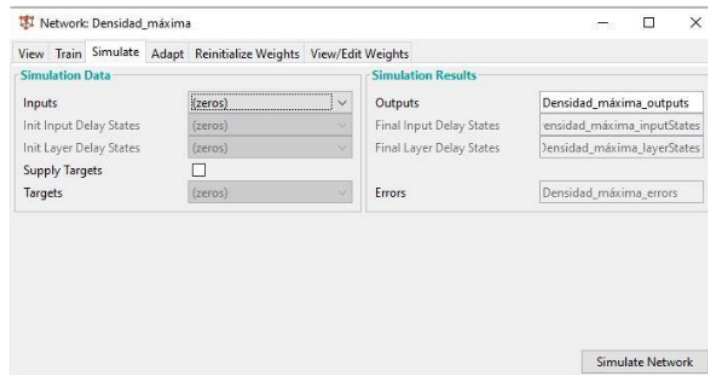


**Nota:** Configuración de los parametros de entrenamiento. **Fuente:** Elaboración propia con MATLAB

Luego del entrenamiento una vez validado la red neuronal artificial la red ya aprendió y por lo tanto predecirá los datos hasta alcanzar el error cuadrático medio proximo a cero, luego la simulación se realiza con las entradas de los datos de interés a predecir para los parámetros de ingreso a la red obteniendo una red optima para la obtención de resultados de interés.

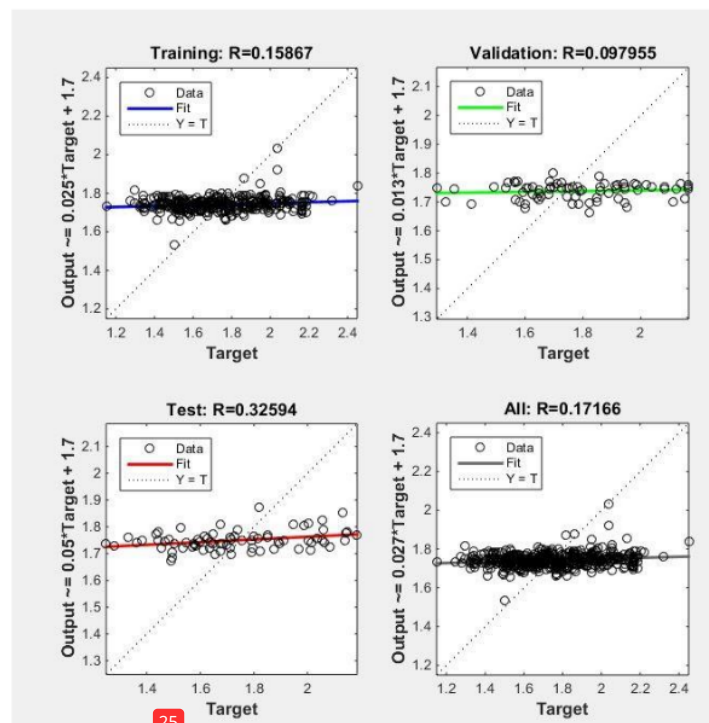
Los valores de la red neuronal artificial tendrán una tendencia en función a los datos donde se controlará con la regresión lineal y el mejor rendimiento de la validación y finalmente una vez obtenido los datos generados por la red neurona artificial pasamos a exportar los datos al WORKSPACE para su utilización en algún tema de interés.

**Figura N°24:** Validación de la red neuronal para la prueba



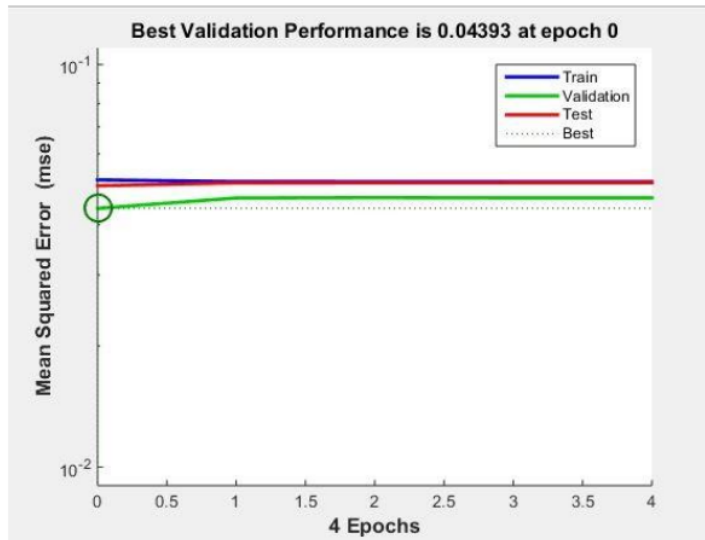
**Nota:** Validación de la red neuronal para la prueba. **Fuente:** Elaboración propia con MATLAB

**Figura N°25:** Regresión lineal de los datos de ingreso a la red



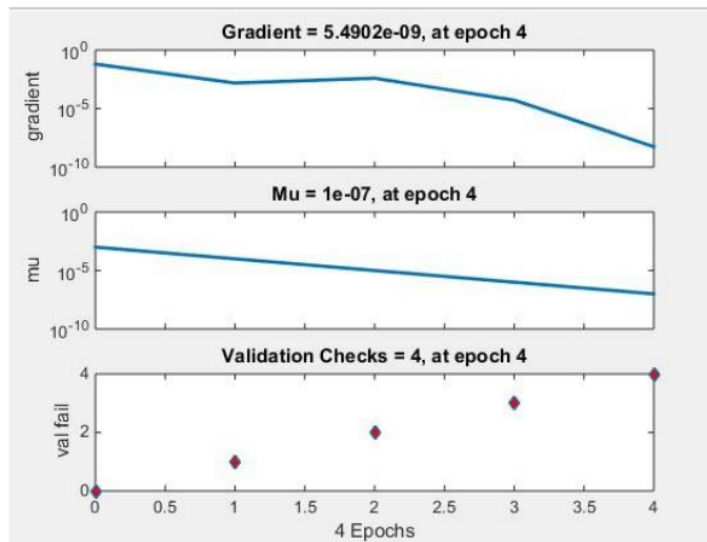
**Nota:** Regresión lineal de los datos de ingreso a la red neuronal. **Fuente:** Elaboración propia con MATLAB

**Figura N°26:** Rendimiento y desempeño de la



**Nota:** Desempeño de la red. **Fuente:** Elaboración propia con MATLAB

**Figura N°27:** Descenso de gradiente y validación por épocas



**Nota:** Descenso de gradiente y validación por épocas. **Fuente:** Elaboración propia con MATLAB

*“Queda prohibido no sonreír a los problemas, no luchar por lo que quieres, abandonarlo todo por miedo, no convertir en realidad tus sueños”*

— Pablo Neruda

13

## Capítulo

# IV

## RESULTADOS

### 4.1 Resultados

- ☞ Se Determinaron los objetivos para los parámetros de compactación en suelos de subrasante utilizando redes neuronales artificiales supervisadas en la pavimentación de la av. Ejército Ayacucho, 2021, como se muestra en la tabla N° 4.2 y 4.4.
- ☞ Se cumplió con estimar parámetros de compactación en suelos de subrasante a partir de la granulométrica utilizando redes neuronales artificiales supervisadas en la pavimentación de la av. Ejército, donde tenemos los datos de entrada para la granulometría en la tabla N° 4.2 y 4.4
- ☞ Se cumplió con estimar parámetros de compactación en suelos de subrasante a partir de los límites de Attemberg utilizando redes neuronales artificiales supervisadas en la pavimentación de la av. Ejército, donde se puede apreciar los datos de los límites de Attemberg como datos de ingreso en las tablas N° 4.2 y 4.4.
- ☞ Se logró el objetivo de estimar parámetros de compactación en suelos de subrasante a partir de la clasificación de suelos SUCS Y ASSTHO utilizando redes neuronales artificiales supervisadas en la pavimentación de la av. Ejército Ayacucho, 2021, consignando el tipo de suelos en la red neuronal artificial, donde se puede apreciar los datos de la clasificación de suelos como datos de ingreso en las tablas N° 4.2 y 4.4.
- ☞ Se utilizaron 3 capas para la red neuronal la <sup>29</sup>capa de entrada o input Layer, la capa oculta o llamada Hidden Layer y finalmente para la salida la capa output Layer o

capa de salida, y para la capa oculta y de salida se utilizó la función de activación lineal donde se utilizón 7 neuronas artificiales en la capa oculta hasta ajustar el error cuadrático medio con aproximación a cero .

**Tabla N°12:** Densidad seca máxima(gr/cm3) y la densidad generada por la Red Neuronal Artificial y el error cuadrático medio

| Dens. Máxima Seca | RNA   | Error  | Dens. Máxima Seca | RNA   | Error  |
|-------------------|-------|--------|-------------------|-------|--------|
| 1.599             | 1.713 | -0.114 | 1.516             | 1.747 | -0.231 |
| 1.788             | 1.748 | 0.040  | 1.857             | 1.732 | 0.125  |
| 1.532             | 1.707 | -0.175 | 1.713             | 1.761 | -0.048 |
| 1.443             | 1.764 | -0.321 | 1.930             | 1.761 | 0.169  |
| 2.114             | 1.768 | 0.346  | 1.770             | 1.758 | 0.012  |
| 1.740             | 1.784 | -0.044 | 1.864             | 1.755 | 0.109  |
| 1.691             | 1.757 | -0.066 | 1.778             | 1.760 | 0.018  |
| 2.138             | 1.767 | 0.371  | 1.968             | 1.747 | 0.221  |
| 2.030             | 1.768 | 0.262  | 1.794             | 1.729 | 0.065  |
| 2.030             | 1.757 | 0.273  | 1.583             | 1.744 | -0.161 |
| 2.035             | 1.742 | 0.293  | 1.512             | 1.749 | -0.237 |
| 1.548             | 1.748 | -0.200 | 1.599             | 1.734 | -0.135 |
| 1.331             | 1.738 | -0.407 | 1.573             | 1.789 | -0.216 |
| 2.166             | 1.744 | 0.422  | 1.294             | 1.763 | -0.469 |
| 2.011             | 1.717 | 0.294  | 1.592             | 1.730 | -0.138 |
| 2.176             | 1.784 | 0.392  | 1.458             | 1.747 | -0.289 |
| 1.891             | 1.747 | 0.144  | 2.166             | 1.723 | 0.443  |
| 1.985             | 1.808 | 0.177  | 2.084             | 1.740 | 0.344  |
| 1.895             | 1.785 | 0.110  | 2.166             | 1.730 | 0.436  |
| 1.891             | 1.765 | 0.126  | 2.084             | 1.741 | 0.343  |
| 1.985             | 1.777 | 0.208  | 2.054             | 1.758 | 0.296  |
| 1.895             | 1.717 | 0.178  | 1.915             | 1.756 | 0.159  |
| 2.095             | 1.757 | 0.338  | 1.700             | 1.759 | -0.059 |
| 1.599             | 1.729 | -0.130 | 1.625             | 1.763 | -0.138 |
| 1.788             | 1.690 | 0.098  | 1.582             | 1.719 | -0.137 |
| 1.532             | 1.793 | -0.261 | 1.526             | 1.731 | -0.205 |
| 1.443             | 1.755 | -0.312 | 1.455             | 1.754 | -0.299 |
| 1.989             | 1.747 | 0.242  | 1.600             | 1.765 | -0.165 |

#### Capítulo IV. Resultados

|       |       |        |       |       |        |
|-------|-------|--------|-------|-------|--------|
| 1.506 | 1.743 | -0.237 | 1.456 | 1.706 | -0.250 |
| 1.526 | 1.746 | -0.220 | 1.416 | 1.737 | -0.321 |
| 1.443 | 1.763 | -0.320 | 1.636 | 1.753 | -0.117 |
| 1.532 | 1.740 | -0.208 | 1.650 | 1.722 | -0.072 |
| 1.788 | 1.728 | 0.060  | 1.528 | 1.673 | -0.145 |
| 1.599 | 1.711 | -0.112 | 1.700 | 1.751 | -0.051 |
| 2.095 | 1.767 | 0.328  | 1.594 | 1.745 | -0.151 |
| 1.637 | 1.734 | -0.097 | 1.432 | 1.732 | -0.300 |
| 1.648 | 1.735 | -0.087 | 1.346 | 1.749 | -0.403 |
| 1.640 | 1.719 | -0.079 | 1.324 | 1.715 | -0.391 |
| 2.166 | 1.698 | 0.468  | 1.651 | 1.717 | -0.066 |
| 1.526 | 1.731 | -0.205 | 1.597 | 1.732 | -0.135 |
| 1.506 | 1.778 | -0.272 | 1.553 | 1.723 | -0.170 |
| 1.989 | 1.723 | 0.266  | 1.862 | 1.979 | -0.117 |
| 1.637 | 1.752 | -0.115 | 1.746 | 1.707 | 0.039  |
| 1.648 | 1.784 | -0.136 | 1.726 | 1.782 | -0.056 |
| 1.640 | 1.755 | -0.115 | 1.910 | 1.779 | 0.131  |
| 2.054 | 1.705 | 0.349  | 1.829 | 1.722 | 0.107  |
| 1.532 | 1.770 | -0.238 | 1.680 | 1.809 | -0.129 |
| 1.443 | 1.768 | -0.325 | 1.582 | 1.790 | -0.208 |
| 1.448 | 1.765 | -0.317 | 1.540 | 1.775 | -0.235 |
| 1.448 | 1.794 | -0.346 | 1.475 | 1.805 | -0.330 |
| 1.599 | 1.755 | -0.156 | 1.341 | 1.761 | -0.420 |
| 1.532 | 1.757 | -0.225 | 2.163 | 1.759 | 0.404  |
| 1.443 | 1.757 | -0.314 | 2.147 | 1.760 | 0.387  |
| 2.063 | 1.754 | 0.309  | 2.123 | 1.705 | 0.418  |
| 1.944 | 1.752 | 0.192  | 1.640 | 1.763 | -0.123 |
| 1.432 | 1.714 | -0.282 | 1.514 | 1.753 | -0.239 |
| 2.166 | 1.731 | 0.435  | 1.456 | 1.779 | -0.323 |
| 2.095 | 1.730 | 0.365  | 1.785 | 1.712 | 0.073  |
| 1.599 | 1.719 | -0.120 | 1.635 | 1.736 | -0.101 |
| 1.560 | 1.730 | -0.170 | 1.568 | 1.780 | -0.212 |
| 1.754 | 1.740 | 0.014  | 1.725 | 1.748 | -0.023 |
| 1.861 | 1.807 | 0.054  | 1.648 | 1.761 | -0.113 |
| 1.532 | 1.757 | -0.225 | 1.563 | 1.775 | -0.212 |

#### Capítulo IV. Resultados

|       |       |        |       |       |        |
|-------|-------|--------|-------|-------|--------|
| 1.443 | 1.755 | -0.312 | 1.993 | 1.724 | 0.269  |
| 2.082 | 1.715 | 0.367  | 1.900 | 1.742 | 0.158  |
| 1.944 | 1.715 | 0.229  | 1.849 | 1.709 | 0.140  |
| 1.432 | 1.713 | -0.281 | 1.782 | 1.724 | 0.058  |
| 2.004 | 1.728 | 0.276  | 1.761 | 1.743 | 0.018  |
| 1.298 | 1.723 | -0.425 | 1.674 | 1.770 | -0.096 |
| 1.482 | 1.737 | -0.255 | 1.640 | 1.728 | -0.088 |
| 1.443 | 1.745 | -0.302 | 1.701 | 1.733 | -0.032 |
| 2.166 | 1.753 | 0.413  | 1.657 | 1.777 | -0.120 |
| 1.698 | 1.716 | -0.018 | 1.851 | 1.787 | 0.064  |
| 2.005 | 1.709 | 0.296  | 1.754 | 1.764 | -0.010 |
| 1.841 | 1.740 | 0.101  | 1.710 | 1.758 | -0.048 |
| 1.711 | 1.732 | -0.021 | 2.054 | 1.812 | 0.242  |
| 1.689 | 1.767 | -0.078 | 1.955 | 1.730 | 0.225  |
| 1.731 | 1.758 | -0.027 | 1.916 | 1.738 | 0.178  |
| 1.765 | 1.760 | 0.005  | 2.123 | 1.774 | 0.349  |
| 1.900 | 1.749 | 0.151  | 1.962 | 1.754 | 0.208  |
| 1.743 | 1.755 | -0.012 | 1.920 | 1.763 | 0.157  |
| 1.728 | 1.792 | -0.064 | 1.978 | 1.777 | 0.201  |
| 2.002 | 1.836 | 0.166  | 1.876 | 1.795 | 0.081  |
| 2.076 | 1.779 | 0.297  | 1.790 | 1.701 | 0.089  |
| 1.695 | 1.833 | -0.138 | 1.973 | 1.769 | 0.204  |
| 2.166 | 1.765 | 0.401  | 2.030 | 1.758 | 0.272  |
| 2.010 | 1.743 | 0.267  | 1.754 | 1.749 | 0.005  |
| 1.822 | 1.781 | 0.041  | 1.710 | 1.737 | -0.027 |
| 1.910 | 1.742 | 0.168  | 1.719 | 1.783 | -0.064 |
| 2.203 | 1.791 | 0.412  | 1.675 | 1.798 | -0.123 |
| 2.066 | 1.768 | 0.298  | 1.635 | 1.742 | -0.107 |
| 1.509 | 1.740 | -0.231 | 1.935 | 1.776 | 0.159  |
| 1.467 | 1.755 | -0.288 | 1.792 | 1.714 | 0.078  |
| 1.965 | 1.728 | 0.237  | 1.758 | 1.789 | -0.031 |
| 1.948 | 1.785 | 0.163  | 1.984 | 1.756 | 0.228  |
| 1.976 | 1.738 | 0.238  | 1.946 | 1.825 | 0.121  |
| 1.947 | 1.760 | 0.187  | 1.928 | 1.721 | 0.207  |
| 1.957 | 1.753 | 0.204  | 1.986 | 1.768 | 0.218  |



#### Capítulo IV. Resultados

|       |       |        |       |       |        |
|-------|-------|--------|-------|-------|--------|
| 1.974 | 1.770 | 0.204  | 1.900 | 1.762 | 0.138  |
| 1.950 | 1.738 | 0.212  | 1.605 | 1.769 | -0.164 |
| 1.727 | 1.750 | -0.023 | 1.326 | 1.740 | -0.414 |
| 1.855 | 1.785 | 0.070  | 1.276 | 1.759 | -0.483 |
| 1.551 | 1.742 | -0.191 | 1.559 | 1.767 | -0.208 |
| 1.548 | 1.764 | -0.216 | 1.416 | 1.758 | -0.342 |
| 1.493 | 1.730 | -0.237 | 1.362 | 1.742 | -0.380 |
| 1.684 | 1.763 | -0.079 | 2.054 | 1.771 | 0.283  |
| 1.780 | 1.795 | -0.015 | 1.978 | 1.700 | 0.278  |
| 1.611 | 1.753 | -0.142 | 1.915 | 1.743 | 0.172  |
| 1.708 | 1.707 | 0.001  | 2.166 | 1.741 | 0.425  |
| 1.670 | 1.711 | -0.041 | 2.110 | 1.758 | 0.352  |
| 1.696 | 1.766 | -0.070 | 2.086 | 1.767 | 0.319  |
| 1.699 | 1.740 | -0.041 | 1.602 | 1.729 | -0.127 |
| 1.627 | 1.717 | -0.090 | 1.400 | 1.752 | -0.352 |
| 1.520 | 1.730 | -0.210 | 1.352 | 1.714 | -0.362 |
| 1.617 | 1.711 | -0.094 | 1.640 | 1.687 | -0.047 |
| 1.501 | 1.500 | 0.001  | 1.534 | 1.697 | -0.163 |
| 1.560 | 1.742 | -0.182 | 1.473 | 1.715 | -0.242 |
| 1.533 | 1.728 | -0.195 | 1.430 | 1.711 | -0.281 |
| 1.512 | 1.708 | -0.196 | 1.648 | 1.723 | -0.075 |
| 1.770 | 1.678 | 0.092  | 1.552 | 1.721 | -0.169 |
| 1.801 | 1.697 | 0.104  | 1.530 | 1.708 | -0.178 |
| 1.823 | 1.703 | 0.120  | 1.851 | 1.733 | 0.118  |
| 1.727 | 1.750 | -0.023 | 1.749 | 1.725 | 0.024  |
| 1.700 | 1.745 | -0.045 | 1.770 | 1.712 | 0.058  |
| 1.740 | 1.674 | 0.066  | 1.648 | 1.740 | -0.092 |
| 1.691 | 1.692 | -0.001 | 1.626 | 1.718 | -0.092 |
| 2.114 | 1.683 | 0.431  | 1.346 | 1.716 | -0.370 |
| 2.186 | 1.680 | 0.506  | 1.249 | 1.757 | -0.508 |
| 1.876 | 1.720 | 0.156  | 1.723 | 1.747 | -0.024 |
| 1.776 | 1.701 | 0.075  | 1.671 | 1.725 | -0.054 |
| 2.030 | 1.704 | 0.326  | 1.610 | 1.735 | -0.125 |
| 1.415 | 1.687 | -0.272 | 1.654 | 1.718 | -0.064 |
| 1.577 | 1.690 | -0.113 | 1.549 | 1.731 | -0.182 |

#### Capítulo IV. Resultados

|       |       |        |       |       |        |
|-------|-------|--------|-------|-------|--------|
| 2.153 | 1.703 | 0.450  | 1.500 | 1.730 | -0.230 |
| 1.588 | 1.697 | -0.109 | 1.680 | 1.730 | -0.050 |
| 1.951 | 1.744 | 0.207  | 1.578 | 1.712 | -0.134 |
| 2.039 | 1.760 | 0.279  | 1.515 | 1.713 | -0.198 |
| 1.615 | 1.759 | -0.144 | 2.011 | 1.691 | 0.320  |
| 2.037 | 2.009 | 0.028  | 1.903 | 1.738 | 0.165  |
| 1.735 | 1.768 | -0.033 | 1.880 | 1.714 | 0.166  |
| 1.727 | 1.761 | -0.034 | 1.909 | 1.716 | 0.193  |
| 1.687 | 1.754 | -0.067 | 1.800 | 1.743 | 0.057  |
| 2.052 | 1.744 | 0.308  | 1.765 | 1.679 | 0.086  |
| 1.839 | 1.790 | 0.049  | 1.432 | 1.759 | -0.327 |
| 1.569 | 1.722 | -0.153 | 1.385 | 1.730 | -0.345 |
| 1.686 | 1.785 | -0.099 | 1.346 | 1.681 | -0.335 |
| 1.788 | 1.769 | 0.019  | 1.721 | 1.726 | -0.005 |
| 1.636 | 1.723 | -0.087 | 1.638 | 1.699 | -0.061 |
| 1.767 | 1.679 | 0.088  | 1.592 | 1.732 | -0.140 |
| 1.823 | 1.713 | 0.110  | 1.550 | 1.733 | -0.183 |
| 1.762 | 1.725 | 0.037  | 1.710 | 1.743 | -0.033 |
| 1.796 | 1.731 | 0.065  | 1.652 | 1.748 | -0.096 |
| 2.020 | 1.768 | 0.252  | 1.615 | 1.761 | -0.146 |
| 1.614 | 1.765 | -0.151 | 1.673 | 1.744 | -0.071 |
| 1.745 | 1.790 | -0.045 | 1.576 | 1.739 | -0.163 |
| 1.729 | 1.767 | -0.038 | 1.552 | 1.733 | -0.181 |
| 1.860 | 1.734 | 0.126  | 1.703 | 1.736 | -0.033 |
| 1.600 | 1.752 | -0.152 | 1.625 | 1.727 | -0.102 |
| 1.860 | 1.752 | 0.108  | 1.540 | 1.738 | -0.198 |
| 1.942 | 1.757 | 0.185  | 1.520 | 1.743 | -0.223 |
| 2.145 | 1.761 | 0.384  | 1.764 | 1.748 | 0.016  |
| 2.176 | 1.765 | 0.411  | 1.675 | 1.725 | -0.050 |
| 2.172 | 1.708 | 0.464  | 1.648 | 1.752 | -0.104 |
| 1.820 | 1.768 | 0.052  | 1.567 | 1.750 | -0.183 |
| 1.860 | 1.713 | 0.147  | 1.482 | 1.726 | -0.244 |
| 1.800 | 1.775 | 0.025  | 1.429 | 1.732 | -0.303 |
| 1.854 | 1.795 | 0.059  | 1.617 | 1.768 | -0.151 |
| 1.822 | 1.715 | 0.107  | 1.740 | 1.753 | -0.013 |

Capítulo IV. Resultados

|       |       |        |       |       |        |
|-------|-------|--------|-------|-------|--------|
| 1.865 | 1.700 | 0.165  | 1.690 | 1.749 | -0.059 |
| 1.875 | 1.781 | 0.094  | 1.675 | 1.717 | -0.042 |
| 1.786 | 1.743 | 0.043  | 1.732 | 1.707 | 0.025  |
| 1.793 | 1.730 | 0.063  | 1.673 | 1.732 | -0.059 |
| 2.001 | 1.751 | 0.250  | 1.685 | 1.740 | -0.055 |
| 1.983 | 1.738 | 0.245  | 1.860 | 1.773 | 0.087  |
| 1.771 | 1.741 | 0.030  | 1.795 | 1.752 | 0.043  |
| 1.665 | 1.712 | -0.047 | 1.750 | 1.743 | 0.007  |
| 1.640 | 1.713 | -0.073 | 2.054 | 1.755 | 0.299  |
| 1.676 | 1.751 | -0.075 | 1.910 | 1.739 | 0.171  |
| 1.654 | 1.716 | -0.062 | 2.166 | 1.796 | 0.370  |
| 1.691 | 1.749 | -0.058 | 2.054 | 1.803 | 0.251  |
| 1.635 | 1.727 | -0.092 | 1.974 | 1.759 | 0.215  |
| 2.166 | 1.702 | 0.464  | 1.947 | 1.715 | 0.232  |
| 2.119 | 1.710 | 0.409  | 1.876 | 1.706 | 0.170  |
| 2.185 | 1.780 | 0.405  | 1.947 | 1.835 | 0.112  |
| 1.443 | 1.746 | -0.303 | 1.875 | 1.745 | 0.130  |
| 1.150 | 1.743 | -0.593 | 2.016 | 1.751 | 0.265  |
| 1.380 | 1.778 | -0.398 | 1.478 | 1.742 | -0.264 |
| 1.482 | 1.793 | -0.311 | 1.341 | 1.732 | -0.391 |
| 1.440 | 1.798 | -0.358 | 1.530 | 1.748 | -0.218 |
| 1.298 | 1.841 | -0.543 | 1.410 | 1.736 | -0.326 |
| 1.280 | 1.741 | -0.461 | 1.507 | 1.744 | -0.237 |
| 2.140 | 1.774 | 0.366  | 1.385 | 1.760 | -0.375 |
| 2.050 | 1.744 | 0.306  | 1.525 | 1.778 | -0.253 |
| 2.082 | 1.757 | 0.325  | 1.340 | 1.804 | -0.464 |
| 1.956 | 1.779 | 0.177  | 1.524 | 1.757 | -0.233 |
| 2.063 | 1.768 | 0.295  | 1.503 | 1.743 | -0.240 |
| 1.962 | 1.791 | 0.171  | 1.860 | 1.752 | 0.108  |
| 2.037 | 2.103 | -0.066 | 1.860 | 1.775 | 0.085  |
| 1.895 | 1.812 | 0.083  | 1.812 | 1.748 | 0.064  |
| 2.054 | 1.775 | 0.279  | 1.525 | 1.780 | -0.255 |
| 1.960 | 1.765 | 0.195  | 1.865 | 1.775 | 0.090  |
| 1.910 | 1.757 | 0.153  | 1.852 | 1.779 | 0.073  |
| 1.550 | 1.755 | -0.205 | 1.745 | 1.791 | -0.046 |

Capítulo IV. Resultados

|       |       |        |       |       |        |
|-------|-------|--------|-------|-------|--------|
| 1.470 | 1.746 | -0.276 | 1.645 | 1.766 | -0.121 |
| 1.356 | 1.754 | -0.398 | 1.600 | 1.746 | -0.146 |
| 1.650 | 1.743 | -0.093 | 1.498 | 1.707 | -0.209 |
| 1.570 | 1.740 | -0.170 | 1.470 | 1.745 | -0.275 |
| 1.536 | 1.697 | -0.161 | 1.811 | 1.763 | 0.048  |
| 1.600 | 1.699 | -0.099 | 1.745 | 1.738 | 0.007  |
| 1.710 | 1.769 | -0.059 | 1.548 | 1.721 | -0.173 |
| 1.584 | 1.694 | -0.110 | 1.435 | 1.768 | -0.333 |
| 1.956 | 1.773 | 0.183  | 1.350 | 1.736 | -0.386 |
| 1.765 | 1.663 | 0.102  | 1.684 | 1.744 | -0.060 |
| 2.047 | 1.808 | 0.239  | 1.611 | 1.740 | -0.129 |
| 1.935 | 1.766 | 0.169  | 1.500 | 1.722 | -0.222 |
| 1.819 | 1.879 | -0.060 | 1.462 | 1.721 | -0.259 |
| 1.966 | 1.726 | 0.240  | 1.626 | 1.755 | -0.129 |
| 1.836 | 1.754 | 0.082  | 1.459 | 1.768 | -0.309 |
| 1.814 | 1.761 | 0.053  | 1.395 | 1.776 | -0.381 |
| 1.680 | 1.722 | -0.042 | 1.700 | 1.731 | -0.031 |
| 1.578 | 1.715 | -0.137 | 1.628 | 1.720 | -0.092 |
| 1.495 | 1.707 | -0.212 | 1.600 | 1.732 | -0.132 |
| 1.570 | 1.719 | -0.149 | 1.512 | 1.707 | -0.195 |
| 1.496 | 1.703 | -0.207 | 1.400 | 1.745 | -0.345 |
| 1.412 | 1.674 | -0.262 | 1.819 | 1.751 | 0.068  |
| 1.800 | 1.694 | 0.106  | 1.709 | 1.721 | -0.012 |
| 1.715 | 1.718 | -0.003 | 1.781 | 1.756 | 0.025  |
| 1.676 | 1.673 | 0.003  | 1.709 | 1.715 | -0.006 |
| 1.910 | 1.744 | 0.166  | 1.781 | 1.701 | 0.080  |
| 1.824 | 1.682 | 0.142  | 1.636 | 1.739 | -0.103 |
| 1.768 | 1.686 | 0.082  | 1.927 | 1.734 | 0.193  |
| 1.650 | 1.774 | -0.124 | 1.765 | 1.725 | 0.040  |
| 1.580 | 1.728 | -0.148 | 1.700 | 1.751 | -0.051 |
| 1.493 | 1.684 | -0.191 | 1.849 | 1.733 | 0.116  |
| 1.620 | 1.749 | -0.129 | 1.993 | 1.720 | 0.273  |
| 1.570 | 1.739 | -0.169 | 2.186 | 1.749 | 0.437  |
| 1.490 | 1.696 | -0.206 | 1.979 | 1.751 | 0.228  |
| 1.952 | 1.697 | 0.255  | 2.166 | 1.721 | 0.445  |

|       |       |        |       |       |        |
|-------|-------|--------|-------|-------|--------|
| 1.825 | 1.723 | 0.102  | 1.752 | 1.731 | 0.021  |
| 1.800 | 1.739 | 0.061  | 2.186 | 1.779 | 0.407  |
| 1.945 | 1.771 | 0.174  | 1.852 | 1.751 | 0.101  |
| 1.566 | 1.728 | -0.162 | 1.982 | 1.740 | 0.242  |
| 1.324 | 1.745 | -0.421 | 1.425 | 1.768 | -0.343 |
| 1.922 | 1.721 | 0.201  | 1.910 | 1.759 | 0.151  |
| 1.786 | 1.691 | 0.095  | 2.320 | 1.767 | 0.553  |
| 1.893 | 1.742 | 0.151  | 2.130 | 1.853 | 0.277  |
| 1.790 | 1.749 | 0.041  | 2.450 | 1.807 | 0.643  |
| 1.585 | 1.760 | -0.175 | 2.220 | 1.784 | 0.436  |
| 1.793 | 1.767 | 0.026  | 2.060 | 1.782 | 0.278  |
| 1.528 | 1.787 | -0.259 |       |       |        |

**Fuente:** Elaboración Propia utilizando Win edit

**Tabla N°13:** Densidad seca máxima(gr/cm3) y la densidad generada por la Red Neuronal Artificial y el error cuadrático medio

| Muestras                            | C-1          | C-2          | C-3          | C-4          |
|-------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Límite líquido</b>               | 22.13        | 25.79        | 29.35        | 27.62        |
| <b>Límite plástico</b>              | 13.99        | 13.96        | 18.89        | 18.53        |
| <b>Índice de plasticidad</b>        | 8.15         | 11.84        | 10.46        | 9.1          |
| <b>% Grava</b>                      | 35.22        | 34.12        | 64.14        | 51.29        |
| <b>% Arena</b>                      | 46.61        | 50.24        | 23.42        | 41.38        |
| <b>% fina</b>                       | 18.17        | 15.64        | 12.44        | 7.33         |
| <b>AASTHO_N</b>                     | 22           | 22           | 22           | 20           |
| <b>SUCS_N</b>                       | 8            | 8            | 4            | 31           |
| <b>Densidad Máxima seca(gr/cm3)</b> | <b>2.004</b> | <b>1.925</b> | <b>1.651</b> | <b>1.933</b> |
| <b>Dens. Máx. RNA(gr/cm3)</b>       | <b>1.734</b> | <b>1.725</b> | <b>1.751</b> | <b>1.733</b> |

**Fuente:** Elaboración Propia utilizando Win edit

**Tabla N°14:** Contenido de humedad óptimo(%) y la densidad generada por la Red Neuronal Artificial y el error cuadrático medio

| Cont. Humedad(%) | RNA    | Error   | Cont. Humedad(%) | RNA    | Error   |
|------------------|--------|---------|------------------|--------|---------|
| 22.450           | 17.211 | 5.239   | 12.250           | 12.994 | -0.744  |
| 9.750            | 17.115 | -7.365  | 10.970           | 17.160 | -6.190  |
| 16.300           | 16.003 | 0.297   | 9.640            | 11.697 | -2.057  |
| 19.490           | 20.819 | -1.329  | 10.700           | 8.567  | 2.133   |
| 8.400            | 11.717 | -3.317  | 10.620           | 9.510  | 1.110   |
| 18.500           | 25.509 | -7.009  | 11.730           | 21.392 | -9.662  |
| 17.050           | 12.378 | 4.672   | 10.120           | 11.052 | -0.932  |
| 6.850            | 15.742 | -8.892  | 11.050           | 4.278  | 6.772   |
| 7.350            | 11.913 | -4.563  | 8.590            | 18.709 | -10.119 |
| 7.350            | 21.930 | -14.580 | 13.810           | 19.692 | -5.882  |
| 8.720            | 17.289 | -8.569  | 12.380           | 19.747 | -7.367  |
| 21.960           | 17.534 | 4.426   | 12.530           | 13.048 | -0.518  |
| 42.000           | 17.162 | 24.838  | 12.740           | 16.831 | -4.091  |
| 4.370            | 17.187 | -12.817 | 11.490           | 5.912  | 5.578   |
| 6.880            | 17.130 | -10.250 | 12.830           | 19.427 | -6.597  |
| 6.240            | 21.129 | -14.889 | 11.520           | 10.445 | 1.075   |
| 10.850           | 12.769 | -1.919  | 8.370            | 14.832 | -6.462  |
| 9.180            | 13.309 | -4.129  | 7.560            | 17.718 | -10.158 |
| 7.850            | 14.650 | -6.800  | 7.370            | 15.836 | -8.466  |
| 10.850           | 13.253 | -2.403  | 8.580            | 17.684 | -9.104  |
| 9.180            | 15.177 | -5.997  | 6.330            | 17.197 | -10.867 |
| 7.850            | 17.138 | -9.288  | 7.470            | 13.208 | -5.738  |
| 8.650            | 7.545  | 1.105   | 22.450           | 19.852 | 2.598   |
| 22.450           | 17.497 | 4.953   | 20.410           | 19.807 | 0.603   |
| 9.750            | 17.122 | -7.372  | 19.340           | 16.327 | 3.013   |
| 16.300           | 11.905 | 4.395   | 13.700           | 12.202 | 1.498   |
| 19.490           | 17.147 | 2.343   | 12.120           | 8.331  | 3.789   |
| 7.470            | 9.069  | -1.599  | 16.020           | 25.128 | -9.108  |
| 19.050           | 6.898  | 12.152  | 14.230           | 17.360 | -3.130  |
| 25.700           | 10.715 | 14.985  | 11.260           | 17.218 | -5.958  |
| 19.490           | 6.962  | 12.528  | 18.300           | 22.298 | -3.998  |
| 16.300           | 12.932 | 3.368   | 10.300           | 9.238  | 1.062   |
| 9.750            | 9.367  | 0.383   | 9.340            | 6.963  | 2.377   |
| 22.450           | 4.930  | 17.520  | 9.800            | 13.531 | -3.731  |

#### Capítulo IV. Resultados

|        |        |         |        |        |         |
|--------|--------|---------|--------|--------|---------|
| 8.650  | 3.979  | 4.671   | 7.470  | 16.271 | -8.801  |
| 18.510 | 16.172 | 2.338   | 19.900 | 15.633 | 4.267   |
| 20.090 | 20.928 | -0.838  | 16.620 | 20.215 | -3.595  |
| 21.280 | 21.623 | -0.343  | 9.370  | 14.038 | -4.668  |
| 4.370  | 17.841 | -13.471 | 13.570 | 17.373 | -3.803  |
| 25.700 | 17.551 | 8.149   | 12.280 | 26.627 | -14.347 |
| 19.050 | 17.059 | 1.991   | 12.030 | 17.564 | -5.534  |
| 7.470  | 17.175 | -9.705  | 10.510 | 23.378 | -12.868 |
| 18.510 | 10.197 | 8.313   | 9.460  | 16.201 | -6.741  |
| 20.090 | 17.013 | 3.077   | 9.040  | 10.332 | -1.292  |
| 21.280 | 17.697 | 3.583   | 9.600  | 15.207 | -5.607  |
| 6.330  | 12.307 | -5.977  | 9.620  | 9.610  | 0.010   |
| 16.300 | 17.978 | -1.678  | 17.200 | 12.205 | 4.995   |
| 19.490 | 13.638 | 5.852   | 16.300 | 13.033 | 3.267   |
| 34.630 | 18.250 | 16.380  | 15.030 | 10.070 | 4.960   |
| 34.630 | 20.212 | 14.418  | 16.220 | 16.037 | 0.183   |
| 22.450 | 15.636 | 6.814   | 14.160 | 13.743 | 0.417   |
| 16.300 | 18.192 | -1.892  | 6.120  | 9.446  | -3.326  |
| 19.490 | 17.549 | 1.941   | 7.260  | 17.295 | -10.035 |
| 7.540  | 10.095 | -2.555  | 7.460  | 17.124 | -9.664  |
| 6.600  | 9.451  | -2.851  | 21.280 | 26.418 | -5.138  |
| 19.890 | 17.122 | 2.768   | 20.310 | 19.313 | 0.997   |
| 4.370  | 17.125 | -12.755 | 19.080 | 16.658 | 2.422   |
| 8.650  | 17.123 | -8.473  | 18.600 | 17.126 | 1.474   |
| 22.450 | 17.123 | 5.327   | 17.260 | -0.461 | 17.721  |
| 18.000 | 17.971 | 0.029   | 15.350 | 19.320 | -3.970  |
| 12.560 | 17.150 | -4.590  | 9.730  | 17.124 | -7.394  |
| 8.070  | 8.005  | 0.065   | 8.400  | 10.262 | -1.862  |
| 16.300 | 9.626  | 6.674   | 7.130  | 8.605  | -1.475  |
| 19.490 | 9.701  | 9.789   | 8.870  | 15.360 | -6.490  |
| 7.020  | 17.122 | -10.102 | 7.000  | 13.482 | -6.482  |
| 6.600  | 17.123 | -10.523 | 6.530  | 12.273 | -5.743  |
| 19.890 | 17.122 | 2.768   | 5.400  | 17.126 | -11.726 |
| 9.800  | 17.124 | -7.324  | 12.070 | 13.089 | -1.019  |
| 30.340 | 17.123 | 13.217  | 11.210 | 17.445 | -6.235  |

Capítulo IV. Resultados

|        |        |         |        |        |         |
|--------|--------|---------|--------|--------|---------|
| 25.770 | 17.112 | 8.658   | 8.000  | 15.664 | -7.664  |
| 27.600 | 12.375 | 15.225  | 13.640 | 16.009 | -2.369  |
| 4.370  | 8.404  | -4.034  | 12.300 | 17.038 | -4.738  |
| 13.400 | 17.299 | -3.899  | 8.630  | 20.384 | -11.754 |
| 10.600 | 20.437 | -9.837  | 7.520  | 20.469 | -12.949 |
| 16.090 | 21.943 | -5.853  | 4.000  | 17.138 | -13.138 |
| 23.140 | 11.159 | 11.981  | 6.330  | 12.553 | -6.223  |
| 21.180 | 17.383 | 3.797   | 5.030  | 17.161 | -12.131 |
| 17.570 | 21.855 | -4.285  | 3.420  | 12.393 | -8.973  |
| 21.280 | 7.303  | 13.977  | 6.460  | 19.949 | -13.489 |
| 11.820 | 9.433  | 2.387   | 5.380  | 14.992 | -9.612  |
| 22.270 | 11.509 | 10.761  | 3.000  | 9.846  | -6.846  |
| 16.030 | 11.582 | 4.448   | 10.580 | 16.668 | -6.088  |
| 7.600  | 5.846  | 1.754   | 9.120  | 11.307 | -2.187  |
| 7.830  | 14.313 | -6.483  | 5.000  | 11.556 | -6.556  |
| 13.400 | 16.607 | -3.207  | 12.000 | 17.133 | -5.133  |
| 4.370  | 11.020 | -6.650  | 10.720 | 9.271  | 1.449   |
| 9.480  | 9.941  | -0.461  | 9.230  | 13.930 | -4.700  |
| 17.100 | 5.985  | 11.115  | 6.030  | 13.126 | -7.096  |
| 9.710  | 11.657 | -1.947  | 13.930 | 7.282  | 6.648   |
| 7.880  | 6.379  | 1.501   | 13.120 | 19.276 | -6.156  |
| 7.970  | 10.120 | -2.150  | 10.050 | 18.039 | -7.989  |
| 31.030 | 18.713 | 12.317  | 7.660  | 16.728 | -9.068  |
| 26.810 | 18.652 | 8.158   | 6.270  | 15.954 | -9.684  |
| 7.790  | 19.792 | -12.002 | 4.130  | 17.333 | -13.203 |
| 7.960  | 13.773 | -5.813  | 10.210 | 7.793  | 2.417   |
| 8.220  | 17.125 | -8.905  | 9.360  | 17.302 | -7.942  |
| 8.490  | 17.585 | -9.095  | 6.150  | 14.717 | -8.567  |
| 6.610  | 9.307  | -2.697  | 10.240 | 21.212 | -10.972 |
| 7.710  | 17.258 | -9.548  | 6.030  | 17.500 | -11.470 |
| 7.490  | 17.184 | -9.694  | 14.990 | 16.301 | -1.311  |
| 11.770 | 8.731  | 3.039   | 13.030 | 8.885  | 4.145   |
| 9.380  | 20.229 | -10.849 | 7.540  | 21.544 | -14.004 |
| 10.170 | 17.125 | -6.955  | 14.740 | 30.026 | -15.286 |
| 22.510 | 28.300 | -5.790  | 12.310 | 17.185 | -4.875  |



Capítulo IV. Resultados

|        |        |         |        |        |         |
|--------|--------|---------|--------|--------|---------|
| 16.570 | 17.135 | -0.565  | 8.030  | 9.528  | -1.498  |
| 12.440 | 28.422 | -15.982 | 6.330  | 21.626 | -15.296 |
| 18.200 | 14.755 | 3.445   | 6.380  | 18.437 | -12.057 |
| 15.230 | 21.982 | -6.752  | 7.130  | 17.930 | -10.800 |
| 10.020 | 19.097 | -9.077  | 4.370  | 9.398  | -5.028  |
| 11.950 | 17.505 | -5.555  | 6.480  | 10.905 | -4.425  |
| 11.710 | 19.691 | -7.981  | 6.150  | 16.166 | -10.016 |
| 7.750  | 22.521 | -14.771 | 15.000 | 9.369  | 5.631   |
| 8.860  | 17.250 | -8.390  | 13.000 | 10.386 | 2.614   |
| 16.840 | 25.019 | -8.179  | 10.240 | 17.127 | -6.887  |
| 12.300 | 14.178 | -1.878  | 21.280 | 17.123 | 4.157   |
| 17.120 | 27.044 | -9.924  | 20.400 | 17.123 | 3.277   |
| 16.220 | 22.043 | -5.823  | 18.000 | 17.123 | 0.877   |
| 16.090 | 18.159 | -2.069  | 16.000 | 14.489 | 1.511   |
| 16.950 | 22.306 | -5.356  | 20.090 | 13.912 | 6.178   |
| 8.660  | 8.966  | -0.306  | 19.230 | 15.320 | 3.910   |
| 8.550  | 14.026 | -5.476  | 15.000 | 16.528 | -1.528  |
| 9.690  | 17.156 | -7.466  | 12.820 | 12.054 | 0.766   |
| 11.840 | 17.401 | -5.561  | 10.490 | 14.476 | -3.986  |
| 12.170 | 20.623 | -8.453  | 15.720 | 14.476 | 1.244   |
| 18.500 | 17.846 | 0.654   | 13.420 | 14.982 | -1.562  |
| 17.050 | 17.123 | -0.073  | 14.810 | 17.146 | -2.336  |
| 8.400  | 17.127 | -8.727  | 12.670 | 17.131 | -4.461  |
| 8.800  | 17.114 | -8.314  | 9.730  | 15.953 | -6.223  |
| 10.590 | 30.454 | -19.864 | 13.600 | 19.528 | -5.928  |
| 16.550 | 17.123 | -0.573  | 11.570 | 17.248 | -5.678  |
| 11.450 | 17.128 | -5.678  | 9.030  | 16.057 | -7.027  |
| 33.460 | 25.592 | 7.868   | 17.590 | 18.675 | -1.085  |
| 15.160 | 19.796 | -4.636  | 16.040 | 18.722 | -2.682  |
| 7.130  | 17.130 | -10.000 | 12.120 | 9.260  | 2.860   |
| 22.250 | 17.123 | 5.127   | 18.100 | 10.624 | 7.476   |
| 10.980 | 17.128 | -6.148  | 16.350 | 17.126 | -0.776  |
| 9.380  | 5.579  | 3.801   | 12.160 | 17.132 | -4.972  |
| 19.950 | 15.951 | 3.999   | 5.530  | 17.123 | -11.593 |
| 10.100 | 8.382  | 1.718   | 3.470  | 17.554 | -14.084 |

Capítulo IV. Resultados

|        |        |         |          |        |          |
|--------|--------|---------|----------|--------|----------|
| 11.330 | 12.474 | -1.144  | 2.060    | 17.124 | -15.064  |
| 13.540 | 18.449 | -4.909  | 11.170   | 17.128 | -5.958   |
| 16.990 | 17.323 | -0.333  | 8.000    | 9.273  | -1.273   |
| 7.530  | 19.812 | -12.282 | 6.480    | 18.631 | -12.151  |
| 13.410 | 5.856  | 7.554   | 19.900   | 10.391 | 9.509    |
| 24.190 | 3.626  | 20.564  | 17.320   | 17.814 | -0.494   |
| 19.270 | 17.898 | 1.372   | 15.230   | 17.127 | -1.897   |
| 17.500 | 18.577 | -1.077  | 9.060    | 17.258 | -8.198   |
| 13.100 | 8.752  | 4.348   | 8.120    | 17.124 | -9.004   |
| 14.890 | 8.499  | 6.391   | 7.030    | 17.148 | -10.118  |
| 13.610 | 12.962 | 0.648   | 6.000    | 17.141 | -11.141  |
| 12.480 | 11.826 | 0.654   | 11.200   | 17.142 | -5.942   |
| 13.190 | 12.368 | 0.822   | 10.240   | 9.890  | 0.350    |
| 12.480 | 19.796 | -7.316  | 8.120    | 21.182 | -13.062  |
| 18.400 | 13.925 | 4.475   | 10.240   | 16.928 | -6.688   |
| 12.000 | 27.757 | -15.757 | 7.640    | 16.666 | -9.026   |
| 14.100 | 11.739 | 2.361   | 5.120    | 17.129 | -12.009  |
| 13.570 | 15.916 | -2.346  | 10.880   | 17.390 | -6.510   |
| 20.460 | 1.952  | 18.508  | 9.320    | 17.290 | -7.970   |
| 13.570 | 18.031 | -4.461  | 8.230    | 17.632 | -9.402   |
| 6.350  | 20.042 | -13.692 | 6.030    | 21.384 | -15.354  |
| 7.690  | 17.979 | -10.289 | 9.420    | 12.312 | -2.892   |
| 6.960  | 6.402  | 0.558   | 8.670    | 17.141 | -8.471   |
| 4.930  | 17.123 | -12.193 | 18.720   | 22.506 | -3.786   |
| 13.520 | 15.435 | -1.915  | 17.120   | 4.937  | 12.183   |
| 13.570 | 13.128 | 0.442   | 13.420   | 30.576 | -17.156  |
| 13.500 | 22.541 | -9.041  | 9.120    | 17.332 | -8.212   |
| 8.660  | 9.629  | -0.969  | 16.850   | 25.476 | -8.626   |
| 9.200  | 18.227 | -9.027  | 1107.000 | 28.074 | 1078.926 |
| 8.490  | 12.133 | -3.643  | 10.000   | 11.864 | -1.864   |
| 7.500  | 8.931  | -1.431  | 7.320    | 9.996  | -2.676   |
| 9.750  | 10.505 | -0.755  | 10.330   | 6.939  | 3.391    |
| 9.160  | 20.472 | -11.312 | 12.810   | 11.147 | 1.663    |
| 7.300  | 21.807 | -14.507 | 12.090   | 10.338 | 1.752    |
| 9.810  | 16.792 | -6.982  | 13.570   | 10.515 | 3.055    |

Capítulo IV. Resultados

|        |        |         |        |        |         |
|--------|--------|---------|--------|--------|---------|
| 17.210 | 22.432 | -5.222  | 12.450 | 6.902  | 5.548   |
| 19.400 | 12.064 | 7.336   | 8.030  | 8.739  | -0.709  |
| 18.200 | 21.010 | -2.810  | 6.330  | 9.454  | -3.124  |
| 19.160 | 31.078 | -11.918 | 1.230  | 17.267 | -16.037 |
| 18.320 | 17.162 | 1.158   | 4.370  | 16.837 | -12.467 |
| 18.960 | 13.489 | 5.471   | 6.330  | 11.231 | -4.901  |
| 14.560 | 18.413 | -3.853  | 5.310  | 9.628  | -4.318  |
| 4.370  | 6.385  | -2.015  | 7.320  | 11.293 | -3.973  |
| 2.540  | 8.791  | -6.251  | 5.380  | 17.126 | -11.746 |
| 6.430  | 8.751  | -2.321  | 7.320  | 15.441 | -8.121  |
| 27.600 | 10.503 | 17.097  | 5.680  | 16.223 | -10.543 |
| 28.430 | 8.741  | 19.689  | 8.210  | 10.913 | -2.703  |
| 31.560 | 19.942 | 11.618  | 20.480 | 15.354 | 5.126   |
| 25.770 | 11.791 | 13.979  | 22.270 | 18.280 | 3.990   |
| 23.250 | 12.466 | 10.784  | 27.830 | 20.452 | 7.378   |
| 30.340 | 9.358  | 20.982  | 16.150 | 18.251 | -2.101  |
| 27.560 | 17.390 | 10.170  | 20.440 | 20.289 | 0.151   |
| 6.700  | 10.212 | -3.512  | 18.450 | 19.129 | -0.679  |
| 5.370  | 21.319 | -15.949 | 20.820 | 17.755 | 3.065   |
| 7.080  | 14.569 | -7.489  | 27.980 | 19.768 | 8.212   |
| 8.560  | 11.645 | -3.085  | 21.460 | 17.641 | 3.819   |
| 7.190  | 16.706 | -9.516  | 21.330 | 16.444 | 4.886   |
| 6.420  | 6.732  | -0.312  | 13.570 | 11.199 | 2.371   |
| 10.500 | -1.270 | 11.770  | 13.570 | 12.539 | 1.031   |
| 8.450  | 6.189  | 2.261   | 13.000 | 9.625  | 3.375   |
| 6.330  | 3.377  | 2.953   | 20.820 | 10.918 | 9.902   |
| 4.620  | 14.631 | -10.011 | 13.570 | 17.298 | -3.728  |
| 2.860  | 22.306 | -19.446 | 6.540  | 18.795 | -12.255 |
| 28.200 | 4.724  | 23.476  | 4.560  | 13.221 | -8.661  |
| 27.520 | 13.100 | 14.420  | 2.310  | 2.223  | 0.087   |
| 25.640 | 17.067 | 8.573   | 20.460 | 16.168 | 4.292   |
| 25.170 | 28.205 | -3.035  | 18.120 | 17.122 | 0.998   |
| 26.530 | 15.386 | 11.144  | 13.580 | 17.872 | -4.292  |
| 22.120 | 26.688 | -4.568  | 12.150 | 10.242 | 1.908   |
| 27.120 | 12.348 | 14.772  | 10.520 | 17.313 | -6.793  |

*Capítulo IV. Resultados*

|        |        |         |        |        |         |
|--------|--------|---------|--------|--------|---------|
| 18.140 | 24.745 | -6.605  | 22.530 | 17.125 | 5.405   |
| 15.230 | 10.297 | 4.933   | 21.120 | 13.510 | 7.610   |
| 9.290  | 18.660 | -9.370  | 17.250 | 17.255 | -0.005  |
| 7.340  | 14.582 | -7.242  | 12.440 | 10.879 | 1.561   |
| 7.310  | 17.444 | -10.134 | 15.230 | 17.329 | -2.099  |
| 6.580  | 13.306 | -6.726  | 14.000 | 8.875  | 5.125   |
| 4.230  | 4.037  | 0.193   | 12.350 | 17.133 | -4.783  |
| 10.500 | 11.075 | -0.575  | 11.380 | 19.443 | -8.063  |
| 9.560  | 19.736 | -10.176 | 10.010 | 23.377 | -13.367 |
| 7.460  | 6.144  | 1.316   | 8.450  | 1.134  | 7.316   |
| 18.000 | 13.215 | 4.785   | 12.180 | 18.953 | -6.773  |
| 14.380 | 11.052 | 3.328   | 11.100 | 14.154 | -3.054  |
| 12.430 | 6.687  | 5.743   | 9.000  | 17.510 | -8.510  |
| 23.000 | 21.079 | 1.921   | 16.960 | 17.125 | -0.165  |
| 21.130 | 18.280 | 2.850   | 15.000 | 15.635 | -0.635  |
| 19.430 | 8.989  | 10.441  | 16.440 | 15.028 | 1.412   |
| 12.000 | 6.360  | 5.640   | 19.250 | 17.130 | 2.120   |
| 10.320 | 12.332 | -2.012  | 17.760 | 26.471 | -8.711  |
| 8.510  | 19.111 | -10.601 | 19.250 | 17.123 | 2.127   |
| 9.600  | 18.294 | -8.694  | 17.760 | 17.124 | 0.636   |
| 7.560  | 3.257  | 4.303   | 23.100 | 17.274 | 5.826   |
| 5.460  | 10.490 | -5.030  | 10.750 | 11.781 | -1.031  |
| 17.390 | 13.221 | 4.169   | 9.120  | 8.843  | 0.277   |
| 16.000 | 3.715  | 12.285  | 6.570  | 16.672 | -10.102 |
| 12.320 | 10.791 | 1.529   | 11.860 | 19.549 | -7.689  |
| 19.500 | 17.763 | 1.737   | 8.840  | 15.572 | -6.732  |
| 16.230 | 32.267 | -16.037 | 8.800  | 12.908 | -4.108  |
| 15.120 | 15.529 | -0.409  | 8.720  | 17.384 | -8.664  |
| 12.160 | 12.601 | -0.441  | 4.320  | 17.188 | -12.868 |
| 10.370 | 17.271 | -6.901  | 11.160 | 17.189 | -6.029  |
| 7.000  | 20.830 | -13.830 | 8.800  | 12.600 | -3.800  |
| 11.190 | 13.428 | -2.238  | 7.300  | 11.580 | -4.280  |
| 13.300 | 18.876 | -5.576  | 9.600  | 17.236 | -7.636  |
| 9.560  | 16.958 | -7.398  | 9.000  | 18.661 | -9.661  |
| 12.580 | 17.375 | -4.795  | 5.000  | 13.632 | -8.632  |

|        |        |         |        |        |         |
|--------|--------|---------|--------|--------|---------|
| 10.620 | 3.566  | 7.054   | 5.600  | 9.835  | -4.235  |
| 13.540 | 30.761 | -17.221 | 10.200 | 20.974 | -10.774 |
| 9.430  | 27.657 | -18.227 | 8.040  | 18.478 | -10.438 |
| 12.520 | 14.828 | -2.308  | 6.900  | 6.638  | 0.262   |
| 13.890 | 15.663 | -1.773  | 7.600  | 10.437 | -2.837  |
| 12.260 | 14.500 | -2.240  |        |        |         |

**Fuente:** Elaboración Propia utilizando Win edit

**Tabla N°15:** Resultados del contenido de humedad para las muestras con redes neuronales artificiales y resultados de laboratorio

| <b>Muestras</b>                       | <b>C-1</b>   | <b>C-2</b>   | <b>C-3</b>   | <b>C-4</b>   |
|---------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Límite líquido</b>                 | 22.13        | 25.79        | 29.35        | 27.62        |
| <b>Límite plástico</b>                | 13.99        | 13.96        | 18.89        | 18.53        |
| <b>Índice de plasticidad</b>          | 8.15         | 11.84        | 10.46        | 9.1          |
| <b>% Grava</b>                        | 35.22        | 34.12        | 64.14        | 51.29        |
| <b>% Arena</b>                        | 46.61        | 50.24        | 23.42        | 41.38        |
| <b>% fina</b>                         | 18.17        | 15.64        | 12.44        | 7.33         |
| <b>AASTHO_N</b>                       | 22           | 22           | 22           | 20           |
| <b>SUCS_N</b>                         | 8            | 8            | 4            | 31           |
| <b>Contenido de humedad óptimo(%)</b> | <b>16.00</b> | <b>15.20</b> | <b>20.00</b> | <b>15.60</b> |
| <b>Cont. Hum. ópt. RNA( %)</b>        | <b>12.77</b> | <b>13.35</b> | <b>17.25</b> | <b>13.77</b> |

**Fuente:** Elaboración Propia utilizando Win edit

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

## CONCLUSIONES

Las conclusiones la presente investigación es que las redes neuronales son herramientas potentes para predecir información en base a los datos alimentados mientras más datos alimentados mejor el aprendizaje de la red neuronal.

- ☞ Se pudo concluir con la predicción de la densidad máxima seca a través de los datos de entradas a partir de los datos recolectados para el entrenamiento la validación y la prueba, cumpliendo con el objetivo propuesto para la estimación de los valores con redes neuronales artificiales.
- ☞ Se utilizaron para cumplir con los objetivos con mas de 500 datos obtenidos <sup>6</sup> de los laboratorios de mecánica de suelos de ayacucho, y se utilizaron datos de límites de Attemberg , clasificación de suelos AASHTO, clasificación de suelos SUCS.
- ☞ Se concluye que con los 500 datos obtenidos se puede predecir valores tentativos <sup>5</sup> de la densida máxima seca (gr/cm3) y el contenido de humedad óptima ( %).
- ☞ Se pudo concluir con cada resultado y por ende cada objetivo de la investigación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- Al-Khafaji, A. N. (2015). Estimation of soil compaction parameters by means of Atterberg limits. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 26, 359-368.
- Altun, S., Göktepe, B. A. y Sezer, A. (2008). Investigation of Parameters of Compaction Testing. *Article in Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences* · January 2008.
- Ardakani, A. y Kordnaeij, A. (2017). Soil compaction parameters prediction using GMDH-type neural network and genetic algorithm. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*.
- Blotz, L. R., Benson, C. H. y Boutwel, G. P. (1990). ESTIMATING OPTIMUM WATER CONTENT AND MAXIMUM DRY UNIT WEIGHT FOR COMPACTED CLAYS. *ASCE*.
- Braja Das, M. (2019). *Advanced Soil Mechanics*.
- Daniel, D. E. y Benson, C. H. (1991). WATER CONTENT-DENSITY CRITERIA FOR COMPACTED SOIL LINERS. *ASCE*.
- Figueredo, M. K. y Milena, A. S. (2015). *SOFTWARE DE APOYO PARA EL PROCESO DE ENSEÑANZA – APRENDIZAJE EN REDES NEURONALES ARTIFICIALES EN LA UNIVERSIDAD LIBRE*.
- Franco y Michael. (2010). Redes Neuronales artificiales. *Springer Series in Optical Sciences*.
- Gestal, P. (2013). *Introducción a las redes de neuronas artificiales*, Universidad de La Coruña, España. <http://sabia.tic.udc.es/mgestal/cv/RNATutorial/TutorialRNA.pdf>
- Gohary, K. M. E., Aziz, R. F. y Khalek, H. A. (2017). Engineering Approach Using ANN to Improve and Predict Construction Labor Productivity under Different Influences. *sci hub*.
- Gunaydin, O. (2008). Estimation of soil compaction parameters by using statistical analyses and artificial neural networks. *Environ Geol* (2009) 57:203–215.
- Heravi, G. (2015). Applying Artificial Neural Networks for Measuring and Predicting Construction-Labor Productivity. *Archives Neerlandaises Sci Exactes et Naturelles*.

- Hryciw, R. D. y Jung, Y. (2010). Three-Point Imaging Test for AASHTO Soil Classification. *Journal of the Transportation Research Board, No. 2101, Transportation Research Board of the National Academies, Washington.*
- Kallas, A. A. B. N. (2004). Modeling soil collapse by artificial neural networks. *Geotechnical and Geological Engineering 2004 Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.*
- Kumor, L. A., Kumor, M. K. y Kopka, M. (2017). Geotechnical parameters of soil, considering the effect of additional compaction of embankment. *ELSEVIER.*
- Lambe, T. W. y Whitman, R. V. (1969). *Soil Mechanics.*
- Llique, R. y Guerrero, A. (2015). Influencia de la humedad de compactación en el comportamiento volumétrico de los suelos arcillosos. *Revista ciencia y tecnología de la universidad Nacional de Trujillo.*
- López, G. (2010). Ensayos de compactación en carreteras : Próctor normal y modificado. *Universidad politécnica de Valencia.*
- Mondragón, R. H. L. y Chávez, L. A. L. (2017). Influencia de la energía de compactación en la densidad seca máxima y contenido óptimo de humedad de suelo granular. *CAXAMARCA.*
- Montaño, J. (2002). *Redes neuronales artificiales aplicadas al análisis de datos. Tesis Doc., Palma de Mallorca, España, Universidad de las Islas Baleares.*
- Murthy, V. N. S. (2002). *Principles and practices of soil Mechanics and Foundation Engineering.*
- Ören, A. H. (2014). Estimating compaction parameters of clayey soils from sediment volume test. *journal homepage: [www.elsevier.com/locate/clay](http://www.elsevier.com/locate/clay).*
- othman, K. (2023). Estimation of the compaction parameters of aggregate base course using artificial neural networks. *Research Article SN.*
- Polidori, E. (2015). Proposal for a New Classification of Common Inorganic Soils for Engineering Purposes. *Springer International Publishing Switzerland 2015.*
- Rao y Rao. (1996). C++ Neural Network and fuzzy logic, BPG ,New Delhi India 380-381. *SCI HUB.*



- Sampieri, R. H., Collado, C. F. y Lucio, P. B. (2014). *Metodología de la Investigación* (M. G.-H. / . Interamericana, Ed.; 6.<sup>a</sup> ed.).
- Socha, D. y Ortiz, G. (2005). *Aplicación de redes neuronales MLP a la predicción de un paso en series de tiempo. Fundación Universitaria Konrad Lorenz, Bogotá, pp. 183.*
- Sridhanran, A. y Nagaraj, H. B. (2005). Plastic limit and compaction characteristics of fine- grained soils. *Department of Civil Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, India; BMS College of Engineering, Bangalore, India.*
- Tachibana, S., Matsumoto, M. y Iizuka, A. (2020). Practical method to estimate parameters of elasto-plastic constitutive model for unsaturated soils from compaction curve. *ScienceDirect.*
- Taskiran, T. (2010). Prediction of California bearing ratio (CBR) of fine grained soils by AI methods. *Department of Civil Engineering, Dicle University Engineering and Architecture Faculty, 21280 Diyarbakir, Turkey.*
- Tatsuoka, F., Hashimoto, T. y Tateyama, K. (2021). Soil stiffness as a function of dry density and the degree of saturation for compaction control. *ScienceDirect.*
- Terzagui, K. (2001). *Theoretical Soil Mechanics.*
- Vázquez, J., Gisela, R., Verónica, R., Maximiliano, M. y Matilde, M. (2018). El uso del test de proctor para la reducción de la compactación del suelo. *SEDICI.*
- W., R. y Fellow. (2014). ESTIMATING OPTIMUM WATER CONTENT AND MAXIMUM DRY UNIT WEIGHT FOR COMPACTED CLAYS. *ASCE.*
- Yildirim, B. y Gunaydin, O. (2011). Estimation of California bearing ratio by using soft computing systems. *Contents lists available at ScienceDirect Expert Systems with Applications.*
- Zhang, G. y Patuwo, E. (1998). *Forecasting with artificial neural networks: The state of the art. International Journal of Forecasting 14, 35-62.*

*"La vida no es sino una continua sucesión de oportunidades para sobrevivir"*

— Gabriel García Márquez

Apéndice

A

## ANEXO A

### A.1 Imágenes de pruebas de laboratorio para próctor

**Figura A.1:** Ensayos de laboratorio de Proctor.



**Nota:** Ensayos de laboratorio de Proctor. **Fuente:** Elaboración propia

**Figura A.2:** Ensayos de laboratorio de Proctor.



**Nota:** Ensayos de laboratorio de Proctor. **Fuente:** Elaboración propia

**Figura A.3:** Ensayos de laboratorio de Proctor.



**Nota:** Ensayos de laboratorio de Proctor. **Fuente:** Elaboración propia

**Figura A.4:** Ensayos de laboratorio de Proctor.



**Nota:** Ensayos de laboratorio de Proctor. **Fuente:** Elaboración propia



**Figura A.5:** Ensayos de laboratorio de Proctor.



**Nota:** Ensayos de laboratorio de Proctor. **Fuente:** Elaboración propia

**Figura A.6:** Ensayos de laboratorio de Proctor.



**Nota:** Ensayos de laboratorio de Proctor. **Fuente:** Elaboración propia

# ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE COMPACTACIÓN Y RESISTENCIA DE SOPORTE EN SUELOS DE SUBRASANTE UTILIZANDO REDES NEURONALES ARTIFICIALES SUPERVISADAS EN LA PAVIMENTACIÓN DE LA AV. EJÉRCITO DE ANDRÉS AVELIN

## INFORME DE ORIGINALIDAD

|                     |                     |               |                         |
|---------------------|---------------------|---------------|-------------------------|
| 17%                 | 12%                 | 4%            | 12%                     |
| INDICE DE SIMILITUD | FUENTES DE INTERNET | PUBLICACIONES | TRABAJOS DEL ESTUDIANTE |

## FUENTES PRIMARIAS

|   |                                                                |     |
|---|----------------------------------------------------------------|-----|
| 1 | Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga | 8%  |
|   | Trabajo del estudiante                                         |     |
| 2 | qdoc.tips                                                      | 1%  |
|   | Fuente de Internet                                             |     |
| 3 | Submitted to CONACYT                                           | 1%  |
|   | Trabajo del estudiante                                         |     |
| 4 | sedici.unlp.edu.ar                                             | 1%  |
|   | Fuente de Internet                                             |     |
| 5 | hdl.handle.net                                                 | 1%  |
|   | Fuente de Internet                                             |     |
| 6 | repositorio.uta.edu.ec                                         | <1% |
|   | Fuente de Internet                                             |     |
| 7 | repository.udem.edu.co                                         | <1% |
|   | Fuente de Internet                                             |     |

|    |                                                                                 |      |
|----|---------------------------------------------------------------------------------|------|
| 8  | <a href="#">doku.pub</a><br>Fuente de Internet                                  | <1 % |
| 9  | <a href="#">www.scribd.com</a><br>Fuente de Internet                            | <1 % |
| 10 | Submitted to Universidad del Bio-Bio<br>Trabajo del estudiante                  | <1 % |
| 11 | Submitted to Universidad Andina del Cusco<br>Trabajo del estudiante             | <1 % |
| 12 | <a href="#">repositorio.puce.edu.ec</a><br>Fuente de Internet                   | <1 % |
| 13 | <a href="#">repositorio.uandina.edu.pe</a><br>Fuente de Internet                | <1 % |
| 14 | Submitted to Pontificia Universidad Catolica del Peru<br>Trabajo del estudiante | <1 % |
| 15 | <a href="#">revistas.ustabuca.edu.co</a><br>Fuente de Internet                  | <1 % |
| 16 | <a href="#">documents.tips</a><br>Fuente de Internet                            | <1 % |
| 17 | <a href="#">doczz.es</a><br>Fuente de Internet                                  | <1 % |
| 18 | <a href="#">repositorio.uap.edu.pe</a><br>Fuente de Internet                    | <1 % |



|    |                                                                         |      |
|----|-------------------------------------------------------------------------|------|
| 19 | Submitted to Universidad Nacional de Colombia<br>Trabajo del estudiante | <1 % |
| 20 | documents.mx<br>Fuente de Internet                                      | <1 % |
| 21 | documentop.com<br>Fuente de Internet                                    | <1 % |
| 22 | Submitted to Universidad Santo Tomas<br>Trabajo del estudiante          | <1 % |
| 23 | www.revistas.unitru.edu.pe<br>Fuente de Internet                        | <1 % |
| 24 | pt.scribd.com<br>Fuente de Internet                                     | <1 % |
| 25 | repositorio.uss.edu.pe<br>Fuente de Internet                            | <1 % |
| 26 | repositorio.unap.edu.pe<br>Fuente de Internet                           | <1 % |
| 27 | repositorio.unsch.edu.pe<br>Fuente de Internet                          | <1 % |
| 28 | www.slideshare.net<br>Fuente de Internet                                | <1 % |
| 29 | Submitted to Universidad Carlos III de Madrid<br>Trabajo del estudiante | <1 % |
| 30 | repositorio.unesum.edu.ec                                               |      |

<1 %

31

[www.geokniga.org](http://www.geokniga.org)

Fuente de Internet

<1 %

32

[www.repositorio.usac.edu.gt](http://www.repositorio.usac.edu.gt)

Fuente de Internet

<1 %

33

[repositorio.unc.edu.pe](http://repositorio.unc.edu.pe)

Fuente de Internet

<1 %

34

Submitted to Universidad San Francisco de Quito

Trabajo del estudiante

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo