



# **Universidad Nacional Mayor de San Marcos**

**Universidad del Perú. Decana de América**

**Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica**

**Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica**

## **Determinación de zonas susceptibles a inundaciones y análisis comparativo del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y Random Forest (RF). Caso estudio: cuenca baja del río Chancay Lambayeque**

### **TESIS**

**Para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo**

### **AUTORES**

**Danny Raúl ANCHELÍA CARHUARICRA**

**Ximena Nicole MORI SÁENZ**

### **ASESOR**

**José Luis QUISPE VÍLCHEZ**

**Lima, Perú**

**2020**



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

## Referencia bibliográfica

---

Anchelía, D. & Mori, X. (2020). *Determinación de zonas susceptibles a inundaciones y análisis comparativo del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y Random Forest (RF). Caso estudio: cuenca baja del río Chancay Lambayeque*. Tesis para optar el título de Ingeniero Geógrafo. Unidad de Posgrado, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

---

## Hoja de metadatos complementarios

|                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Código ORCID del autor                                    | 0000-0001-8986-1971<br>0000-0003-0322-6243                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| DNI o pasaporte del autor                                 | 73107009<br>73013412                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Código ORCID del asesor                                   | 0000-0002-2892-8420                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| DNI o pasaporte del asesor                                | 08119070                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Grupo de investigación                                    | “—”                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Agencia financiadora                                      | Autofinanciado                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Ubicación geográfica donde se desarrolló la investigación | Cuenca Chancay Lambayeque,<br>departamento de Lambayeque <ul style="list-style-type: none"> <li>• Norte: Latitud sur 6°29'0.50"</li> <li>• Este: Longitud oeste 79° 7'28.68"</li> <li>• Sur: Latitud sur 6°54'34.54"</li> <li>• Oeste: Longitud oeste 79°53'34.42"</li> </ul>                                                                                                                                |
| Año o rango de años en que se realizó la investigación    | 2018-2020                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Disciplinas OCDE                                          | Geociencias, Multidisciplinar<br><a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.01">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.01</a><br>Investigación climática<br><a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.10">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.10</a><br>Ciencias del medio ambiente<br><a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.08">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.08</a> |



# UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓGRAFO

En el Salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el día Lunes 21 de diciembre del año 2020, siendo las 14:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

|                                        |            |
|----------------------------------------|------------|
| Ing. DANTE HORACIO LOAYZA ALATRISTA    | Presidente |
| Dr. FRANCISCO ALEJANDRO ALCÁNTARA BOZA | Miembro    |
| Ing. JOSÉ ANTONIO SANDOVAL CASAS       | Miembro    |

Reunidos en Acto Académico Público de Sustentación de la Tesis titulada: “**DETERMINACIÓN DE ZONAS SUSCEPTIBLES A INUNDACIONES Y ANÁLISIS COMPARATIVO DEL PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO (AHP) Y RANDOM FOREST (RF). CASO ESTUDIO: CUENCA BAJA DEL RÍO CHANCAY LAMBAYEQUE**” Presentada por los Bachilleres **DANNY RAÚL ANHELÍA CARHUARICRA** y **XIMENA NICOLE MORI SAÉNZ**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo.

Expuesta la Tesis; los miembros del Jurado plantearon a los Bachilleres las preguntas pertinentes, que fueron absueltas a:

**SATISFACCIÓN**

Concluida la sustentación de Tesis, el Jurado procedió a evaluar y calificar la calidad y sustentación en secreto, cuyo calificativo fue:

**DIECISIETE (17), APROBADO CON MENCIÓN HONROSA**

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓGRAFO, a Don **DANNY RAÚL ANHELÍA CARHUARICRA** y **XIMENA NICOLE MORI SAÉNZ**.

Siendo las.....**15:30**..... horas, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (05) Actas Originales de la Sustentación de Tesis, firmadas por el Jurado Calificador.

Lima, 21 de diciembre del 2020

**Ing. DANTE HORACIO LOAYZA ALATRISTA**  
PRESIDENTE

**Dr. FRANCISCO ALEJANDRO ALCÁNTARA BOZA**  
MIEMBRO

**JOSÉ ANTONIO SANDOVAL CASAS**  
INGENIERO GEOGRAFO  
Reg. CIP. N° 59153

**Ing. JOSÉ ANTONIO SANDOVAL CASAS**  
MIEMBRO

**Mg. JOSÉ LUIS QUISPE VÍLCHEZ**  
ASESOR DE TESIS

## **DEDICATORIA**

A mi padre, que desde que vine a este mundo me enseñó las maravillas  
de la vida y sentó las bases de quien ahora soy.

A mi madre, que nunca dejó de confiar en mí; quien es mi fuerza, mayor  
motivo y soporte de vida.

A todas esas personas que nunca dejaron de confiar en mí; a aquellas que  
pudieron haber sido afectadas y así, hicieron posible el desarrollo de la  
presente investigación.

**Danny Anchelía Carhuaricra**

## **DEDICATORIA**

A mi abuelita Silvia, que siempre me acompaña en todas mis metas  
desde el cielo.

A mis padres, Marivel y Jesús, que siempre me apoyaron y confiaron en  
mi sueño de estudiar la carrera de Ingeniería Geográfica.

A mi hermana Alejandra, quien fortaleció mi decisión de emprender el  
camino de la elaboración de una tesis.

A mis hermanos Bruno y Piero, quienes han sido mi fortaleza durante el  
desarrollo de la presente tesis.

**Ximena Mori Sáenz**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Ing. José Quispe, nuestro asesor, por sus sugerencias y comentarios desde el inicio de la presente investigación.

Al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – Senamhi, por proporcionarnos la información meteorológica requerida para el desarrollo de las metodologías aplicadas.

A los pobladores de los distintos centros poblados de la cuenca del río Chancay Lambayeque, por su disposición y cooperación durante el trabajo de campo.

A Marleni Soto, por su apoyo desinteresado en la elaboración de la presente investigación.

Y por último queremos agradecer a nuestros padres, hermanos y familiares por su apoyo moral y financiero durante todos los años de estudio; a todas aquellas personas que creyeron en nosotros y nos brindaron su amistad, consejos y apoyo.

## RESUMEN

Las inundaciones son uno de los principales fenómenos naturales que acontecen en el Perú, especialmente en las cuencas ubicadas en el noroeste del país, siendo provocados por precipitaciones extremas, ocasionando daños humanos y económicos. Por esta razón, el desarrollo de modelos para identificar zonas susceptibles a inundaciones es esencial para los tomadores de decisiones. A partir de ello, la presente investigación tiene como objetivo realizar el análisis comparativo entre el modelo generado por el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), con el Random Forest a fin de establecer el método más adecuado para la determinación de zonas susceptibles a inundaciones en la cuenca baja del río Chancay – Lambayeque. Se consideraron seis factores, entre los condicionantes y el desencadenante: geología, suelos, uso actual de suelos, Distancia al río, pendiente y precipitación. Estos factores se configuraron como *dataset* ráster a nivel del área de estudio con una resolución espacial de 30m x 30m para la aplicación en ambos métodos.

A su vez se utilizó un inventario de inundaciones que fue generado a partir de datos históricos sobre eventos de inundación obtenidas de instituciones gubernamentales, trabajo de campo e interpretación de las imágenes satelitales Sentinel-2 registradas en 2017, de donde el 70% del total se utilizó como conjunto de entrenamiento para el modelo Random Forest, mientras que el 30% restante se aplicó para la validación de ambos modelos. En consecuencia, se obtuvo los mapas de susceptibilidad a través de ambos modelos. Mediante el área bajo la curva ROC, se probó el poder predictivo de cada uno de ellos; donde los resultados demostraron que el método Random Forest fue más eficiente para la determinación de susceptibilidad ante inundaciones al tener una tasa de predicción de 0,9941 a diferencia del método AHP que resultó con un valor de 0,9774.

**Palabras claves:** *Inundación, susceptibilidad, Proceso de Análisis Jerárquico, Random Forest, SIG.*

## ABSTRACT

Floods are one of the main natural phenomena that take place in Peru, especially in the basins located in the northwest of the country, being caused by extreme rainfalls, causing human and economic damage. For this reason, the development of models to identify flood-prone areas is essential for decisions. Based on this, the present research aims to carry out a comparative analysis between the model generated by the Hierarchical Analysis Process (AHP), with the Random Forest (RF) in order to establish the most appropriate method for determining susceptible areas to floods in the lower basin of the Chancay - Lambayeque river. Six factors were considered, between the conditioning factors and the trigger: geology, soils, land use, river distance, slope, and precipitation. These factors were configured as a raster dataset at the study area level with a spatial resolution of 30m x 30m for the application in both methods.

Likewise, a flood inventory was used that was generated from historical data on flood events obtained from government institutions, field work and interpretation of Sentinel-2 satellite images recorded in 2017, of which 70% of the total were used as a training set for the Random Forest model, while the remaining 30% was applied for the validation of both models. Consequently, susceptibility maps were obtained through both models. Using the area under the ROC curve, the predictive power of each one was tested; where the results showed that the Random Forest method was more efficient for the determination of susceptibility to floods by having a prediction rate of 0,9941, unlike the AHP method that resulted in a value of 0,9774.

**Key words:** Flood; susceptibility; Hierarchical Analysis Process; Random Forest, GIS.

## RÉSUMÉ

Les inondations sont l'un des principaux phénomènes naturels qui se produisent au Pérou, en particulier dans les bassins situés au nord-ouest du pays, provoquées par des précipitations extrêmes, causant des dommages humains et économiques. Pour cette raison, le développement de modèles pour identifier les zones sujettes aux inondations est essentiel pour les décideurs. Sur cette base, la présente recherche vise à effectuer une analyse comparative entre le modèle généré par le processus d'analyse hiérarchique (AHP), avec le Random Forest (RF) afin d'établir la méthode la plus appropriée pour déterminer les zones sensibles aux inondations dans le bassin inférieur de la fleuve Chancay - Lambayeque. Six facteurs ont été considérés, entre les facteurs déterminants et le déclencheur : la géologie, les sols, l'utilisation actuelle des sols, la distance de la rivière, la pente et les précipitations. Ces facteurs ont été configurés comme un ensemble de données raster au niveau de la zone d'étude avec une résolution spatiale de 30 m x 30 m pour une application dans les deux méthodes.

À son tour, un inventaire des inondations a été utilisé, généré à partir de données historiques sur les inondations obtenues auprès des institutions gouvernementales, des travaux sur le terrain et de l'interprétation des images satellites Sentinel-2 enregistrées en 2017, dont 70% du total étaient utilisé comme ensemble de formation pour le modèle Random Forest, tandis que les 30% restants ont été appliqués pour la validation des deux modèles. Par conséquent, les cartes de sensibilité ont été obtenues par les deux modèles. En utilisant l'aire sous la courbe ROC, le pouvoir prédictif de chacun a été testé ; où les résultats ont montré que la méthode de Random Forest était plus efficace pour la détermination de la sensibilité aux inondations en ayant un taux de prédiction de 0,9941, contrairement à la méthode AHP qui a donné une valeur de 0,9774.

**Mots clés :** inondation, susceptibilité, processus d'analyse hiérarchique, Random Forest, SIG.

# **TABLA DE CONTENIDOS**

## **Capítulo I**

|                                              |          |
|----------------------------------------------|----------|
| <b>Problemática.....</b>                     | <b>3</b> |
| 1.1. Situación Problemática .....            | 3        |
| 1.2. Formulación de la pregunta .....        | 5        |
| 1.2.1. Pregunta General.....                 | 5        |
| 1.2.2. Preguntas Específicas.....            | 5        |
| 1.3. Justificación de la Investigación ..... | 5        |
| 1.4. Objetivos.....                          | 6        |
| 1.4.1. Objetivo General.....                 | 6        |
| 1.4.2. Objetivos Específicos.....            | 6        |
| 1.5. Planteamiento de la Hipótesis .....     | 6        |
| 1.5.1. Hipótesis General .....               | 6        |
| 1.5.2. Hipótesis Específicas .....           | 6        |

## **Capítulo II**

|                                            |          |
|--------------------------------------------|----------|
| <b>Marco Teórico .....</b>                 | <b>8</b> |
| 2.1. Antecedentes de la investigación..... | 8        |
| 2.2. Marco Teórico y Conceptual .....      | 12       |
| 2.3. Marco Metodológico.....               | 20       |

## **Capítulo III**

|                                                                       |           |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Caracterización del área de estudio .....</b>                      | <b>37</b> |
| 3.1. Descripción General de la cuenca del Río Chancay Lambayeque..... | 37        |
| 3.1.1. Ubicación Geográfica .....                                     | 37        |
| 3.1.2. Aspectos Físicos .....                                         | 38        |
| 3.1.2.1. Pendiente .....                                              | 38        |
| 3.1.2.2. Fisiografía.....                                             | 39        |
| 3.1.2.3. Climatología y meteorología .....                            | 46        |
| 3.1.2.4. Geología .....                                               | 50        |
| 3.1.2.5. Suelos.....                                                  | 58        |
| 3.1.2.6. Hidrología.....                                              | 67        |
| 3.1.2.7. Aspectos Biológicos .....                                    | 68        |
| 3.1.2.8. Aspectos Socioeconómicos.....                                | 72        |

## Capítulo IV

|                                                                                                    |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Metodología .....</b>                                                                           | <b>79</b> |
| 4.1. Tipo y diseño de la investigación.....                                                        | 79        |
| 4.1.1. Tipo de investigación .....                                                                 | 79        |
| 4.1.2. Diseño de investigación .....                                                               | 79        |
| 4.1.3. Unidad de análisis.....                                                                     | 80        |
| 4.1.4. Población .....                                                                             | 80        |
| 4.1.5. Muestra .....                                                                               | 80        |
| 4.1.6. Selección de la muestra .....                                                               | 81        |
| 4.1.7. Recolección y procesamiento de la base de datos.....                                        | 83        |
| 4.1.7.1. Factores condicionantes.....                                                              | 83        |
| 4.1.7.2. Factores desencadenantes .....                                                            | 86        |
| 4.1.7.3. Inventario de inundaciones .....                                                          | 86        |
| 4.2. Construcción y validación de los modelos de predicción .....                                  | 100       |
| 4.2.1. Modelo de predicción mediante el Proceso de Análisis Jerárquico - AHP                       | 100       |
| 4.2.1.1. Determinación de las prioridades de los factores.....                                     | 100       |
| 4.2.1.2. Determinación de las prioridades de unidades de los factores .....                        | 105       |
| 4.2.1.3. Determinación del mapa de susceptibilidad .....                                           | 123       |
| 4.2.2. Modelo de predicción mediante Random Forest .....                                           | 128       |
| 4.2.2.1. Entrenamiento.....                                                                        | 128       |
| 4.2.2.2. Validación .....                                                                          | 132       |
| 4.2.2.3. Clasificación del modelo.....                                                             | 133       |
| 4.2.3. Validación de la hipótesis mediante la curva ROC y el área debajo de la<br>curva (AUC)..... | 135       |
| 4.2.3.1. Curva ROC para el método AHP .....                                                        | 135       |
| 4.2.3.2. Curva ROC para el método Random Forest.....                                               | 139       |

## Capítulo V

|                                                                                            |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Discusión de Resultados .....</b>                                                       | <b>141</b> |
| 5.1. Presentación de Resultados.....                                                       | 141        |
| 5.1.1. Resultados de la aplicación del método AHP .....                                    | 142        |
| 5.1.2. Resultados de la aplicación del método Random Forest .....                          | 143        |
| 5.1.3. Análisis comparativo de los modelos mediante el indicador de desempeño ...<br>..... | 145        |
| 5.2. Análisis, interpretación y discusión de datos .....                                   | 146        |

## Capítulo VI

|                    |     |
|--------------------|-----|
| Conclusiones ..... | 153 |
|--------------------|-----|

## Capítulo VII

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| Recomendaciones ..... | 155 |
|-----------------------|-----|

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| Referencias Bibliográficas ..... | 157 |
|----------------------------------|-----|

# LISTA DE TABLAS

|                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 1: Escala fundamental de comparación por pares .....                                                                  | 23  |
| Tabla 2: Valores del IA respecto a la cantidad de “n” .....                                                                 | 27  |
| Tabla 3: Ubicación Política de la cuenca Chancay-Lambayeque .....                                                           | 38  |
| Tabla 4: Coordenada central del área de estudio .....                                                                       | 38  |
| Tabla 5: Clasificación de pendientes en el área de estudios .....                                                           | 39  |
| Tabla 6: Unidades fisiográficas en el área de estudio .....                                                                 | 40  |
| Tabla 7: Estaciones meteorológicas consideradas en el área de estudio .....                                                 | 47  |
| Tabla 8: Columna estratigráfica del área de estudio .....                                                                   | 51  |
| Tabla 9: Clasificación taxonómica de los suelos del área de estudio: .....                                                  | 59  |
| Tabla 10: Descargas río Chancay-Lambayeque, estación Raca Rumi .....                                                        | 67  |
| Tabla 11: Distribución porcentual de superficies de las unidades cartográficas de<br>vegetación en el área de estudio. .... | 68  |
| Tabla 12: Parámetros cartográficos .....                                                                                    | 83  |
| Tabla 13: Base de datos de instituciones gubernamentales .....                                                              | 86  |
| Tabla 14: Centros poblados visitados en la salida de campo .....                                                            | 88  |
| Tabla 15: Ubicación de los puntos del inventario de inundaciones .....                                                      | 97  |
| Tabla 16: Escala de asignación de pesos .....                                                                               | 101 |
| Tabla 17: Comparación de pares de los factores .....                                                                        | 101 |
| Tabla 18: Matriz de comparaciones pareadas de los factores .....                                                            | 102 |
| Tabla 19: Matriz de comparaciones normalizada .....                                                                         | 103 |
| Tabla 20: Cálculo de producto matricial de matrices de comparaciones pareadas y<br>matriz de pesos relativos. ....          | 104 |
| Tabla 21: Cálculo del vector de consistencia .....                                                                          | 104 |
| Tabla 22: Matriz de comparaciones pareadas de las unidades geológicas. ....                                                 | 106 |
| Tabla 23: Matriz de comparaciones normalizada para las unidades geológicas .....                                            | 107 |

|                                                                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabla 24:</b> Cálculo de producto matricial de matrices de comparaciones pareadas y matriz de pesos relativos de las unidades geológicas .....            | 107 |
| <b>Tabla 25:</b> Cálculo del vector de consistencia.....                                                                                                     | 108 |
| <b>Tabla 26:</b> Matriz de comparaciones pareadas de las unidades taxonómicas del suelo. .                                                                   | 110 |
| <b>Tabla 27:</b> Matriz de comparaciones normalizada para las unidades taxonómicas del suelo.....                                                            | 111 |
| <b>Tabla 28:</b> Cálculo de producto matricial de matrices de comparaciones pareadas y matriz de pesos relativos de las unidades del suelo.....              | 111 |
| <b>Tabla 29:</b> Cálculo del vector de consistencia.....                                                                                                     | 112 |
| <b>Tabla 30:</b> Matriz de comparaciones pareadas de las unidades de uso actual de suelos                                                                    | 114 |
| <b>Tabla 31:</b> Matriz de comparaciones normalizada para las unidades de uso actual del suelo.....                                                          | 115 |
| <b>Tabla 32:</b> Cálculo de producto matricial de matrices de comparaciones pareadas y matriz de pesos relativos de las unidades taxonómicas del suelo ..... | 115 |
| <b>Tabla 33:</b> Cálculo del vector de consistencia.....                                                                                                     | 116 |
| <b>Tabla 34:</b> Matriz de comparaciones pareadas de los rangos de pendiente.....                                                                            | 117 |
| <b>Tabla 35:</b> Matriz de comparaciones normalizada para las unidades de uso actual del suelo.....                                                          | 117 |
| <b>Tabla 36:</b> Cálculo de producto matricial de matrices de comparaciones pareadas y matriz de pesos relativos de las unidades del suelo.....              | 118 |
| <b>Tabla 37:</b> Cálculo del vector de consistencia.....                                                                                                     | 118 |
| <b>Tabla 38:</b> Matriz de comparaciones pareadas de los rangos de distancia al río .....                                                                    | 119 |
| <b>Tabla 39:</b> Matriz de comparaciones normalizada para las distancias de río.....                                                                         | 120 |
| <b>Tabla 40:</b> Cálculo de producto matricial de matrices de comparaciones pareadas y matriz de pesos relativos de los rangos de distancia al río. ....     | 120 |
| <b>Tabla 41:</b> Cálculo del vector de consistencia.....                                                                                                     | 120 |
| <b>Tabla 42:</b> Matriz de comparaciones pareadas de la precipitación.....                                                                                   | 121 |
| <b>Tabla 43:</b> Matriz de comparaciones normalizada para la precipitación .....                                                                             | 122 |
| <b>Tabla 44:</b> Cálculo de producto matricial de matrices de comparaciones pareadas y matriz de pesos relativos de las unidades precipitación. ....         | 122 |
| <b>Tabla 45:</b> Cálculo del vector de consistencia.....                                                                                                     | 123 |
| <b>Tabla 46:</b> Rangos establecidos por el método Natural Breaks para ambos modelos ....                                                                    | 141 |
| <b>Tabla 47:</b> Áreas susceptibles a inundaciones mediante el método AHP .....                                                                              | 142 |
| <b>Tabla 48:</b> Áreas susceptibles a inundaciones mediante el método Random Forest .....                                                                    | 143 |

# LISTA DE FIGURAS

---

|                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 1:</b> Partes de un Sistema de Información Geográfica (SIG).....                           | 19  |
| <b>Figura 2:</b> Modelo jerárquico para la toma de decisiones con el AHP. ....                       | 22  |
| <b>Figura 3:</b> Ejemplo de <i>bootstrapping</i> (simplificado).....                                 | 29  |
| <b>Figura 4:</b> Diagrama de flujo del algoritmo Random Forest.....                                  | 30  |
| <b>Figura 5:</b> Variación del OOB con el número de árboles para diferentes valores del<br>mtry..... | 31  |
| <b>Figura 6:</b> Matriz de confusión de la curva ROC. ....                                           | 34  |
| <b>Figura 7:</b> Curvas ROC típicas. ....                                                            | 36  |
| <b>Figura 8:</b> Precipitación media anual – Estación Jayanca.....                                   | 47  |
| <b>Figura 9:</b> Precipitación media anual – Estación Lambayeque.....                                | 47  |
| <b>Figura 10:</b> Precipitación media anual – Estación Oyotún.....                                   | 48  |
| <b>Figura 11:</b> Precipitación media anual – Estación Reque.....                                    | 48  |
| <b>Figura 12:</b> Precipitación media anual – Estación Santa Cruz.....                               | 48  |
| <b>Figura 13:</b> Precipitación media anual – Estación Sipán.....                                    | 49  |
| <b>Figura 14:</b> Precipitación media anual – Estación Tinajones .....                               | 49  |
| <b>Figura 15:</b> Diagrama de flujo de la investigación.....                                         | 82  |
| <b>Figura 16:</b> Portal de descargas del Aster GDEM.....                                            | 85  |
| <b>Figura 17:</b> Portal de descarga del Sentinel 2 .....                                            | 85  |
| <b>Figura 18:</b> Cálculo de la suma ponderada .....                                                 | 125 |
| <b>Figura 19:</b> Normalización .....                                                                | 126 |
| <b>Figura 20:</b> Clasificación de la susceptibilidad .....                                          | 127 |
| <b>Figura 21:</b> Librerías instaladas.....                                                          | 128 |
| <b>Figura 22:</b> Llamado de factores .....                                                          | 128 |
| <b>Figura 23:</b> Inserción del inventario.....                                                      | 129 |
| <b>Figura 24:</b> Generación de la tabla de valores.....                                             | 129 |
| <b>Figura 25:</b> Creación de índice aleatorio .....                                                 | 129 |
| <b>Figura 26:</b> Calibración de Random Forest .....                                                 | 130 |
| <b>Figura 27:</b> Resultados obtenidos en la consola .....                                           | 131 |
| <b>Figura 28:</b> Tasa de error (OOB) del Random Forest .....                                        | 131 |
| <b>Figura 29:</b> Importancia de los factores en el modelo Random Forest.....                        | 132 |
| <b>Figura 30:</b> Predicción de las muestras de validación.....                                      | 132 |
| <b>Figura 31:</b> Generación del mapa de susceptibilidad.....                                        | 133 |

|                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 32:</b> Generación del mapa de susceptibilidad.....                                                    | 134 |
| <b>Figura 33:</b> Ingreso de librerías.....                                                                      | 135 |
| <b>Figura 34:</b> Incorporación de los factores.....                                                             | 136 |
| <b>Figura 35:</b> Inclusión del inventario de inundaciones y no inundaciones .....                               | 136 |
| <b>Figura 36:</b> Unión de base de datos y conversión a matriz de valores .....                                  | 137 |
| <b>Figura 37:</b> Creación de índice aleatorio para la obtención de muestras de entrenamiento y validación ..... | 137 |
| <b>Figura 38:</b> Generación de curva ROC .....                                                                  | 137 |
| <b>Figura 39:</b> Tasa de falsos y verdaderos positivos.....                                                     | 138 |
| <b>Figura 40:</b> Ploteo de la curva ROC.....                                                                    | 138 |
| <b>Figura 41:</b> Curva ROC obtenida del método de Proceso de Análisis Jerárquico .....                          | 138 |
| <b>Figura 42:</b> Establecimiento de la curva ROC .....                                                          | 139 |
| <b>Figura 43:</b> Inclusión de la función “performance” .....                                                    | 139 |
| <b>Figura 44:</b> Ploteo de la curva ROC.....                                                                    | 140 |
| <b>Figura 45:</b> Curva ROC obtenido del método de Random Forest .....                                           | 140 |
| <b>Figura 46:</b> Distribución de porcentaje mediante el método AHP .....                                        | 142 |
| <b>Figura 47:</b> Representación de los niveles de susceptibilidad - AHP .....                                   | 143 |
| <b>Figura 48:</b> Distribución de porcentaje de áreas – Método Random Forest.....                                | 144 |
| <b>Figura 49:</b> Representación de los niveles de susceptibilidad – Método Random Forest .....                  | 144 |
| <b>Figura 50:</b> Zona 1 – Modelo AHP .....                                                                      | 148 |
| <b>Figura 51:</b> Zona 1 – Modelo Random Forest .....                                                            | 149 |
| <b>Figura 52:</b> Zona 2 – Modelo AHP .....                                                                      | 150 |
| <b>Figura 53:</b> Zona 2 – Modelo Random Forest .....                                                            | 151 |

## **ANEXOS**

---

**Anexo N° 01:** Formato de la encuesta

**Anexo N° 02:** Mapa de ubicación

**Anexo N° 03:** Mapa de Precipitación

**Anexo N° 04:** Mapa de Suelos

**Anexo N° 05:** Mapa de Pendientes

**Anexo N° 06:** Mapa de Uso Actual de Suelos

**Anexo N° 07:** Mapa de Distancia al río

**Anexo N° 08:** Mapa de Geología

**Anexo N° 09:** Mapa Fisiográfico

# Introducción

A través del tiempo, los ríos han tenido una estrecha relación con el desarrollo de las sociedades. En muchos casos ha sido para el beneficio de estas, civilizaciones como en Mesopotamia, emplazada sobre los ríos Tigris y Eufrates, o el Antiguo Egipto, emplazado sobre el Nilo; este componente fue determinante para el desarrollo de la agricultura que fue fuente importante para el desarrollo socioeconómico. Así con el pasar de los años mediante técnicas de ingeniería, el hombre pudo sacar provecho de los caudales de los ríos, con la generación de energía hidroeléctrica, por ejemplo.

Estos escenarios fueron beneficiosos para el hombre a partir del control y manejo que se tuvo ante la periodicidad de caudales del recurso hídrico. Sin embargo, con el pasar de los años, el notorio aumento de la población provocó expansiones de las sociedades, ocasionando la ocupación de los valles fluviales y especialmente de las llanuras aluviales. Ante dicho comportamiento social, la temporalidad de caudal de los ríos fue muy difícil de controlar, ocasionando que las inundaciones ya no sean beneficiosas para las urbes, sino llegar a ser considerado un desastre natural ante las pérdidas humanas y económicas que estas producían.

Las magnitudes de este evento llegan a ocasionar incluso al día de hoy, afecciones muy agresivas a la población al no tomar en consideración el comportamiento hidrológico de los ríos. Por ello, ha sido necesario la implementación de acciones de prevención y mitigación y la elaboración de políticas por parte de los respectivos gobiernos, no obstante, dichos esfuerzos que se realizan para la prevención no llegan a ser suficientes, y no han sido correctamente focalizados a falta de estudios de evaluación de desastres en cada uno de los territorios que se ven afectados por dicho evento o inclusive se aplican metodologías inadecuadas para el área de estudio.

Es por ello que, viendo esta problemática la presente tesis tiene por objetivo desarrollar un análisis comparativo entre el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), la cual actualmente es muy utilizada por diferentes instituciones gubernamentales y aplicada en distintas investigaciones, y el Random Forest (RF), a fin de establecer el método más adecuado para la determinación de zonas susceptibles a inundaciones en la cuenca baja del río Chancay - Lambayeque, no solo obtendremos la metodología más adecuada sino también la generación de un modelo que permite el enriquecimiento de la información de dicha área de estudio

y pueda ser utilizado para la toma de decisiones y el planteamiento de óptimas medidas de control estructurales y no estructurales en las zonas de muy alta y alta susceptibilidad por parte de los diferentes niveles del gobierno.

# Capítulo I

## **Problemática**

### **1.1. Situación Problemática**

Entre los diferentes tipos de fenómenos naturales como los terremotos, deslizamientos, tsunamis, erupciones volcánicas entre otros, la inundación es el más común y destructivo fenómeno en el mundo (Razavi et al., 2018). En el Perú, son responsables del 28% de las personas afectadas y 30 % de viviendas afectadas por fenómenos naturales y antrópicos durante el periodo 2003-2017. (Indeci, 2018).

En el contexto nacional, la región Lambayeque es uno de los departamentos del Perú más afectados y donde ocurren con mucha más frecuencia desastres asociados a la variabilidad climática extrema (Rengifo et al., 2010). Esta es expresada principalmente por el fenómeno del Niño que afecta a la costa norte del Perú, el cual trae como consecuencia la presencia de lluvias torrenciales, el incremento de los ríos y la activación de quebradas aportantes al curso principal, siendo los Niños del 1983 y 1998 los que provocaron el desborde del río Chancay - Lambayeque, estos causaron que grandes zonas de cultivo y ciudades como Chongoyape se inundaran generando daños a diversos tipos de infraestructuras, tales como puentes, carreteras, viviendas e infraestructuras hidráulicas como las del proyecto Tinajones. (Tejada, 2014).

Por sus impactos, asociados a las lluvias e inundaciones, el fenómeno del Niño del 2017 se puede considerar como el Niño más intenso de al menos los

últimos cien años para el Perú (Enfen, 2017). Trayendo como consecuencias en la región Lambayeque a 41 237 damnificados, 93 486 afectados y 4483 viviendas colapsadas. (Ingemmet, 2017).

Bien lo menciona el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (2014): “Las inundaciones en el Perú son un problema recurrente cada año, debido a la estacionalidad de las precipitaciones en la region andina, la cual tiene una época seca y una época de lluvia bien diferenciada, esta última de diciembre a marzo, sumándose en algunos años la presencia de el Niño o la Niña que hacen que los caudales de los ríos que bajan de la región andina a la costa aumenten varias veces su caudal, desbordándose y ocasionando daños en ciudades de la costa específicamente en el norte del país, como: Tumbes, Piura y Lambayeque.”

En la cuenca Chancay - Lambayeque, la principal causa para la ocurrencia de inundaciones es el desbordamiento de una avenida ordinaria o extraordinaria fluvial con una gran capacidad para erosionar o sedimentar. Dicho fenómeno causa grandes pérdidas de tierras de cultivo, deterioro de la infraestructura vial, hidráulica y centros poblados; y amenazando la vida de los pobladores adyacentes (Autoridad Nacional del Agua - ANA, 2010).

De las consecuencias mencionadas anteriormente surge la necesidad de localizar las zonas susceptibles a inundaciones para establecer medidas de prevención ante la ocurrencia de dicho fenómeno.

En la actualidad existe el mapa de susceptibilidad de inundaciones de la cuenca del río Chancay - Lambayeque realizado por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - Ingemmet, en el año 2006, el cual fue elaborado basándose principalmente en 3 parámetros: pendiente, geomorfología y ocupación de suelos, utilizando el método estadístico multivariante (discriminante).

Teniendo como problema principal la falta de información actualizada relacionada con la delimitación de zonas susceptibles a inundaciones que podría ser utilizada para el planteamiento de medidas de control estructurales y no estructurales, se plantea en la presente investigación realizar dicha delimitación mediante los métodos del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) y Random Forest utilizando 6 parámetros: pendiente, uso actual de suelos, geología, Distancia al ríos, suelos y precipitación.

## **1.2. Formulación de la pregunta**

### **1.2.1. Pregunta General**

¿Cuál es el método más adecuado entre el AHP y Random Forest para determinar las zonas susceptibles a inundaciones en la cuenca baja del río Chancay – Lambayeque?

### **1.2.2. Preguntas Específicas**

- ¿Cuáles son las zonas susceptibles a inundaciones determinadas por el método AHP?
- ¿Cuáles son las zonas susceptibles a inundaciones determinadas por el Random Forest?
- ¿Cuál es el grado de importancia de los parámetros a utilizar en el método AHP y Random Forest?
- ¿Cómo mediante el índice de desempeño Receiver Operating Characteristic (ROC) se puede efectuar el análisis comparativo?

## **1.3. Justificación de la Investigación**

La presente investigación tiene como finalidad explorar metodologías destinadas a la determinación de zonas susceptibles a inundaciones que se adecuen a nuestra realidad territorial debido a que actualmente no se han implementado procedimientos eficaces para la predicción del mencionado fenómeno natural. Cabe resaltar que esta investigación tendrá como caso de estudio la cuenca baja del Río Chancay - Lambayeque que comprende desde reservorio Tinajones hasta la parte baja de la cuenca.

Por consiguiente, este trabajo de investigación contribuye a la comunidad científica en los esfuerzos por estimar la susceptibilidad a inundaciones en áreas urbanas o rurales, de tal forma que se puedan plantear y ejecutar óptimas medidas de control estructurales y no estructurales en las zonas de alta susceptibilidad por parte de los diferentes niveles de gobierno.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo General**

Determinar el método más adecuado para la definición de zonas susceptibles a inundaciones en la cuenca baja del río Chancay – Lambayeque.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Zonificar según sea el grado de susceptibilidad a inundaciones aplicando el método AHP.
- Zonificar según sea el grado de susceptibilidad a inundaciones aplicando el método Random Forest.
- Determinar la importancia de los parámetros a utilizar en el Proceso de Análisis Jerárquico y Random Forest.
- Efectuar el análisis comparativo mediante el índice de desempeño ROC.

## **1.5. Planteamiento de la Hipótesis**

### **1.5.1. Hipótesis General**

El método Random Forest permite una adecuada determinación de las zonas susceptibles a inundaciones en la cuenca baja del río Chancay – Lambayeque.

### **1.5.2. Hipótesis Específicas**

- El método AHP ha permitido una aceptable zonificación de acuerdo al grado de susceptibilidad a inundaciones.
- El método Random Forest ha permitido una zonificación mucho más representativa de acuerdo al grado de susceptibilidad a inundaciones.

- El parámetro pendiente tiene mayor importancia en la determinación de zonas susceptibles a inundaciones en ambos métodos.
- El método Random Forest es más preciso que el método AHP en la determinación de zonas susceptibles a inundaciones.

## Capítulo II

# Marco Teórico

---

### 2.1. Antecedentes de la Investigación

Como principal referente para esta investigación, se tiene el estudio realizado por Wang et al. (2015) denominado “*Flood hazard risk assessment model based on Random Forest*”, cuyo objetivo fue generar un mapa de evaluación de la probabilidad de peligro a inundaciones usando dos métodos: Random Forest y Support Vector Machine (SVM) en la cuenca del río Dong, China. Dichos resultados indicaron que el índice de error de entrenamiento y validación en el método Random Forest pueden ser reducidos mediante el incremento del tamaño de muestra y el número de árboles de clasificación. Asimismo, se concluyó que el método Random Forest filtra con éxito los parámetros innecesarios, reduciendo la carga de procesamiento y reduciendo el tiempo total de cálculo. Esta función podría ayudar a identificar las principales fuerzas impulsoras detrás de los diferentes tipos de riesgos. Esta investigación fue elaborada a una escala de 1:100 000.

La investigación “*Mapping flood susceptibility in an arid region of southern Iraq using ensemble machine learning classifiers: a comparative study*” desarrollado por Al-Abadi (2018) tuvo como objetivo principal examinar la eficiencia de los tres modelos clasificadores: AdaBoost, Random Forest y Rotation Forest para determinar la susceptibilidad a inundaciones en el sureste de Irak. Para ello se utilizaron 10 factores condicionantes: altitud, pendiente, curvatura, índice de humedad topográfico (TWI, por sus siglas en inglés), índice de precipitación

estandarizado (SPI, por sus siglas en inglés), distancia al río, densidad de drenaje, unidades litológicas, suelo y ocupación o uso de suelos (LULC). Los resultados de la investigación demostraron que el método Random Forest tuvo el mejor rendimiento en el conjunto de datos de entrenamiento, seguido por el método de AdaBoost. Sin embargo, AdaBoost obtuvo mejor rendimiento en el conjunto de datos de prueba, seguido por el método Rotation Forest y Random Forest. Se concluyó que los modelos basados en sistemas de información geográfica (SIG) son muy rápidos y pueden usarse con precisión para delimitar mapas de susceptibilidad a inundaciones.

Zhao, Pang, Xu, Yue, & Tu (2018) en su proyecto de investigación *"Mapping flood susceptibility in mountainous areas on a national scale in China"* plantearon mapear la susceptibilidad a inundaciones en áreas montañosas de China, basándose en eventos históricos de inundaciones desde el año 1949 al año 2000 mediante la aplicación del método Random Forest. El modelo Random Forest caracterizó con éxito la relación entre los factores explicativos y la frecuencia de ocurrencia de inundaciones, superando a los métodos Artificial Neural Network (ANN) y Support Vector Machine (SVM). Los resultados mostraron que el área debajo de la curva (AUC, por sus siglas en inglés) para los dos conjuntos independientes de datos de validación (eventos históricos del 2006-2014 obtenidos del boletín de desastres por inundaciones y sequías en China del 2008 al 2014 obtenidos de noticias y anuarios) fueron 0,838 y 0,759 que revelaron que el mapa de susceptibilidad a inundaciones alcanzó una precisión satisfactoria.

La investigación *"Spatial prediction of flood susceptibility using Random Forest and boosted-tree models in Seoul metropolitan city , Korea"* desarrollado por Lee, et al. (2017) tuvo como objetivo principal producir mapas de susceptibilidad a inundaciones utilizando dos modelos de procesamiento de datos: Random Forest y Boosted Tree (BT) para el área metropolitana de Seúl. Para ello se utilizaron mapas topográficos, de uso de suelo, de suelo y geológicos para la obtención de los 12 factores correlacionados a la susceptibilidad a inundaciones. Las áreas inundables del año 2010 fueron usadas para el entrenamiento de los modelos y las áreas inundables del año 2011 fueron usadas para la validación. Al finalizar la investigación se concluyó que el modelo Random Forest mostró una precisión de 78,78% y 79,18% para los algoritmos de clasificación y regresión respectivamente, y el modelo Boosted-Tree mostró una precisión de 77,55% y 77,26% para los algoritmos de clasificación y regresión, correspondiente.

Mahmoud y Gan (2018) en su proyecto de investigación *"Multi-criteria approach to develop flood susceptibility maps in arid regions of Middle East"* plantearon

como objetivo principal la identificación de zonas susceptibles a inundaciones usando el AHP en la provincia Riyadh, Arabia Saudita y replicarlo en la ciudad de Riyadh. Para ello utilizaron diez parámetros condicionantes: precipitación anual, pendiente, elevación, geología, tipo de suelo, distancia de la red de drenaje, densidad de drenaje, ocupación o uso de suelos, escorrentía, acumulación de flujo. La verificación de los dos modelos de susceptibilidad se realizó utilizando el registro histórico de inundaciones y los resultados obtenidos demostraron que la metodología elegida desarrollaron mapas confiables de susceptibilidad a inundaciones que deberían usarse para ayudar en la mitigación de inundaciones y en la planificación del uso del suelo tanto en la provincia, como en la ciudad de Riyadh.

Youssef y Hegab (2019) desarrollaron un proyecto cuyo propósito fue la aplicación del método AHP en la evaluación de la susceptibilidad a aluviones y examinar su eficiencia y fiabilidad para su análisis en Ras Gharib, Egipto. Se validó cuantitativamente el modelo mediante dos métodos, uno con el mapa de inventario que se extrajo mediante la técnica de corte por densidad de imágenes satelitales de alta resolución obtenidas después del catastrófico evento del 18 de octubre de 2016, que dio como resultado una predicción de 83,3 % usando la curva ROC. El segundo método de validación se estableció utilizando los registros históricos de aluviones en el área de estudio. En el caso de los eventos históricos de aluviones, la gran mayoría de ellos (76%) se encontraron en las zonas de susceptibilidad alta y muy altas, 19,1% en la zona de susceptibilidad moderada y 4,7% se ubicaron en las zonas de susceptibilidad baja y muy baja. Se concluyó que el método AHP tiene una alta capacidad predictiva en la determinación de susceptibilidad a aluviones.

La investigación “*GIS-based MCDM – AHP modeling for flood susceptibility mapping of arid areas, southeastern Tunisia*” desarrollado por Souissi et al. (2019) tuvo como propósito elaborar un mapa de susceptibilidad a inundaciones en la región de Gabes, Túnez utilizando el método AHP en el entorno SIG. Se han utilizado ocho factores relacionados al modelado de inundaciones que se obtuvieron a partir de imágenes satelitales, el modelo digital de elevación SRTM, datos meteorológicos, mapas geológicos y topográficos. Los resultados obtenidos demostraron que el principal factor de ocurrencia de inundación fue la elevación (22,5%). La validación de los resultados mediante un histograma de zonas de susceptibilidad, el cual mostró que el 74,51% de las áreas inundables inventariadas el año 2014 se concentran principalmente en la zona de susceptibilidad moderada a muy alta.

En el año 2016, Danumah et al., realizaron una investigación con título *"Flood risk assessment and mapping in Abidjan district using multi-criteria analysis (AHP) model and geoinformation techniques, (Cote d'ivoire)"*, el cual tuvo como objetivo identificar y mapear áreas de riesgo de inundación en el distrito de Abidjan, Costa de Marfil. Utilizan el método AHP integrando los parámetros de pendiente, densidad de drenaje, tipo de suelo, isoyetas, densidad de población, uso del suelo y densidad del sistema de alcantarillado. Obtuvieron como resultado el mapa de riesgo de inundación, del cual el 34% del área de estudio tiene una clasificación de alto y muy alto riesgo de inundación, lo que representaría que ocho de cada trece municipios dentro del distrito tiene riesgo de inundación.

La investigación *"Multiparametric AHP-based flood hazard zonation approach in Northwestern Peru at basin scale"* desarrollado por Montenegro & Arteta (2019) tuvo como propósito evaluar la susceptibilidad a las inundaciones en la cuenca del río Piura mediante la aplicación del método AHP, utilizando varios factores de condicionamiento de inundaciones relacionados con la morfología de la cuenca, morfología del terreno, permeabilidad, hidrografía y lluvia provistas de los conjuntos de datos cuadriculados Pisco-Senamhi (5km - 5km) disponibles en escalas diarias y mensuales. Los resultados obtenidos demostraron que el 53,5% del área de estudio tiene una intensidad moderada, asimismo, el cociente de resistencia (CR) obtenido fue 0,04484, lo cual indica que el modelo desarrollado es aceptable.

Mendoza Solis (2017) desarrolló una investigación, cuyo objetivo fue evaluar el nivel de riesgo por inundación, generado por la quebrada Romero del distrito de Cajamarca durante el período 2011 - 2016, mediante la metodología establecida por el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (Cenepred); esta se basa en el método multicriterio (AHP) para la ponderación de los parámetros de evaluación del fenómeno de origen natural y de la vulnerabilidad, a fin de mostrar la importancia de cada parámetro en el cálculo del riesgo, facilitando la estratificación de los niveles de riesgos. Se concluyó que el nivel de riesgo predominante en la quebrada es alto, siendo las zona más riesgosa la que se encuentra entre el Jr. Miguel de Cervantes cuadra 4 hasta el Jr. Desamparados cuadra 6.

## **2.2. Marco Teórico y Conceptual**

### **2.2.1. Inundaciones**

Las inundaciones son la invasión de cuerpos de agua lóticos o lénticos, que son ocasionadas por intensas precipitaciones o ruptura de contenciones, que causa daños considerables. Se pueden presentar de manera lenta en planicies y llanuras y de manera violenta en zonas de altas pendientes. (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2014).

Para Salas & Jimenez (2004), las inundaciones son aquellos eventos que debido a la precipitación, oleaje, marea de tormenta, o falla de alguna estructura hidráulica provoca un incremento en el nivel de la superficie libre del agua de los ríos o el mar mismo, generando invasión o penetración de agua en sitios donde usualmente no la hay y, generalmente daños en la población, agricultura, ganadería e infraestructura.

Las inundaciones son la consecuencia producida por el exceso de volumen máximo de un cuerpo de agua ocasionado principalmente por lluvias torrenciales o intensas, causando desbordes a los terrenos adyacentes.

Según el Centro Nacional de Prevención de Desastres – Cenapred (2004), las inundaciones se pueden clasificar de acuerdo a su origen y al tiempo de respuesta de la cuenca.

#### **2.2.1.1. De acuerdo a su origen**

##### **Inundaciones pluviales**

Estas son ocasionadas por exceso de precipitación en la zona. Son consecuencia de la precipitación, se presentan cuando el terreno se ha saturado y el agua de lluvia excedente comienza a acumularse, pudiendo permanecer horas o días. Su principal característica es que el agua acumulada es agua precipitada sobre esa zona y no la que viene de alguna otra parte (por ejemplo de la parte alta de la cuenca). (Salas & Jimenez, 2004).

## **Inundaciones fluviales**

Son generadas cuando el agua queda sobre la superficie de terreno cercano a ellos. A diferencia de las pluviales, en este tipo de inundaciones el agua que se desborda sobre los terrenos adyacentes corresponde a precipitaciones registradas en cualquier parte de la cuenca tributaria y no necesariamente de lluvias producidas sobre la zona afectada. (Cenapred, 2004)

## **Inundaciones costeras**

Se presenta cuando el nivel medio del mar asciende debido a la marea y permite que éste penetre tierra adentro, en la zonas costeras, generando el cubrimiento de grandes extensiones de terreno.

Son igualmente muy peligrosos los “ascensos” del nivel del mar debidos a bajas presiones atmosféricas, de núcleo extremadamente bajo, que literalmente levantan por falta de peso la superficie del mar. (Sanz, 2012)

## **Inundaciones por falla de infraestructura hidráulica:**

Son ocasionadas por la falla o rotura de infraestructuras que contienen un volumen determinado de agua, provocando la liberación brusca del fluido acaparando los terrenos adyacentes. (Sanz, 2012)

### **2.2.1.2. De acuerdo al tiempo de respuesta de la cuenca:**

#### **Inundaciones lentas**

Al ocurrir una precipitación capaz de saturar el terreno, esto es, cuando el suelo no puede seguir absorbiendo más agua de lluvia, el volumen remanente escurre por los ríos y arroyos o sobre el terreno. Conforme el escurrimiento avanza hacia la salida de la cuenca, se incrementa proporcionalmente con el área drenada, si el volumen que fluye por el cauce excede la capacidad de éste, se presentan desbordamientos sobre sus márgenes y el agua desalojada puede permanecer horas o días sobre el terreno inundado. (Cenapred, 2004)

## **Inundaciones súbitas**

Las inundaciones súbitas son el resultado de lluvias repentinas e intensas que ocurren en áreas específicas. Pueden ocasionar que pequeñas corrientes se transformen, en cuestión de minutos, en violentos torrentes capaces de causar grandes daños. Las zonas urbanas son usualmente sitios donde se presenta este tipo de avenidas, como consecuencia de la “cubierta impermeable” formada artificialmente por los edificios y calles, así como por la deforestación. Debido a ello, el agua no puede infiltrarse y prácticamente todo el volumen precipitado se convierte en escurrimiento. (Cenapred, 2004)

### **2.2.2. Susceptibilidad**

La susceptibilidad está referida a la mayor o menor predisposición a que un evento suceda u ocurra sobre determinado ámbito geográfico (depende de los factores condicionantes y desencadenantes del fenómeno y su respectivo ámbito geográfico). (Cenepred, 2014)

Según Santangelo et al. (2011), la susceptibilidad no considera la probabilidad temporal del evento (por ejemplo, cuándo o con qué frecuencia pueden ocurrir los eventos peligrosos). Dicho enfoque es usado en estudios donde es difícil obtener suficiente información sobre la probabilidad temporal de la ocurrencia del evento.

Las áreas susceptibles a inundaciones deben detectarse no solo para la implementar estrategias adecuadas de planificación y gestión del territorio, sino también garantizar las medidas de emergencia rápidas y efectivas. (Liuzzo, Sammartano, y Freni, 2019)

### **2.2.3. Factores condicionantes**

Son parámetros propios del ámbito geográfico de estudio, los cuales contribuyen de manera favorable o no, al desarrollo del fenómeno de origen natural (magnitud e intensidad), así como su distribución espacial (Cenepred, 2014)

Los factores condicionantes, que potencian o intensifican los fenómenos naturales, básicamente son los parámetros topográficos y variables que contribuyen a la menor o mayor generación de escorrentía, como el tipo de suelo o la cubierta vegetal del terreno. (Lario y Bardají, 2016)

A continuación, se describen los factores condicionantes más comunes para distintos tipos de inundaciones:

## **Geología**

La geología es un importante criterio porque puede amplificar o atenuar la magnitud de los eventos de inundación debido a la permeabilidad de la roca y la tasa de infiltración. Las formaciones permeables favorecen la infiltración de agua, a través del flujo de agua subterránea y superficial, tales como los depósitos aluviales y continentales. Por el contrario, las rocas impermeables, como la roca cristalina, favorecen la escorrentía superficial. (Echogdali, Boutaleb, Elmouden, & Ouchchen, 2018).

## **Pendiente**

La pendiente está altamente correlacionada tanto con el volumen como con la velocidad de la escorrentía superficial, así como con la infiltración en el agua subterránea. Por lo tanto, las áreas planas se inundan más rápido que las áreas con alta pendiente donde la escorrentía fluye más abajo. (Patrikaki et al., 2018).

## **Distancia al río**

La expansión de un evento de inundación depende de la distancia de una región a la red drenaje. Las regiones ubicadas cerca a la red de drenaje, generalmente sufren más inundaciones que las áreas que están lejos, ya que las áreas cercanas están dentro de la ruta del flujo del río. (Das, 2019).

## **Suelos**

Las características del suelo controlan la cantidad de agua que puede infiltrarse en el suelo y, por lo tanto, la cantidad de agua que se convierte en flujo. Por lo cual, la posibilidad de peligro de inundación aumenta con la disminución de la capacidad de infiltración del suelo. (Samanta, Bhunia, Shit, & Pourghasemi, 2018).

## **Uso actual de suelos**

Los tipos de uso actual del suelo ejercen una influencia significativa, directa o indirecta, sobre procesos hidrológicos como la infiltración, la evapotranspiración y la generación de escurrimientos (Tehrany, Jones, y Shabani, 2019).

### **2.2.4. Factores desencadenantes**

Son parámetros que desencadenan eventos y/o sucesos asociados que pueden generar peligros en un ámbito geográfico específico (Cenepred, 2014)

Según Ollero (1997) y Adhikari et al. (2010), los factores desencadenantes de inundaciones fluviales pueden estar relacionados con diversas causas tales como: precipitaciones persistentes, lluvias intensas de corta duración, fusión de nieve y hielo, descarga de aguas represadas por glaciares, procesos de remoción en masa, rotura de embalses e infraestructura hidráulica y crecidas asociadas a erupciones volcánicas (Citado en Rojas, Mardones, Arumí, y Aguayo, 2014)

### **2.2.5. Desastre**

Los desastres naturales se definen como “cualquier evento catastrófico causado por la naturaleza o los procesos naturales de la tierra”. La gravedad del desastre es contabilizada por el número de pérdidas de vida y económicas. Así como la capacidad de la población para su reconstrucción. (OPS, 2015).

Para la Comisión Económica Para América Latina y el Caribe – Cepal (2013), los desastres naturales son la consecuencia de fenómenos naturales desencadenantes de procesos que provocan daños físicos y pérdidas de vidas humanas y de capital, al tiempo que alteran la vida de comunidades, personas y la actividad económica de los territorios afectados.

Como bien lo menciona Maskrey (1993) los desastres naturales por lo general se refieren a las consecuencias y no a las causas de estos fenómenos. Es decir, los desastres son las consecuencias de la actividad natural terrestre y cómo estas afectan al funcionamiento de una comunidad o sociedad, en daños materiales o inmateriales.

Entonces, la conceptualización de los desastres naturales se define como cada uno de los fenómenos naturales que tienen potencialidad de causar daños humanos, o a una comunidad en específica de seres vivos, generando afecciones a las condiciones naturales que estos tienen.

Los desastres naturales son consecuencia de la combinación de dos factores: los fenómenos naturales capaces de desencadenar procesos que provocan daños físicos y pérdidas de vidas humanas y de capital, y la vulnerabilidad de las personas y los asentamientos humanos. Estos eventos alteran las condiciones de vida de las comunidades y las personas, así como la actividad económica de los países. Mientras que algunos se originan en fenómenos violentos o inesperados, como los terremotos, otros que son de generación o evolución lenta, como las sequías, tienen un efecto negativo en las sociedades y economías, y dependiendo de su intensidad y duración, pueden llegar a afectar la provisión de alimentos o servicios esenciales a la población (Cepal, 2004)

#### 2.2.6. Riesgo

Según la Oficina de Naciones Unidas para la Reducción de Riesgo de Desastres – UNDRR (2004), el riesgo es probabilidad de consecuencias perjudiciales o pérdidas esperadas (muertes, lesiones, propiedad, medios de subsistencia, interrupción de actividad económica o deterioro ambiente) resultado de interacciones entre amenazas naturales o antropogénicas y condiciones de vulnerabilidad.

El Instituto Nacional de Defensa Civil (2010) define riesgo como “la estimación o evaluación matemática de probables pérdidas de vidas, de daños a los bienes materiales, a la propiedad y la economía, para un período específico y un área conocida.” El riesgo se evalúa en función  $f()$  del peligro y la vulnerabilidad (Cenepred, 2014). Esta se presenta en la Ecuación 1.

$$R_{iet} = |f(P_i, V_e)|_t \quad (1)$$

Donde:

$R$  = Riesgo

$f$  = En función

$P_i$  = Peligro con la intensidad mayor o igual a  $i$  durante un período de exposición " $t$ "

$V_e$  = Vulnerabilidad de un elemento expuesto " $e$ "

Según la Directiva de Inundaciones de la Comisión Europea, el riesgo a inundaciones se define como “la combinación de las probabilidades de un evento de inundaciones y las potenciales consecuencias adversas para la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural y la actividad económica asociada con un evento de inundación”. Esta combinación de probabilidades y consecuencias interpreta el riesgo como un valor esperado de las consecuencias. (Schumann, 2011)

### **2.2.7. Sistemas de Información Geográfica (SIG)**

Las definiciones del Sistema de Información Geográfica (SIG) han ido modificándose a través del tiempo debido a la aparición de nuevas tecnologías de bases de datos y una variedad de aplicaciones, sin embargo, se mantiene los componentes y las funciones que realiza.

Según Deuker & Kjerne (1989), es un sistema de hardware, software, datos, personas, organizaciones y convenios institucionales para el análisis, recopilación, distribución y almacenamiento de información territorial. (Junta de Castilla y León, 2009)

El Centro Nacional de Información y Análisis Geográfico (NCGIA, por sus siglas en inglés) en el año 1990 lo define como “un sistema de software, hardware y procedimientos que ayudan a la gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espaciales referenciados para resolver problemas complejos de planificación y gestión”. (Junta de Castilla y León, 2009)

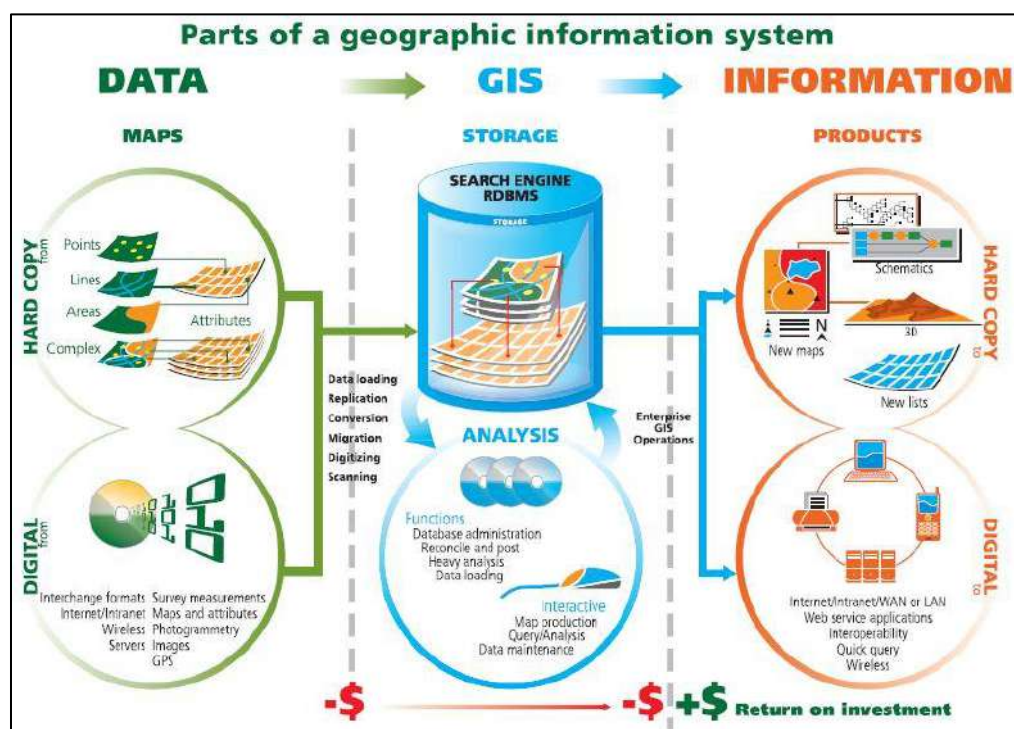
Lo y Yeung (2007) define al SIG como: “Sistema computacional capaz de capturar, almacenar, manipular y visualizar los datos que contienen una referencia geográfica para convertirlos en información espacial útil en la solución de problemas espaciales complejos. El énfasis en los datos geográficos y la capacidad de analizar los datos espacialmente distinguen los SIG de otros tipos de sistemas de información”.

La recopilación de datos geográficos y su transformación en información útil mediante un Sistema de Información Geográfico va más allá de los

métodos tradicionales de gestión y procesamiento de datos debido a que esta herramienta facilita la toma de decisiones mediante la inteligencia espacial. Por lo afirmado anteriormente, Lo y Yeung (2007) concluye lo siguiente: “cualquier definición de SIG debe incluir no solo funciones del procesamiento de datos en estos sistemas, sino también la capacidad analítica para derivar conocimientos espaciales.

Para una mejor comprensión, en la Figura 1 se representa un modelo holístico de un sistema de información geográfica funcional, que convierte los datos, mediante análisis, en información útil, en el centro se puede ver que los SIG almacenan datos espaciales que contienen información de atributos vinculados lógicamente (desde la izquierda), en un base de datos de almacenamiento de SIG, donde las funciones analíticas son controladas interactivamente por un grupo de profesionales para generar los productos de información necesarios (mostrados a la derecha). (Tomlinson, 2007)

**Figura 1:** Partes de un Sistema de Información Geográfica (SIG)



Fuente: Tomlinson, 2007.

## Aplicaciones del SIG

Los SIG se han convertido en una herramienta poderosa para resolver problemas complejos debido a sus capacidades para integrar, visualizar

y analizar datos geográficos en diversos dominios y disciplinas (Nielson, 2014).

El campo de aplicación de los SIG es muy amplio, pudiendo utilizarse en cualquier actividad con un componente espacial, tales como, catastro, planificación urbana, gestión de recursos naturales, planificación comercial, rutas de transporte, evaluación de impacto ambiental, estudios demográficos, gestión de riesgo de desastres, entre otros. En la presente investigación, nos centraremos en la aplicación del SIG en la gestión de riesgo de desastres.

Según la Organización de Estados Americanos (OEA), el uso de los SIG para el análisis de riesgos ofrece una serie de ventajas: puede requerir una inversión mínima, si es que hay una selección adecuada de equipos; puede multiplicar la productividad, reducir costos y dar resultados de más alta calidad que técnicas manuales; puede, asimismo, facilitar la toma de decisiones y mejorar la coordinación entre las organizaciones involucradas (Bender y Bello, 1993). Adicionalmente, puede mejorar la amplitud y profundidad de los análisis de riesgos, orientar los procesos de desarrollo, y asistir a planificadores en la selección de medidas de mitigación y la implementación de acciones de preparativos y respuesta. El uso de un SIG puede ahorrar tiempo en la preparación de mapas y facilitar la evaluación de diferentes estrategias de desarrollo, referente a usos de tierra existentes y potenciales. Mediante la combinación de diferentes fuentes de información, un SIG puede descubrir información nueva y valiosa sobre los riesgos, que permita ayudar a los planificadores a evaluar el impacto de las amenazas en actividades de desarrollo existentes y propuestas.

Los SIG son actualmente herramientas de apoyo precisas y valiosas para definir mapas de susceptibilidad a inundaciones en diferentes escalas espaciales. (Liuzzo, Sammartano, y Freni, 2019)

## **2.3. Marco Metodológico**

### **2.3.1. Proceso de Análisis Jerárquico (AHP)**

El Proceso de Análisis Jerárquico, introducido por Thomas L. Saaty en la década de los 70; este método consiste en la jerarquización de procesos dependiendo de una evaluación multicriterio para lograr un óptima de decisiones.

El método AHP se utiliza cuando existe una serie de opciones donde se tiene que priorizar algunas de estas y consecuentemente tomar la más conveniente de todas. Estas decisiones, como bien lo menciona Taoufikallah (2013), puede variar en su complejidad, desde ser simples decisiones personales de índole cualitativa, hasta decisiones muy complejas y netamente cuantitativa. Siendo el resultado del AHP, una jerarquización con prioridades que muestran la preferencia global para cada una de las alternativas de decisión. (Toskano, 2005)

Para Juan Escrivá (2015), el AHP resulta ventajoso en relación a otros tipos de decisores multicriterio por las siguientes razones:

- Presentar un sustento matemático
- Permitir desglosar y analizar un problema por partes
- Permitir la medición de criterios cuantitativos y cualitativos
- Permitir la verificación del índice de consistencia y de ser necesario realizar correcciones

Para poder describir el método AHP, es necesario describir sus tres funciones básicas:

#### **A. Estructuración de la Complejidad. -**

Saaty planteo la descomposición jerárquica para solucionar el problema de la complejidad. Esto se basa en descomponer un problema en subproblemas, los cuales se relacionan directamente con el problema principal, y al solucionar los subproblemas, se logra la solución del problema inicial debido a que se encuentran relacionados entre sí. (Osorio & Orejuela, 2008).

#### **B. Medición de escalas. -**

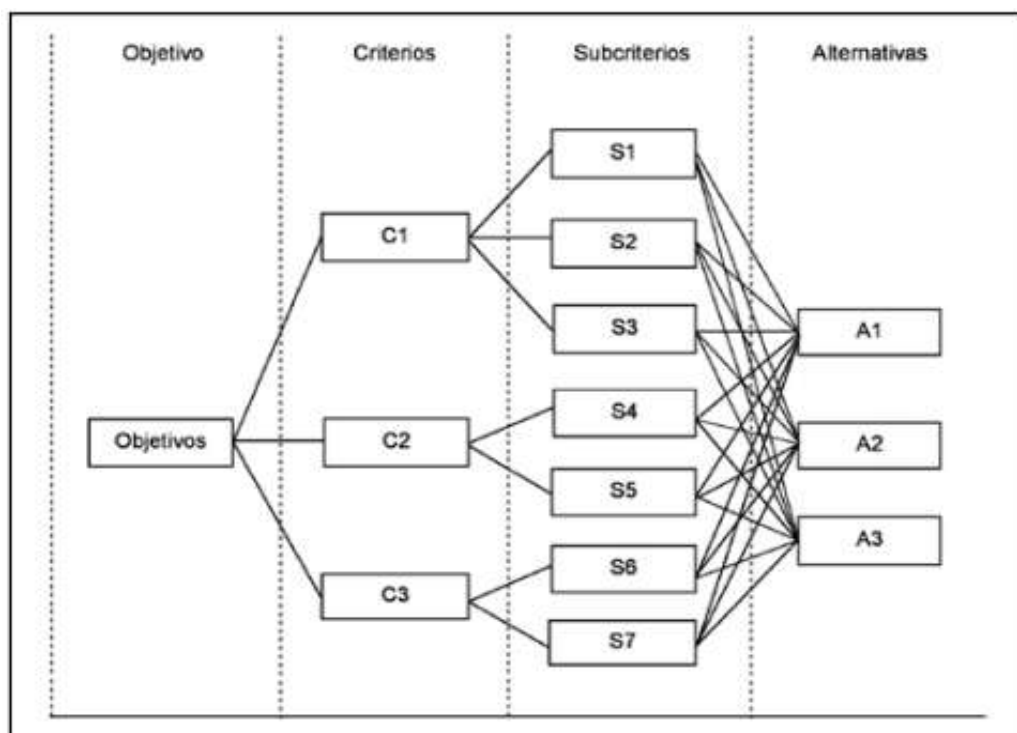
El AHP puede ser aplicado en diferentes campos por su gran flexibilidad, la cual se debe a su capacidad de medir factores tanto subjetivos como objetivos a partir de estimaciones verbales, numéricas o gráficas. Por otro lado, este método posee una escala general, clara y con una gran amplitud de comparaciones que facilita su aplicación en diferentes situaciones y su utilización por los tomadores de decisiones. (Osorio & Orejuela, 2008).

### C. Síntesis. -

El método AHP está enfocado en el sistema en general y en la obtención de la solución del problema en su totalidad, por lo tanto, se podría concluir que es totalmente sistémico. A pesar de la descomposición jerárquica, el método no deja de centrarse en el objetivo general y las interdependencias entre los conjuntos de factores, criterios y alternativas. (Osorio & Orejuela, 2008).

Primero, los tomadores de decisiones deberán realizar la jerarquización del problema de forma visual mediante la separación del problema y sus componentes principales en partes. Los pasos a seguir para realizar la estructuración del modelo jerárquico son (Figura 2) (i) definición del objetivo, (ii) identificación de criterios, (iii) identificación de subcriterios y (iv) identificación de alternativas. (Berumen & Llamazares, 2007).

**Figura 2:** Modelo jerárquico para la toma de decisiones con el AHP.



Fuente: Berumen & Llamazares, 2007

La determinación de los objetivos consiste en el establecimiento del objeto del análisis, la determinación del problema y sus componentes relevantes.

La identificación de criterios y subcriterios es pertinente para la resolución de problemas para lograr un objetivo, cabe decir, que es clave

para la toma de decisiones, ya que pone en evidencia las preferencias que tienen los implicados. A su vez, la identificación de alternativas muestra las posibles propuestas que permitirán alcanzar al objetivo general. (Berumen & Llamazares Redondo, 2007)

El proceso del desarrollo del método AHP se subdivide en varias etapas. La primera etapa consiste en la determinación de los componentes o factores que son los que determinan al problema. Con ello se elabora la estructura jerárquica básica del problema.

## Comparaciones pareadas

Luego de haber sido determinados estos factores se procede a realizar las comparaciones pareadas. Bien lo menciona Saaty (1990), que el AHP trata directamente con pares ordenados de prioridades de importancia, preferencia o probabilidad de pares de elementos en función de un atributo o criterio común representado en la jerarquía de decisión. El AHP hace posible la toma de decisiones grupal mediante el agregado de opiniones, de tal manera que satisfaga la relación recíproca al comparar dos elementos. Bajo esta premisa es que la evaluación de los diferentes criterios depende del juicio especialista, ya sean cuantitativos o cualitativos. Estos se realizarán utilizando la escala fundamental de comparación de pares (Tabla 1). Donde se establecen primordialmente valores de calificación 1, 3, 5, 7 y 9; mientras que los valores 2, 4, 6 y 8 son valores intermedios entre dos juicios adyacentes, que se emplean cuando es necesario un término medio entre las dos intensidades anteriores.

**Tabla 1:** Escala fundamental de comparación por pares

| Escala Numérica | Escala Verbal                                              |
|-----------------|------------------------------------------------------------|
| 1               | Ambos criterios o elementos son de igual importancia       |
| 3               | Débil o moderada importancia de uno sobre el otro          |
| 5               | Importancia esencial o fuerte de un criterio sobre el otro |
| 7               | Importancia demostrada de un criterio sobre otro           |
| 9               | Importancia absoluta de un criterio sobre otro             |
| 2               | Entre igual y moderadamente preferible                     |
| 4               | Entre moderada y fuertemente preferible                    |
| 6               | Entre fuerte y extremadamente preferible                   |
| 8               | Entre muy fuerte y extremadamente preferible               |

Fuente: Saaty, (1994)

Para trabajar con los valores que se determinan en cada evaluación de pares, se establece la matriz de comparaciones pareadas, la cual es

mostrada en la Ecuación 2. Esta corresponde a una matriz  $n \times n$  donde  $n \in \mathbb{Z}^+$ . Siendo  $m_{ij}$  el correspondiente elemento  $(i,j)$ , donde a su vez es la medida de preferencia de la alternativa en la fila  $i$  cuando se la compara con la alternativa de la columna  $j$ . Tomando en cuenta que cuando  $i=j$  el valor de  $m_{ij}$  será la unidad. (Toskano, 2005)

$$M = \begin{pmatrix} 1 & m_{12} & \cdots & m_{1n} \\ 1/m_{12} & 1 & \cdots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/m_{1n} & 1/m_{2n} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Donde cada uno de los elementos  $m_{ij}$  corresponde a una de las comparaciones realizadas entre dos factores.

### Sintetización

Consecuentemente, el AHP propone realizar el orden de prioridad de cada uno de los factores, este proceso se denomina sintetización; el cual requiere un proceso matemático entre los valores y vectores plasmados en la matriz. El resultado de este proceso se denomina vector de prioridades.

Este proceso se realiza con la sumatoria de los valores de cada columna de la matriz de comparaciones pareadas.

Posteriormente se divide cada elemento de la matriz, entre el total de su columna; a la matriz resultante se le denomina matriz de comparaciones pareadas normalizada.

Luego se calcula el promedio de los elementos de cada fila de la matriz de comparaciones pareadas normalizada. Los valores resultantes corresponden a el “peso” que tiene cada factor. El orden de prioridad es determinado del mayor al menor valor de los “n” promedios obtenidos; este vector obtenido, se denomina vector de prioridades. Saaty (1990)

### Matriz de prioridades

Denominaremos matriz de prioridades, a la que resume las prioridades para cada alternativa en términos de cada criterio (Toskano, 2005). Esta matriz se generará en forma de la Ecuación 3.

$$\begin{array}{c}
\text{Factor 1} \\
\text{Factor 2} \\
\vdots \\
\text{Factor n}
\end{array}
\begin{pmatrix}
\text{Criterio 1} & \text{Criterio 2} & \cdots & \text{Criterio m} \\
w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1m} \\
w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2m} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
w_{n1} & w_{n2} & \cdots & w_{nm}
\end{pmatrix} \quad (3)$$

Donde  $w_{ij}$  corresponde a la prioridad de la alternativa  $i$  con respecto al criterio  $j$ , para  $i = 1, 2, \dots, n$ ; y  $j = 1, 2, \dots, m$ .

## Prioridad global

A fin de poder integrar los valores obtenidos tanto de nuestra matriz de prioridades con nuestro vector de prioridades. La prioridad global para cada alternativa de decisión se resume en el vector columna que resulta del producto de la matriz de prioridades de los criterios. (Toskano, 2005).

$$\begin{pmatrix}
w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1m} \\
w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2m} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
w_{n1} & w_{n2} & \cdots & w_{nm}
\end{pmatrix}
\begin{pmatrix}
w'_1 \\
w'_2 \\
\vdots \\
w'_m
\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}
wg_1 \\
wg_2 \\
\vdots \\
wg_n
\end{pmatrix} \quad (4)$$

Donde  $wg_i$  es la prioridad global (respecto a la meta global) de la alternativa  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ).

## Relación de consistencia

Los juicios de valor emitidos en la relación entre pares de factores pueden estar expuestos a ciertas inconsistencias al ser emitidos como resultantes de distintas opiniones expertas o bien por tener carácter subjetivo, por lo que es necesario considerar en términos de calidad la consistencia de estos.

La relación de consistencia determina a través de términos matemáticos, el grado de congruencia entre los juicios de valor emitidos. Si este grado es aceptable se puede continuar con el proceso de decisión; de lo contrario, el emisor de juicios debe de revisar y/o adecuar los valores emitidos, a fin de continuar con el procedimiento. (Toskano, 2005)

Por lo que en AHP se dice que el decisor, o persona que introduzca los juicios, es consistente si la matriz de comparaciones lo es; es decir si se verifica que  $a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik}$ ,  $\forall i, j, k$ . (Moreno, 2002). Es decir, una matriz  $A$  es perfectamente consistente, siempre y cuando produzca una matriz normalizada  $N$  ( $n \times n$ ), de elementos  $a_{ij}$ , donde todas las columnas son

idénticas, tales como  $a_{12} = a_{13} = \dots = a_{1n} = a_1$ ; siendo esta condición la que se repita en todas las filas de la matriz N.

Por lo que la matriz de comparación correspondiente A, se puede determinar a partir de N, dividiendo los elementos de la columna i entre  $a_i$ . (Toskano, 2005), el cual es el proceso inverso de determinación de N a partir de A).

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_1/a_2 & \dots & a_1/a_n \\ a_2/a_1 & 1 & \dots & a_2/a_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_n/a_1 & a_n/a_2 & \dots & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} na_1 \\ na_2 \\ \vdots \\ na_n \end{pmatrix} = n \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} \quad (5)$$

Donde a partir de las operaciones se concluye que la consistencia de A es dada cuando  $AW = nW$  o bien,  $(A - n)W = 0$ . Este es un sistema de ecuaciones lineales homogéneas. Si y solo si el determinante de  $A - n$  desaparece, n es un valor propio de A y W es su vector propio; resulta que n es el valor propio máximo y las entradas de w que son las prioridades que queremos, son siempre positivas. (Saaty & Islam, 2015)

$$\begin{pmatrix} 1 & a_1/a_2 & \dots & a_1/a_n \\ a_2/a_1 & 1 & \dots & a_2/a_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_n/a_1 & a_n/a_2 & \dots & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} = n_{m\acute{a}x} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} \quad (6)$$

Donde se infiere que, cuando  $n_{m\acute{a}x}$  sea más cercano a n, mayor será la consistencia de la matriz A; por lo que la razón de consistencia (RC), se calcula como el cociente entre el índice de consistencia de la matriz (IC) y el índice de consistencia aleatorio (IA).

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad (7)$$

Siendo IC calculado como:

$$IC = \frac{n_{m\acute{a}x} - n}{n - 1}$$

El  $n_{m\acute{a}x}$  se determina al primero calcular el vector columna A, y posteriormente sumando sus elementos.

El índice consistencia aleatorio para los diferentes “n” obtenidos, ya se encuentra establecido, los cuales han sido obtenidos mediante la simulación de 100 000 matrices. (Aguaron & Moreno-Jimenez, 2003).

**Tabla 2:** Valores del IA respecto a la cantidad de “n”

|    | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| IA | 0,525 | 0,882 | 1,115 | 1,252 | 1,341 | 1,404 | 1,452 | 1,484 | 1,513 | 1,535 | 1,555 | 1,570 | 1,583 | 1,595 |

Fuente: Aguaron & Moreno-Jimenez (2003)

Donde una vez calculada la razón de consistencia, este valor debe de variar entre 0 y 1. Si este valor excede 0,1 es un signo de inconsistencia, y se recomendaría volver a realizar los juicios. Un valor de RC que sea menor a 0,1, representa un razonable nivel de consistencia. (Aguaron & Moreno-Jimenez, 2003).

#### **D. Ventajas y desventajas**

Las ventajas y desventajas del modelo AHP son las siguientes:

Ventajas (Toskano, 2005):

- Presenta un sustento matemático
- Permite desglosar y analizar un problema complejo por partes.
- Permite medir criterios cuantitativos y cualitativos mediante una escala común.
- Incluye la participación de diferentes personas o grupos de interés y generar un consenso.
- Genera una síntesis y da la posibilidad de realizar análisis de sensibilidad.

Desventajas (Zanazzi, 2013):

- Si la estructura jerárquica del proceso de decisión se encuentra mal diseñada, o no se consideran factores importantes para la investigación, los pesos de los criterios

pueden distorsionarse, causando errores en los resultados obtenidos.

### **2.3.2. Random Forest (RF)**

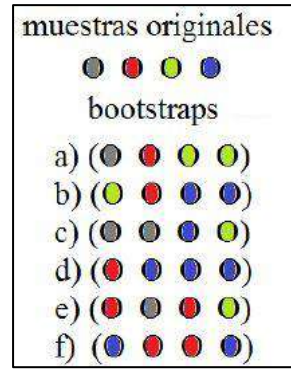
Random Forest es un poderoso método de aprendizaje supervisado basado en ensambles desarrollado por Breiman (2001), quien se inspiró en las investigaciones de Ho (1995) de Laboratorios Bell y Amit y German (1996).

Random Forest surge de la combinación de las técnicas de Classification And Regression Tree (CART) y Bootstrap Aggregating (Bagging) para realizar la combinación de árboles predictores en la que cada árbol depende de los valores de un vector aleatorio probado independientemente y con la misma distribución para cada uno de estos. (Alarcón Flores, 2017).

El modelo Random Forest consiste en utilizar un gran conjunto de árboles (500 - 2000) que se entrenan con diferentes subconjuntos del conjunto inicial de entrenamiento. Estos subconjuntos se obtienen mediante bootstrapping, de este modo cada árbol se entrena con aproximadamente dos tercios de los casos originales y el tercio restante (denominado Out Of Bag) se reserva para la validación. (Gomariz, 2015)

El modelo selecciona un conjunto aleatorio de variables para cada corte. Por convención, el número de variables a considerar es  $\sqrt{p}$ , donde  $p$  es el número de variables de entrada. Por ejemplo, si se tienen 100 variables de entrada, se seleccionan al azar 10 de ellas para cada corte. Esto fuerza los árboles a encontrar formas alternativas de predecir la variable objetivo, además de evitar correlaciones entre los árboles. Al final, se mantiene el elemento de aleatoriedad en los conjuntos de entrenamiento, así como al realizar los cortes en los árboles. Obtenido el ensamble, se introducen variables desconocidas a través de cada árbol, y se obtiene el nodo final en el árbol. El nodo final es el voto mayoritario entre las predicciones de los árboles de decisión. (Jasso, 2016)

**Figura 3:** Ejemplo de *bootstrapping* (simplificado)



Fuente: Jasso López, 2016

### A. Formación del Algoritmo Random Forest

A continuación, se describe el algoritmo para construir cada árbol (Hastie, Tibshirani, y Friedman, 2009):

- Para la construcción de cada árbol  $b$ ,  $b = 1$  a  $B$ :
  - (a) Primero, se extrae una muestra bootstrap  $Z^*$  del tamaño  $N$  de los datos de entrenamiento.
  - (b) Luego, se construye un árbol Random Forest  $T_b$  con los datos bootstrap repitiendo los pasos siguientes para cada nodo terminal del árbol, hasta que se logra un tamaño de nodo mínimo  $n_{\min}$  previamente designado.
    - i. Seleccionar  $m$  variables al azar entre las  $p$  variables.
    - ii. Elegir el mejor punto de división o variable entre las " $m$ " variables.
    - iii. Dividir el nodo en dos nodos hijos.
- Mostrar ensamble de árboles  $\{T_b\}_1^B$

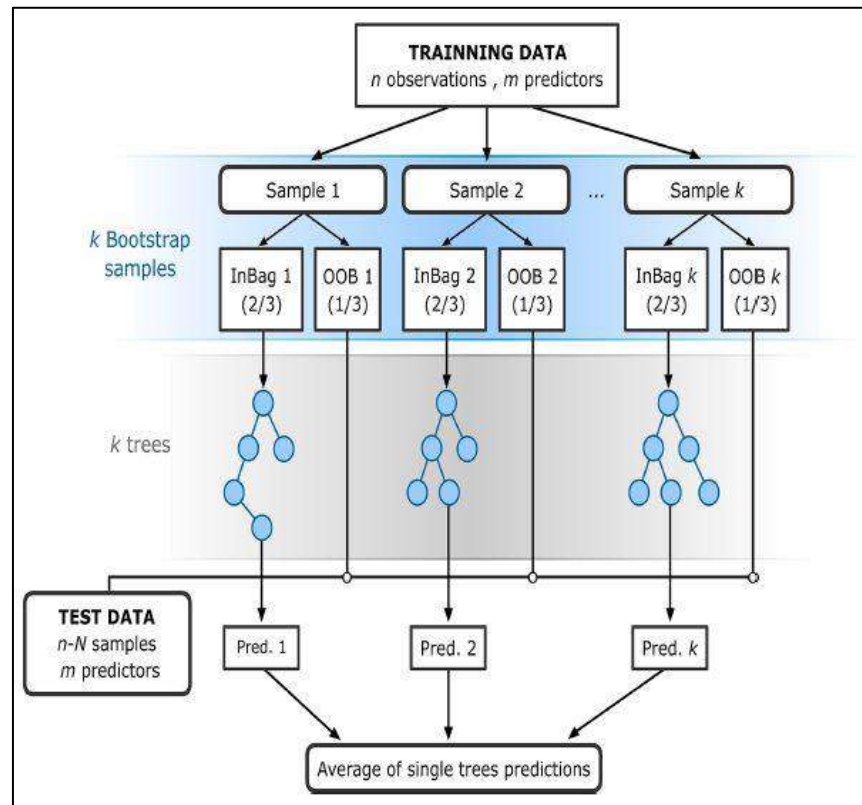
Para hacer una predicción en un nuevo punto  $x$ :

Regresión:  $\hat{f}_{rf}^B(x) = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B T_b(x)$

Clasificación: Sea  $\hat{C}_b(x)$  la predicción de clase del  $b$  ésimo Random Forest. Entonces,  $\hat{C}_{rf}^B(x) = \text{voto mayoritario } \{\hat{C}_b(x)\}_1^B$ . El voto mayoritario se encarga de clasificar un nuevo punto, en base a la

predicción realizada por la mayoría de los árboles del modelo. (Alarcón, 2017)

**Figura 4:** Diagrama de flujo del algoritmo Random Forest.



Fuente: Rodríguez-Galiano et al., 2016

## B. Estimación del error Out of Bag (OOB):

La tasa de error OOB es utilizada como un proceso interno de validación cruzada para evaluar el rendimiento del bosque. (Xu, 2013)

Se define la tasa de error Out of Bag ( $OOB_i$ ) de una observación, como el error obtenido al ser clasificada por los árboles del bosque contruidos sin su intervención es decir dejando fuera a la muestra no modelada. La estimación OOB del error es el promedio de todos los  $OOB_i$  para todas las observaciones del conjunto de datos OOB. (Cárdenas, 2019)

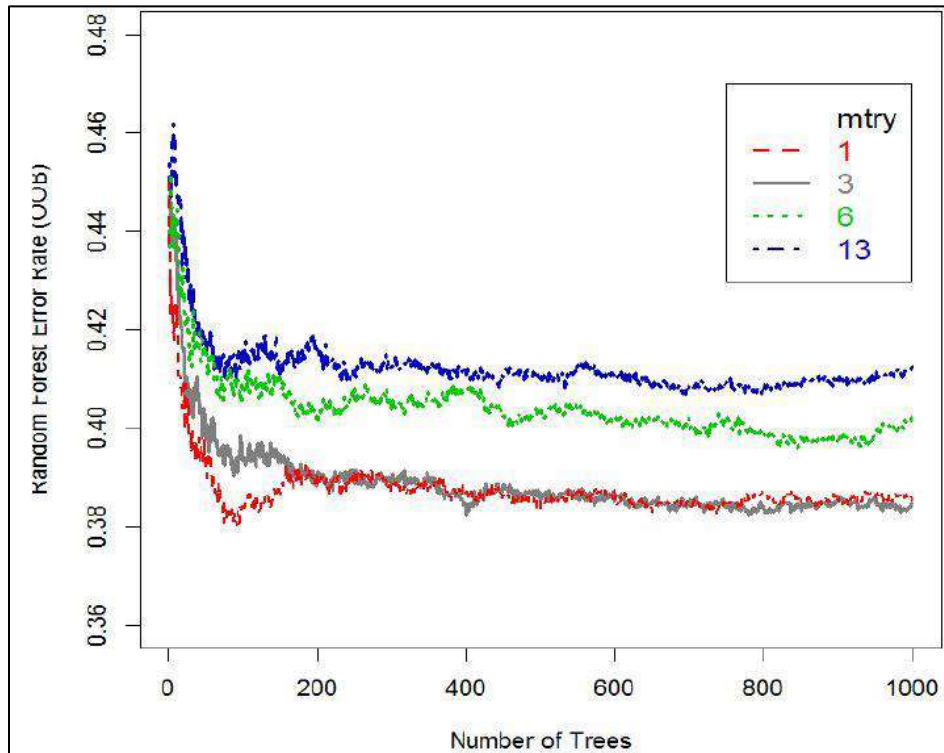
Este error se calcula de la siguiente forma:

$$OOB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_{iOOB})^2 \quad (8)$$

Siendo  $y_{iOOB}$  la predicción para la observación  $i$  obtenida promediando las predicciones individuales de los árboles para los que esa observación se han quedado “fuera de la bolsa” (OOB) e  $y_i$  el valor real de la variable. (Pita, 2017)

El error OOB está vinculado directamente con los parámetros  $mtry$  y  $ntree$  del modelo. El valor  $mtry$  esta influenciado por el número de variables de entrada del modelo. No obstante, al reducir el número de árboles de forma asintótica ocurre lo mismo con el error OOB (ver Figura 5.) (Pita, 2017).

**Figura 5:** Variación del OOB con el número de árboles para diferentes valores del  $mtry$



Fuente: Pita González-Campos, 2017

### C. Importancia de las variables

Para medir la importancia de la variable  $k$ , se realiza el siguiente procedimiento para cada árbol. Primero, las observaciones OOB se pasan por el árbol y se calculan los valores pronosticados. A continuación, los valores de la variable  $k$  se permutan aleatoriamente

en los datos OOB, manteniendo el resto de las variables predictoras fijas. Estos datos OOB modificados se pasan al árbol y se calculan los valores pronosticados. Este proceso proporciona dos conjuntos de predicciones OOB para cada observación: un conjunto obtenido de datos reales, el otro conjunto de datos variables “k” permutados.

Para la clasificación, la diferencia entre la tasa de error de las predicciones obtenidas de los datos permutados y las obtenidas usando datos permutados da una medida de importancia variable para la observación. Se utiliza el mismo procedimiento para la regresión, pero usando MSE en lugar de tasas de error. (Cutler, Cutler, y Stevens, 2012)

#### **D. Sobreajuste**

Pita (2017) afirma lo siguiente respecto al sobreajuste: “es un fenómeno que se produce cuando el algoritmo de tratamiento de datos generados se ajusta con mucha precisión a los datos de partida con los que se ha creado, pero es incapaz de predecir con suficiente precisión datos que se encuentran fuera de esta muestra inicial.”

A diferencia de otros algoritmos, Random Forest es menos sensible al sobreajuste debido a que la aleatoriedad en la elección de la muestra para la construcción de cada árbol y de variables elegidas para inducir a la partición en cada nodo. (Pita, 2017)

No obstante, cabe la posibilidad que ante una elección errónea de los parámetros *ntree* y *mtry* se ocasione un sobreajuste en el modelo, perdiendo la precisión en las predicciones posteriores al entrenamiento.

#### **E. Ventajas y desventajas**

Las ventajas y desventajas del Random Forest son las siguientes (García, 2018):

Ventajas:

- El algoritmo Random Forest es uno de los más certeros de los algoritmos de aprendizaje actualmente disponibles.

- La ejecución del algoritmo es rápida.
- Random Forest puede manejar gran cantidad de variables de entrada sin excluir ninguna.
- Permite determinar la importancia de las variables en la clasificación.
- Calcula las proximidades entre los pares de casos que pueden usarse en los grupos, mostrando así una localización de valores atípicos, y obteniendo vistas interesantes de los datos.

Desventajas:

- La clasificación obtenida mediante Random Forest es compleja de interpretar.
- El algoritmo Random Forest suele parcializarse a favor de las variables categóricas con mayor cantidad de niveles.
- En el caso que los datos contengan grupos de atributos correlacionados con similar relevancia para el rendimiento, se favorecerá a los grupos más pequeños sobre los más grandes.

### **2.3.3. Indicador para la comparación de modelos - Curva ROC**

La curva de características de funcionamiento receptor, con sus siglas en inglés ROC, tienen su origen en la teoría de detección de señales investigado por Swets (1996), el cual se utilizaba para representar el equilibrio entre las tasas de aciertos y las tasas de falsas alarmas de los clasificadores.

Es una técnica para visualizar, organizar y seleccionar clasificadores en función a su rendimiento. (Fawcett, 2006) Las curvas ROC se utilizan comúnmente para presentar resultados para problemas de decisión binarios en el aprendizaje automático. (Davis & Goadrich, 2006)

Spackman (1989), quien fue uno de los primeros en utilizar gráficos ROC en aprendizaje automático, demostró la posibilidad de emplear la curva ROC para la evaluación y comparación de algoritmos. Los últimos años han visto un aumento en el uso de gráficos ROC en la comunidad de

aprendizaje automático, debido en parte a la constatación de que la precisión de la clasificación simple a menudo es una métrica pobre para medir el rendimiento (Provost y Fawcett, 1997; Provost et al., 1998) (Fawcett, 2006)

La matriz de confusión (Figura 6) muestra los cuatro posibles resultados de una predicción de clases binarias. Los valores VP y FN de la matriz representan las decisiones tomadas correctamente, por lo contrario, los valores VN y FP representan los errores (la confusión) entre las diferentes clases.

**Figura 6:** Matriz de confusión de la curva ROC.

|                           |   | <u>Clases Verdaderas</u> |                      |
|---------------------------|---|--------------------------|----------------------|
|                           |   | P                        | N                    |
| <u>Clases Hipotéticas</u> | V | Verdaderos Positivos     | Falsos Positivos     |
|                           | F | Falsos Negativos         | Verdaderos Negativos |
| Columnas totales          |   | P                        | N                    |

Fuente: Elaboración propia.

La tasa de predicción positiva de un clasificador se estima como:

$$Tasa\ de\ predicción\ positiva = \frac{VP}{VP + FP} \quad (9)$$

La tasa de predicción negativa de un clasificador se estima como:

$$Tasa\ de\ predicción\ negativa = \frac{VN}{VN + FN} \quad (10)$$

Adicionalmente, otros términos asociados a la curva ROC son:

$$\text{Sensibilidad} = \frac{VN}{VP + FN} \quad (11)$$

$$\text{Especificidad} = \frac{FN}{VN + FP} \quad (12)$$

Este método utiliza el área debajo de la curva (AUC) para la evaluación cuantitativa, que representa (1-Especificidad) en el eje X contra la sensibilidad en el eje Y. (Chen et al, 2019)

El AUC representa la calidad del modelo para predecir de manera confiable la ocurrencia o no de inundaciones, y un modelo de ajuste perfecto tiene un valor de AUC de 1 (Youssef et al., 2015a).

El AUC se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$AUC = \frac{(\sum VP + \sum VN)}{(P + N)} \quad (13)$$

Donde P es el número total de inundaciones y N es el número total no inundaciones. (Chen et al., 2017)

Los parámetros asociados con los clasificadores estadísticos se pueden variar para cambiar las tasas de VP y FP. Cada conjunto de valores de parámetros puede dar como resultado un par (VP, FP) o punto de operación diferente. Es posible cambiar una tasa de FP más baja (más alta) por una tasa de detección de VP más alta (más baja) eligiendo los valores apropiados para los parámetros en cuestión. (Chen et al., 2017)

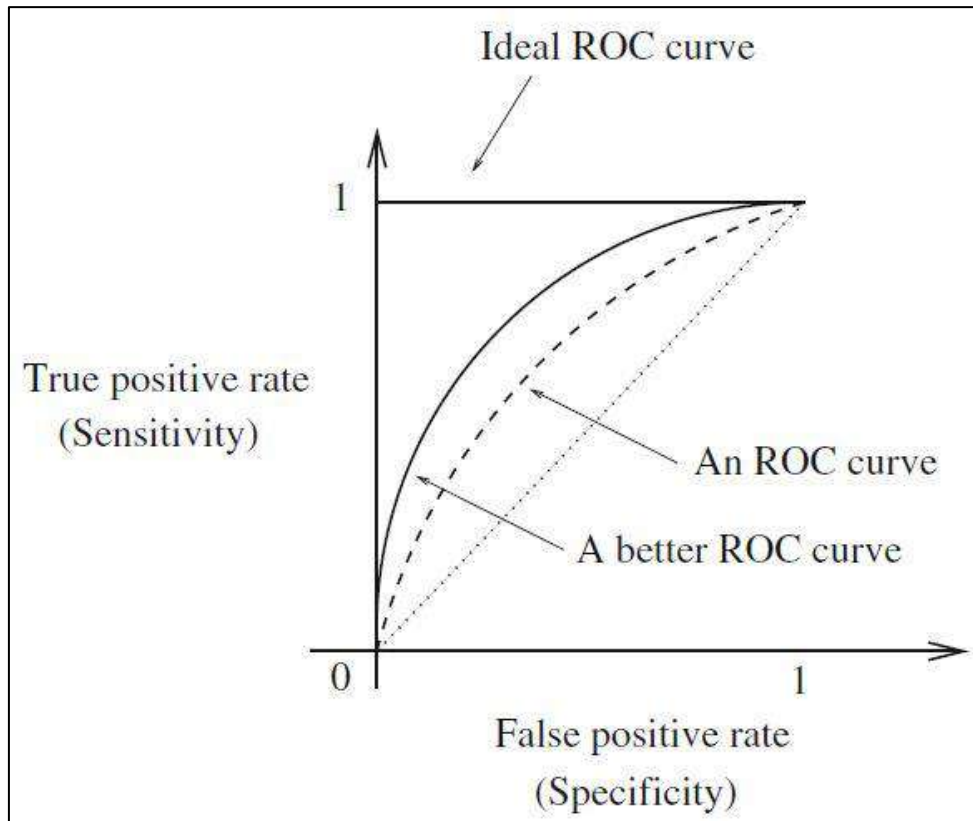
El área bajo la curva (AUC) es una modalidad aceptada para comparar el rendimiento del clasificador. Un clasificador perfecto tiene una tasa de VP de 1,0 y una tasa de FP de 0,0, lo que resulta en un AUC de 1,0. Las suposiciones aleatorias darían como resultado un AUC de 0,5. (Meyer-Bese & Schmid, 2014)

Una curva ROC demuestra varias cosas (Meyer-Baese & Schmid, 2014):

- Muestra el compromiso entre sensibilidad y especificidad (cualquier aumento en la sensibilidad irá acompañado de una disminución en la especificidad).

- Cuanto más se acerque la curva al borde izquierdo y luego al borde superior del espacio ROC, más precisa será la prueba.
- Cuanto más se acerca la curva a la diagonal de 45 ° del espacio ROC, menos precisa es la prueba.

**Figura 7:** Curvas ROC típicas.



Fuente: Meyer-Baese & Schmid, 2014

## Capítulo III

# Caracterización del área de estudio

### 3.1. Descripción General de la cuenca del Río Chancay Lambayeque

#### 3.1.1. Ubicación Geográfica

El área de estudio se ubica al norte del territorio peruano, formando parte de la vertiente hidrográfica del Pacífico, abarcando un área de aproximadamente 1337,52 km<sup>2</sup> limitando por el norte con las cuencas Motupe-La Leche, al sur con la cuenca Zaña, por el este con la zona perteneciente a Cajamarca de la propia cuenca Chancay-Lambayeque y por el oeste con el Océano Pacífico.

Políticamente se extiende sobre 16 distritos pertenecientes a 3 provincias del departamento de Lambayeque (Tabla 3). Es preciso indicar que el alcance de la presente investigación se desarrolló en la parte circunscrita en el departamento de Lambayeque.

**Tabla 3:** Ubicación Política de la cuenca Chancay-Lambayeque

| Departamento | Provincia | Distrito               |
|--------------|-----------|------------------------|
| Lambayeque   | Chiclayo  | Tumán                  |
|              |           | Oyotún                 |
|              |           | Etén                   |
|              |           | Santa Rosa             |
|              |           | Cayalti                |
|              |           | Monsefú                |
|              |           | Reque                  |
|              |           | La Victoria            |
|              |           | Saña                   |
|              |           | Pucalá                 |
|              |           | Chiclayo               |
|              |           | Pomalca                |
|              |           | Chongoyape             |
|              |           | Pátapo                 |
|              | Ferreñafe | Manuel Antonio Mesones |
|              |           | Muro                   |
|              |           | Pitipo                 |

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4 se ubica la coordenada central del área de estudio.

**Tabla 4:** Coordenada central del área de estudio

| Longitud    | Latitud    |
|-------------|------------|
| -79,491530° | -6,724570° |

Fuente: Elaboración propia.

En la Mapa N° 01, se puede observar la ubicación del área de estudio.

### 3.1.2. Aspectos Físicos

#### 3.1.2.1. Pendiente

La pendiente del área de estudio se obtuvo a partir del modelo de elevación Aster GDEM de resolución espacial de 30 metros, el cual fue descargado del servidor de EarthData de la NASA y posteriormente se procesó con ayuda del software ArcGIS.

Se determinó 7 rangos de pendiente tomando en consideración lo establecido en el Reglamento de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor (D.S. N° 017-2009-AG), así como, en la ZEE departamental.

**Tabla 5:** Clasificación de pendientes en el área de estudios

| Rango (%) | Simbología | Descripción                   | Área (ha) | Porcentaje (%) |
|-----------|------------|-------------------------------|-----------|----------------|
| 0-4       | A          | Plano a ligeramente inclinada | 11706.78  | 8.75           |
| 4-8       | B          | Moderadamente inclinada       | 47316.15  | 35.38          |
| 8-15      | C          | Fuertemente inclinada         | 10954.12  | 8.19           |
| 15-25     | D          | Moderadamente empinada        | 5398.34   | 4.04           |
| 25-50     | E          | Empinada                      | 45427.23  | 33.96          |
| 50-75     | F          | Muy empinada                  | 10265.90  | 7.68           |
| >75       | G          | Extremadamente empinada       | 2683.81   | 2.01           |

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.2.2. Fisiografía

Según la Memoria Descriptiva del Mapa Fisiográfico del departamento de Lambayeque (Gobierno Regional de Lambayeque, 2012a), la zona de estudio está dividida en cinco categorías de Gran Paisaje de las cuales, tres corresponden al relieve plano (denudacional, agradacional y mixto), seguido de un relieve colinado denudacional y relieve montañoso denudacional, en tanto el paisaje, está enmarcado según la serie, encontrando para planicie, depósitos inconsolidados del Pleistoceno y Holoceno, mientras que para colina, las formaciones y grupos corresponden al Cretáceo inferior y medio, Jurásico medio, Ordovico inferior, Pleistoceno, Oligoceno, Paleoceno.

El subpaisaje está definido según el proceso de formación teniendo varios orígenes, para planicie, su origen en la zona de estudio es diverso, tales como: aluvial, coluvial, coluvial-aluvial, marino-aluvial, fluvial, fluvio - aluvial, eólico y marino reciente, en cambio para colina y montaña está delimitada por la litología (roca sedimentaria, volcánica y plutónico) y en algunos casos acompañada de depósitos inconsolidados de origen coluvial. A continuación, se describe las unidades de subpaisaje que forman parte del área de estudio:

**Tabla 6:** Unidades fisiográficas en el área de estudio

| Gran Paisaje                                                 | Paisaje                                              | Subpaisaje                  | Elementos del Paisaje                                         | Símbolo |
|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------|---------|
| Relieve plano denudacional                                   | Planicie de depósitos inconsolidados del Holoceno    | Planicie Marino reciente    | Cordón litoral                                                | Pmr1    |
| Relieve plano agradacional                                   |                                                      | Planicie Fluvial            | Terraza baja inundable                                        | Pf3     |
|                                                              |                                                      | Planicie Aluvial            | Cono fuertemente inclinado de alta disección                  | Pal1    |
|                                                              |                                                      |                             | Cono fuertemente inclinado de media disección                 | Pal2    |
|                                                              |                                                      |                             | Cono ligeramente inclinado de alta disección                  | Pal3    |
|                                                              |                                                      |                             | Cono ligeramente inclinado de media disección                 | Pal4    |
|                                                              |                                                      |                             | Cono moderadamente inclinado de alta disección                | Pal5    |
|                                                              |                                                      |                             | Cono moderadamente inclinado de media disección               | Pal6    |
|                                                              |                                                      |                             | Glacis ligeramente inclinado de baja disección                | Pal7    |
|                                                              |                                                      |                             | Terraza media                                                 | Pal12   |
|                                                              | Planicie de depósitos inconsolidados del Pleistoceno | Planicie Coluvial           | Planicie ligeramente inclinada de mal drenaje, manto de arena | Pc1     |
|                                                              |                                                      |                             | Glacis ligeramente inclinado, manto de arena                  | Pc3     |
|                                                              |                                                      |                             | Glacis ligeramente inclinado de media disección               | Pc6     |
|                                                              |                                                      |                             | Glacis moderadamente inclinado de baja disección              | Pc7     |
|                                                              |                                                      | Planicie Coluvial - Aluvial | Cono fuertemente inclinado de alta disección                  | Pca3    |
|                                                              |                                                      |                             | Cono fuertemente inclinado de media disección                 | Pca4    |
|                                                              |                                                      |                             | Cono ligeramente inclinado de alta disección                  | Pca5    |
|                                                              |                                                      |                             | Cono ligeramente inclinado de baja disección                  | Pca6    |
|                                                              |                                                      |                             | Cono ligeramente inclinado de media disección                 | Pca7    |
| Cono moderadamente empinado de alta disección                |                                                      |                             | Pca8                                                          |         |
| Cono moderadamente inclinado de alta disección               |                                                      |                             | Pca10                                                         |         |
| Cono moderadamente inclinado de media disección              |                                                      |                             | Pca12                                                         |         |
| Cono de derrubios moderadamente inclinada de media disección |                                                      |                             | Pca13                                                         |         |
| Relieve plano mixto (agradacional y denudacional)            | Planicie de depósitos inconsolidados del Holoceno    | Planicie Fluvio - Aluvial   | Cauce estacional                                              | Pfa1    |
|                                                              |                                                      |                             | Fondo de valle encañonado                                     | Pfa2    |
|                                                              |                                                      |                             | Fondo de valle en "V"                                         | Pfa3    |

|                                   |                                                      |                                               |                                                                   |       |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------|
|                                   |                                                      |                                               | Terraza baja inundable                                            | Pfa4  |
|                                   |                                                      |                                               | Cauce estacional, manto de arena                                  | Pfa5  |
|                                   |                                                      | Planicie Eólica                               | Planicie ligeramente inclinada de baja disección, dunas           | Pe12  |
|                                   |                                                      |                                               | Planicie ligeramente inclinada, dunas estabilizadas               | Pe14  |
|                                   |                                                      | Planicie Aluvial                              | Planicie ligeramente inclinada, manto de arena                    | Pa2   |
|                                   |                                                      |                                               | Terraza media, manto de arena                                     | Pa4   |
|                                   | Planicie de depósitos inconsolidados del Pleistoceno | Planicie Marino – Coluvial                    | Planicie ondulada ligeramente inclinada, manto de arena           | Pma1  |
|                                   |                                                      | Planicie Coluvial – Aluvial                   | Glacis ligeramente inclinado, manto de arena                      | Pca1  |
|                                   |                                                      |                                               | Cono ligeramente inclinado, manto de arena                        | Pca2  |
|                                   |                                                      |                                               | Glacis poligénico ligeramente inclinada de baja disección         | Pca4  |
|                                   |                                                      |                                               | Glacis poligénico ligeramente inclinada de mal drenaje            | Pca5  |
|                                   |                                                      |                                               | Glacis poligénico moderadamente inclinada de baja disección       | Pca8  |
|                                   |                                                      |                                               | Glacis poligénico ligeramente inclinada, manto de arena           | Pca11 |
| Relieve colinado<br>Cdenudacional | Material Parental Heterogéneo                        | Colina de origen plutónico                    | Colina baja empinada de media disección                           | Cbp1  |
|                                   |                                                      |                                               | Colina baja fuertemente inclinada de baja disección               | Cbp2  |
|                                   |                                                      |                                               | Colina baja ligeramente inclinada de media disección              | Cbp4  |
|                                   |                                                      |                                               | Colina baja moderadamente inclinada de baja disección             | Cbp5  |
|                                   |                                                      | Colina de origen sedimentario                 | Colina baja empinada de media disección                           | Cbs2  |
|                                   |                                                      |                                               | Colina baja fuertemente inclinada de baja disección               | Cbs3  |
|                                   |                                                      |                                               | Colina baja ligeramente inclinada de baja disección               | Cbs4  |
|                                   |                                                      |                                               | Colina baja moderadamente inclinada de baja disección             | Cbs8  |
|                                   |                                                      | Colina de origen volcánico                    | Colina baja ligeramente inclinada de baja disección               | Cbv2  |
|                                   |                                                      |                                               | Colina baja moderadamente inclinada de baja disección             | Cbv4  |
|                                   |                                                      | Colina de depósitos inconsolidados coluviales | Ladera de colina media ligeramente inclinada de baja disección    | Cmc3  |
|                                   |                                                      | Colina de origen plutónico                    | Ladera de colina media empinada de media disección                | Cmp3  |
|                                   |                                                      |                                               | Ladera de colina media ligeramente inclinada de media disección   | Cmp4  |
|                                   |                                                      |                                               | Ladera de colina media moderadamente inclinada de media disección | Cmp5  |
|                                   |                                                      |                                               | Colina media empinada de baja disección                           | Cms1  |

|                                |  |                                               |                                                                  |       |
|--------------------------------|--|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------|
|                                |  | Colina de origen sedimentario                 | Colina media moderadamente empinada de media disección           | Cms4  |
|                                |  |                                               | Colina media moderadamente inclinada de baja disección           | Cms5  |
|                                |  |                                               | Ladera de colina media empinada de media disección               | Cms6  |
|                                |  | Colina de origen volcánico                    | Colina media fuertemente inclinada de baja disección             | Cmv2  |
|                                |  |                                               | Colina media moderadamente empinada de baja disección            | Cmv4  |
|                                |  |                                               | Colina media moderadamente empinada de media disección           | Cmv5  |
|                                |  |                                               | Ladera de colina media empinada de media disección               | Cmv6  |
|                                |  | Colina de depósitos inconsolidados coluviales | Ladera de colina alta ligeramente inclinada de media disección   | Cac5  |
|                                |  | Colina de origen plutónico                    | Colina alta empinada de media disección                          | Cap1  |
|                                |  |                                               | Colina alta moderadamente empinada de media disección            | Cap2  |
|                                |  |                                               | Ladera de colina alta empinada de media disección                | Cap3  |
|                                |  |                                               | Ladera de colina alta fuertemente inclinada de media disección   | Cap4  |
|                                |  |                                               | Ladera de colina alta moderadamente inclinada de media disección | Cap5  |
|                                |  |                                               | Ladera de colina alta muy empinada de media disección            | Cap6  |
|                                |  | Colina de origen sedimentario                 | Colina alta empinada de media disección                          | Cas2  |
|                                |  |                                               | Colina alta moderadamente empinada de media disección            | Cas4  |
|                                |  |                                               | Ladera de colina alta empinada de media disección                | Cas7  |
|                                |  |                                               | Ladera de colina alta moderadamente inclinada de media disección | Cas11 |
|                                |  |                                               | Ladera de colina alta muy empinada de media disección            | Cas12 |
|                                |  | Colina de origen volcánico                    | Cima de colina alta                                              | Cav1  |
|                                |  |                                               | Colina alta empinada de media disección                          | Cav4  |
|                                |  |                                               | Ladera de colina alta empinada de media disección                | Cav6  |
|                                |  |                                               | Ladera de colina alta moderadamente inclinada de media disección | Cav7  |
|                                |  |                                               | Ladera de colina alta muy empinada de media disección            | Cav9  |
| Relieve montañoso denudacional |  | Vertiente montañosa de origen plutónico       | Ladera de montaña fuertemente inclinada de baja disección        | M1p2  |
|                                |  |                                               | Ladera de montaña moderadamente inclinada de baja disección      | M1p4  |

|  |  |                                                 |                                                                        |      |
|--|--|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------|
|  |  | Vertiente montañosa de origen sedimentario      | Ladera de montaña empinada de baja disección                           | M1s1 |
|  |  |                                                 | Ladera de montaña fuertemente inclinada de baja disección              | M1s3 |
|  |  |                                                 | Ladera de montaña moderadamente inclinada de baja disección            | M1s5 |
|  |  | Vertiente montañosa de origen volcánico         | Ladera de montaña empinada de baja disección                           | M1v1 |
|  |  |                                                 | Ladera de montaña extremadamente empinada de baja disección            | M1v2 |
|  |  |                                                 | Ladera de montaña fuertemente inclinada de baja disección              | M1v3 |
|  |  |                                                 | Ladera de montaña ligeramente inclinada de baja disección              | M1v4 |
|  |  |                                                 | Ladera de montaña moderadamente inclinada de baja disección            | M1v6 |
|  |  | Vertiente montañosa de depósitos inconsolidados | Ladera de montaña fuertemente inclinada de media disección             | M2c2 |
|  |  |                                                 | Ladera de montaña moderadamente inclinada de media disección           | M2c5 |
|  |  | Vertiente montañosa de origen plutónico         | Ladera de montaña empinada de media disección                          | M2p1 |
|  |  |                                                 | Ladera de montaña extremadamente empinada de media disección           | M2p4 |
|  |  |                                                 | Ladera de montaña fuertemente inclinada de media disección             | M2p5 |
|  |  |                                                 | Ladera de montaña ligeramente inclinada de media disección             | M2p6 |
|  |  |                                                 | Ladera de montaña moderadamente empinada de media disección            | M2p7 |
|  |  |                                                 | Ladera de montaña moderadamente inclinada de media disección           | M2p8 |
|  |  |                                                 | Ladera de montaña muy empinada de media disección                      | M2p9 |
|  |  | Vertiente montañosa de origen sedimentario      | Ladera de montaña empinada de media disección                          | M2s1 |
|  |  |                                                 | Ladera de montaña escarpada extremadamente empinada de media disección | M2s2 |
|  |  |                                                 | Ladera de montaña extremadamente empinada de media disección           | M2s4 |
|  |  |                                                 | Ladera de montaña fuertemente inclinada de media disección             | M2s5 |
|  |  |                                                 | Ladera de montaña ligeramente inclinada de media disección             | M2s6 |

|  |  |                                            |                                                                        |      |
|--|--|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------|
|  |  |                                            | Ladera de montaña moderadamente empinada de media disección            | M2s7 |
|  |  |                                            | Ladera de montaña moderadamente inclinada de media disección           | M2s8 |
|  |  |                                            | Ladera de montaña muy empinada de media disección                      | M2s9 |
|  |  | Vertiente montañosa de origen volcánico    | Ladera de montaña empinada de media disección                          | Mv1  |
|  |  |                                            | Ladera de montaña escarpada extremadamente empinada de media disección | Mv2  |
|  |  |                                            | Ladera de montaña escarpada muy empinada de media disección            | Mv3  |
|  |  |                                            | Ladera de montaña extremadamente empinada de media disección           | Mv4  |
|  |  |                                            | Ladera de montaña fuertemente inclinada de media disección             | Mv5  |
|  |  |                                            | Ladera de montaña ligeramente inclinada de media disección             | Mv6  |
|  |  |                                            | Ladera de montaña moderadamente empinada de media disección            | Mv7  |
|  |  |                                            | Ladera de montaña moderadamente inclinada de media disección           | Mv8  |
|  |  |                                            | Ladera de montaña muy empinada de media disección                      | Mv9  |
|  |  | Vertiente montañosa de origen plutónico    | Cima de montaña allanada                                               | M3p1 |
|  |  |                                            | Ladera de montaña moderadamente empinada de alta disección             | M3p4 |
|  |  | Vertiente montañosa de origen sedimentario | Cima de montaña allanada                                               | M3s1 |
|  |  |                                            | Cima de montaña escarpada                                              | M3s3 |
|  |  |                                            | Ladera de montaña empinada de alta disección                           | M3s5 |
|  |  |                                            | Ladera de montaña moderadamente empinada de alta disección             | M3s7 |
|  |  |                                            | Ladera de montaña muy empinada de alta disección                       | M3s8 |
|  |  | Vertiente montañosa de origen volcánico    | Cima de montaña allanada                                               | M3v1 |
|  |  |                                            | Cima de montaña escarpada                                              | M3v3 |
|  |  |                                            | Ladera de montaña empinada de alta disección                           | M3v4 |

|                 |  |                                     |                                                             |      |
|-----------------|--|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------|
|                 |  |                                     | Ladera de montaña extremadamente empinada de alta disección | M3v5 |
|                 |  |                                     | Ladera de montaña moderadamente empinada de alta disección  | M3v6 |
|                 |  |                                     | Ladera de montaña muy empinada de alta disección            | M3v8 |
| Elementos Fijos |  | Casco Urbano                        |                                                             | Ef1  |
|                 |  | Cuerpos de agua de origen antrópico |                                                             | Ef3  |
|                 |  | Dique                               |                                                             | Ef4  |
|                 |  | Río                                 |                                                             | Ef5  |

Fuente: Gobierno Regional de Lambayeque, 2012

### **3.1.2.3. Climatología y meteorología**

#### **Temperatura:**

La temperatura en el área de estudio es variable. Según los datos recopilados del Senamhi de la estación meteorológica Lambayeque el promedio anual es de 21°C, mientras que en la estación Tinajones, de 23°C. Las temperaturas mínimas se inician en los meses de febrero y marzo, presentando un promedio anual de 17,9°C en Lambayeque y 18,3°C en Tinajones. En tanto los promedios máximos anuales alcanzan 25,8°C en Lambayeque y 29,9°C en Tinajones, estación que tiene un promedio máximo mensual en el mes de marzo con 3,6°C. (Ingemmet, 2006)

#### **Precipitación pluvial:**

Según el Estudio geoambiental de la cuenca Chancay-Lambayeque, elaborado por el Ingemmet (2006), el periodo lluvioso se presenta en los meses de diciembre a abril. De mayo a setiembre las precipitaciones son nulas y de octubre a diciembre son esporádicas.

En la estación Reque se encuentran alrededor de los 30 mm, pero esta se ve notablemente alterada cuando se presentan escenarios del fenómeno del Niño. Una muestra de ello son los valores registrados en los fenómenos del Niño de 1998 y el 2017, donde se obtuvo precipitaciones que alcanzaron los 232,8 mm y 128 mm anual en esa estación, respectivamente.

Por lo tanto, se puede observar que se presenta precipitaciones durante 7 meses del año, generalmente entre los meses de octubre a abril, ocurriendo las precipitaciones más intensas en los meses de febrero y marzo.

Para el presente estudio, la precipitación es un factor desencadenante para la generación de inundaciones, por lo que se ha recopilado información pluviométrica de ocho estaciones administradas por el Senamhi, que se encuentran ubicadas dentro y próximas al área de estudio. La serie de tiempo considerada para la caracterización de la precipitación de la presente investigación fue de entre 23 y 28 años por estación. El detalle de las estaciones meteorológicas se presenta en la Tabla 7.

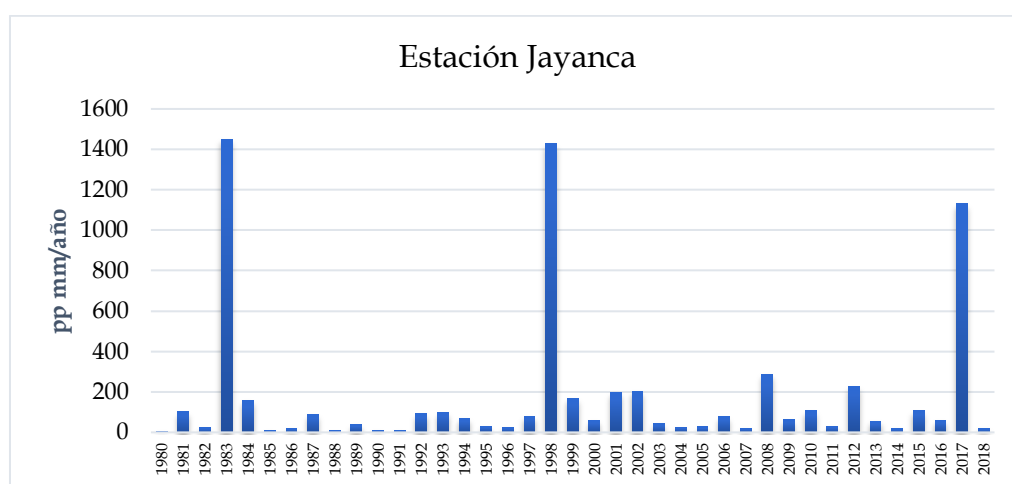
**Tabla 7:** Estaciones meteorológicas consideradas en el área de estudio

| Estación meteorológica | Ubicación en coordenadas UTM WGS84 17S |           | Tiempo considerado | Administración |
|------------------------|----------------------------------------|-----------|--------------------|----------------|
|                        | Este (m)                               | Norte (m) |                    |                |
| Jayanca                | 636 127                                | 9 300 251 | 1980 - 2018        | Senamhi        |
| Lambayeque             | 620 252                                | 9 255 589 | 1980 - 2018        |                |
| Oyotún                 | 685 234                                | 9 240 773 | 1996 - 2018        |                |
| Reque                  | 628 719                                | 9 238 866 | 1980 - 2018        |                |
| Santa Cruz             | 726 509                                | 9 266 384 | 1980 - 2018        |                |
| Sipán                  | 654 542                                | 9 247 969 | 1998 - 2018        |                |
| Tinajones              | 673 803                                | 9 264 056 | 1995 - 2018        |                |

Fuente: Elaboración propia

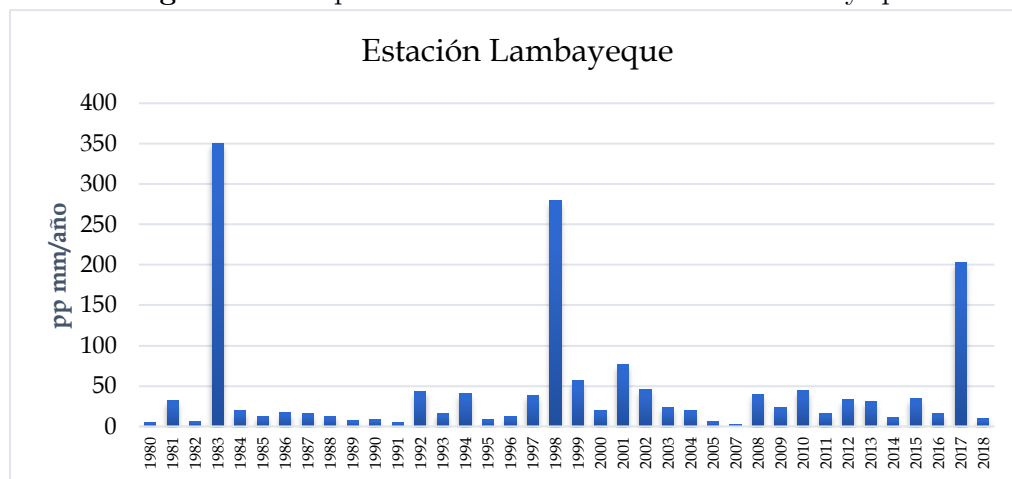
En los gráficos, se presentan los valores totales anuales de precipitación que se tiene en cada una de las estaciones meteorológicas consideradas

**Figura 8:** Precipitación media anual – Estación Jayanca



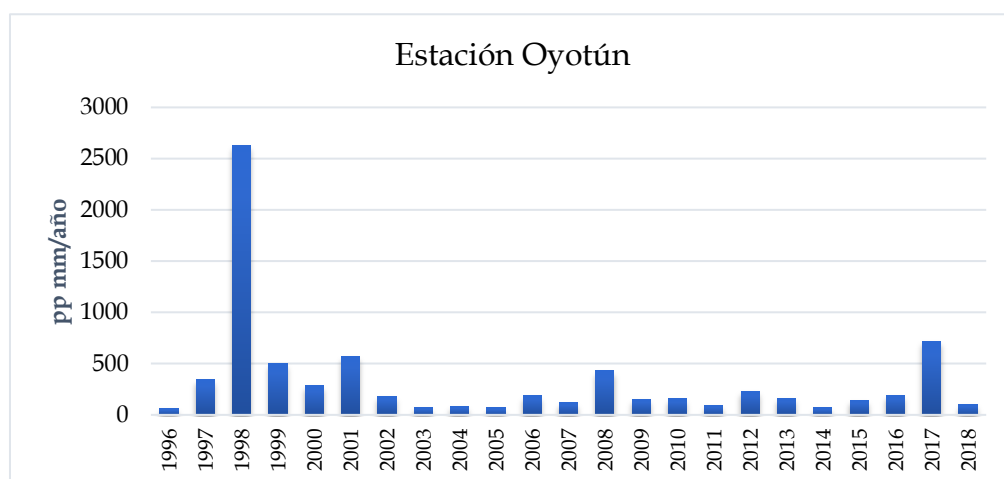
Fuente: Elaboración propia con base en información proporcionada por Senamhi

**Figura 9:** Precipitación media anual – Estación Lambayeque



Fuente: Elaboración propia con base en información proporcionada por Senamhi

**Figura 10:** Precipitación media anual – Estación Oyotún



Fuente: Elaboración propia con base en información proporcionada por Senamhi

**Figura 11:** Precipitación media anual – Estación Reque



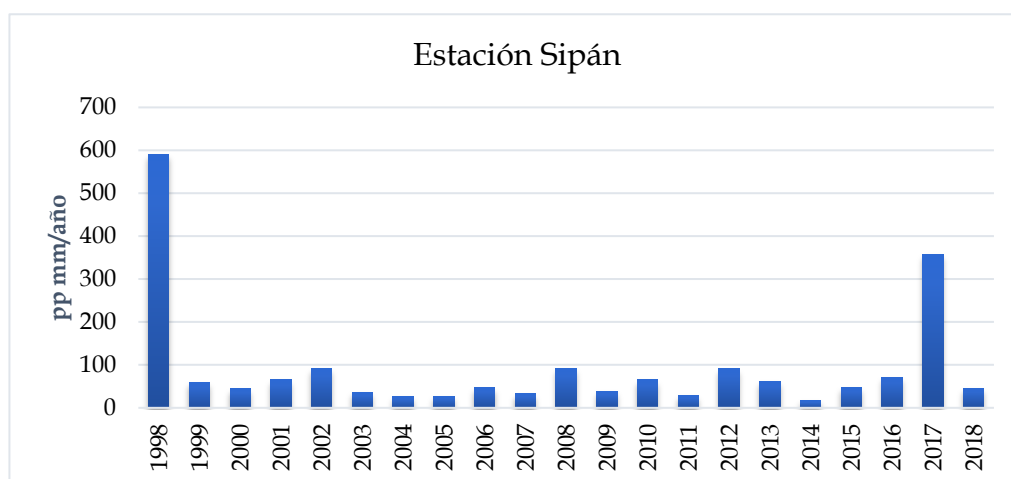
Fuente: Elaboración propia con base en información proporcionada por Senamhi

**Figura 12:** Precipitación media anual – Estación Santa Cruz



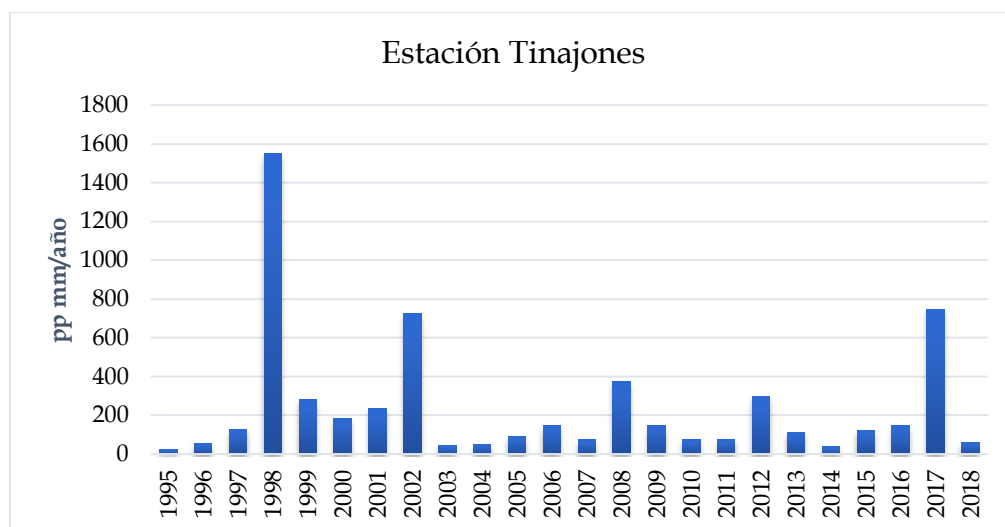
Fuente: Elaboración propia con base en información proporcionada por Senamhi

**Figura 13:** Precipitación media anual – Estación Sipán



Fuente: Elaboración propia con base en información proporcionada por Senamhi

**Figura 14:** Precipitación media anual – Estación Tinajones



Fuente: Elaboración propia con base en información proporcionada por Senamhi

### Humedad Relativa:

Según la información registrada en la estación Lambayeque, registra valores altos con un promedio anual de 82%, con valores mínimos promedio de 61% y máximos de 85%.

### Evaporación:

Los valores de evaporación alcanzan un promedio de 6,7 mm/día. Sin embargo, el promedio en la zona de riego es de 4mm/día, en tanto que las partes altas del valle, la evaporación promedio varía de 2 a 4 mm/día. (ANA, 2018).

#### **3.1.2.4. Geología**

En la cuenca baja del río Chancay-Lambayeque se encuentran formaciones de origen y antigüedad diversos, siendo las más antiguas las Mesozoicas del Jurásico Medio, y los más recientes las del Cuaternario en el Cenozoico. A continuación, se muestra un cuadro resumen de las unidades litoestratigráficas presentes en la zona de estudio de acuerdo a lo establecido por el Estudio Geológico del Departamento de Lambayeque (Gobierno Regional de Lambayeque, 2013), seguido por su respectiva descripción:

**Tabla 8:** Columna estratigráfica del área de estudio

| Sistema     | Serie       | Unidad estratigráfica      | Símbolo | Rocas ígneas | Símbolo | Descripción                                                                                                                                                                                                                       | ÁREA (ha) | PORCENTAJE (%) |
|-------------|-------------|----------------------------|---------|--------------|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|----------------|
| CUATERNARIO | RECIENTE    | Depósito Fluvial Reciente  | Qr-fl   | -            |         | Constituidos por sedimentos, bloques, cantos, grava, gravilla, arena y matriz arena limosa                                                                                                                                        | 5899,08   | 4,94           |
|             |             | Depósito Eólico Reciente   | Qr-e    |              |         | Depósitos de sedimentos eólicos, arena fina de cuarzo y en menor proporción minerales ferromagnesianos y fragmentos de roca.                                                                                                      | 392,22    | 0,33           |
|             |             | Depósito Marino Reciente   | Qr-m    |              |         | Constituida por gravas y gravillas sueltas y en algunos sectores por acumulaciones de arenas intercaladas con gravas redondeadas, contiene evaporitas.                                                                            | 25,57     | 0,02           |
|             | HOLOCENO    | Depósito Fluvial - Aluvial | Qh-fal  | -            |         | Constituidos por bloques de roca, cantos rodados, gravas subredondeadas, con relleno arenoso, inconsolidados.                                                                                                                     | 3145,28   | 2,63           |
|             |             | Depósito Aluvial           | Qh-al   |              |         | Consiste en depósitos de sedimentos compuestos por cantos rodados, grava, gravilla, arena y matriz arenolimosas. Consiste en depósitos de sedimentos compuestos por cantos rodados, grava, gravilla, arena y matriz arenolimosas. | 37 951,34 | 31,78          |
|             | PLEISTOCENO | Depósito Coluvial          | Qp-co   | -            |         | Compuesto por grandes bloques, gravas y arenas, con muy poca matriz de material fino, forma de los gránulos angular.                                                                                                              | 1797,71   | 1,51           |
|             |             | Depósito Aluvial Antiguo   | Qp-al   |              |         | Sedimentos de cantos, grava y arena en una matriz arcilla limosa, forma de los gránulos sub anguloso.                                                                                                                             | 15 297,48 | 12,81          |
|             |             | Tablazo Talara             | Qp-tt   |              |         | Sedimentos acumulados en un ambiente marino de plataforma continental, depósito de conglomerados, arenisca arcósica, matriz bioclástica.                                                                                          | 242,98    | 0,20           |

|           |                     |                                             |         |                       |        |                                                                                                                                                                                                 |           |       |
|-----------|---------------------|---------------------------------------------|---------|-----------------------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------|
| NEOGENO   | PLIOCENO<br>MIOCENO | Volcánico<br>Huambos                        | Ts-vh   | Andesita              | T-an   | Depósitos de rocas volcánicas, está compuesto por tobas y brechas de composición ácida.                                                                                                         | 3895,11   | 3,26  |
| PALEOGENO | PALEOCENO           | Volcánico<br>Llama                          | Pp-vll  | Pórfido<br>Cuarcífero | P-pc   | Compuesto por andesitas, dacitas y riolacita, tobas piroclásticas que afloran irregularmente.                                                                                                   | 8036,97   | 6,73  |
| CRETÁCEO  | MEDIO               | Grupo<br>Pulluican y<br>Quilquiñán          | Km-pq   | Monzonita             | Kti-mz | Consiste en calizas areniscosas de matices gris claros generalmente bien estratificadas                                                                                                         | 784,31    | 0,66  |
|           |                     |                                             |         | Diorita               | Kti-di |                                                                                                                                                                                                 |           |       |
|           |                     |                                             |         | Adamelita             | Kti-ad |                                                                                                                                                                                                 |           |       |
|           | INFERIOR            | Formaciones<br>Inca, Chúlec y<br>Pariatambo | Km-ichp | Tonalita              | Kti-to | Formación Inca consiste en areniscas y lutitas; la formación Chúlec en lutitas y calizas y la formación Pariatambo en calizas, lutitas y tobas.                                                 | 5957,96   | 4,99  |
|           |                     | Grupo<br>Goyllarisquizga                    | Ki-g    | -                     |        | Secuencia de cuarcitas blanquecinas y marrones de grano medio a grueso de ambiente eólico y fluvial, niveles de conglomerados, intercaladas con horizontes de lutita gris, marrón y rosado.     | 4081,16   | 3,42  |
| JURÁSICO  | SUPERIOR            | Formación<br>Tinajones                      | Jki-t   |                       |        | Constituidas por lutitas, niveles de areniscas cuarzosas, conglomerados cuarcíticos, tobas, brechas, flujos piroclásticos asociado a grauvacas y microconglomerados, secuencias estratificadas. | 4389,46   | 3,68  |
|           |                     | Volcánico<br>Oyotún                         | J-vo    |                       |        | Lavas de andesitas y dacitas con estratos medianos a gruesos de piroclásticos con intercalaciones sedimentarias de tobas, grauvacas y areniscas.                                                | 20 400,82 | 17,08 |
|           | MEDIO               |                                             |         |                       |        |                                                                                                                                                                                                 |           |       |

|                 |          |                       |      |      |                                                                                                                                                                   |         |      |
|-----------------|----------|-----------------------|------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|------|
| TRIÁSICO        | SUPERIOR | Formación<br>La Leche | Tr-1 |      | Secuencia de areniscas de grano fino, calizas<br>negras bituminosas, silicificadas con fósiles,<br>intercaladas con lutitas, conglomerados y tobas<br>volcánicas. | 1964,83 | 1,65 |
| Elementos fijos |          | Área urbana           |      | Aurb | Elementos fijos                                                                                                                                                   | 5173,47 | 4,33 |
|                 |          | Dique                 |      | Diq  |                                                                                                                                                                   |         |      |
|                 |          | Reservorio            |      | Resv |                                                                                                                                                                   |         |      |
|                 |          | Ríos                  |      | Ríos |                                                                                                                                                                   |         |      |

Fuente: Gobierno Regional de Lambayeque, 2013.

- **Depósito Fluvial Reciente (Qr-fl)**

Esta unidad se encuentra ubicada en los lechos de río Chancay-Lambayeque. Está compuesta por grava, gravilla, matriz areno limosa y bloques de roca.

- **Depósito Eólico Reciente (Qr-e)**

Esta unidad está constituida principalmente por arenas finas (ferromagnesianas, cuarzo y fragmentos de roca), las cuales son transportadas por vientos litorales de sur a norte a una velocidad media y alta. Posteriormente, se depositan en la planicie costera por gravedad, y llegan hasta las estribaciones de la cordillera costera formando dunas, colinas de arena y mantos de arena.

- **Depósito Marino Reciente (Qr-m)**

Se componen por arena, grava, gravilla, en una matriz arcillosa con alto contenidos de evaporitas. Estos sedimentos se acumulan en las zonas ribereñas o playas de mar desde inicios del Holoceno a la actualidad.

- **Depósito Fluvio-Aluvial (Qh-fal)**

Estos depósitos se ubican en los valles de dirección este-oeste y en temporada alta, ciertas zonas llegan a ser irrigadas por los cursos actuales de los ríos. Se compone por arena, grava, gravilla y cantos rodados, sin embargo, no poseen matriz fina.

- **Depósito Aluvial (Qh-al)**

Se encuentran ubicados en los afluentes del río Chancay-Lambayeque y se manifiestan principalmente en etapas de intenso cambio climatológico y periodos de elevado traslado de sólidos. Están compuestos por sedimentos de granulometría gruesa: grava, gravilla, cantos rodados, arena con matriz areno arcillosa limosa.

- **Depósito Coluvial (Qh-co)**

Este depósito de origen denudacional se ubica usualmente a pie de montañas rocosas de composición litológica diversa. Se componen

por sedimentos de bloques, arena y grava con una limitada parte fina de limo y arcilla. Los gránulos poseen una forma angular a subangular.

- **Depósito Aluvial Antiguo (Qp-al)**

Esta secuencia de sedimentos de origen aluvial marino, fluvial y denudacional se acumularon en una zona continental en el periodo Pleistoceno. La litología está determinada por gravas y arenas en matriz arcillo limosa. Los gránulos poseen una forma subangulosa.

- **Tablazo Talara (Qp-tt)**

Se compone por conglomerados y areniscas arcósicas poco consolidados en una matriz bioclástica. Se acumularon en una plataforma continental durante el Pleistoceno, este emergió debido al proceso tectónico andino y se constituyeron planicies de gran extensión y algunos de ellos fueron erosionados. Se identificaron dos subunidades en relación a su ubicación a la fuente proveedora de detritos: depósito marino aluvial y depósito marino coluvial.

- **Volcánico Huambos (Np-vh)**

Esta unidad está constituida por tobas y brechas de composición ácida. Afloran en ambos lados de la divisoria continental y forman llanuras limitadas por farallones y escarpas. Es importante precisar que una red hidrográfica dendrítica se ha desarrollado sobre esta formación.

- **Volcánico Llama (Pp-vll)**

Se compone por tobas de lava, tobas volcánicas y tobas brechosas, las cuales poseen tonos morados y grises y debajo de estas rocas efusivas se localiza la secuencia volcánica estratificada que está constituida por andesitas en mayor proporción que las riodacitas y dacitas. Los horizontes donde se encuentran presentes las rocas son: cantos rodados, conglomerados tobáceos y areniscas tobáceas.

- **Grupo Pulluicana y Quillquiñan (Km-pq)**

Ambas unidades se componen por calizas areniscosas de matices gris claros. Estas se detallan a continuación:

Grupo Pulluicana: Se compone por calizas arcillosas grisáceas, las cuales al intemperizarse se tornan de color marrón claro o crema, asimismo, se presentan intercaladas las lutitas grisáceas o verdosas y margas marrones, y en menor proporción areniscas y limolitas.

Grupo Quillquiñan: Se componen por capas delgadas de margas azuladas, las cuales al intemperizarse se tornan de color marrón rojizo o marrón oscuro, y lutitas friables gris oscuras, asimismo, se presentan intercaladas las ferruginosas con abundantes moldes de bivalvos y margas porosas en capas delgadas. Así también, se encuentran en poca proporción margas y lutitas.

- **Formaciones Inca, Chúlec y Pariatambo (Km-ich)**

Formación Inca: Esta unidad está constituida por rocas sedimentarias originadas durante la transgresión marina inicial del Albiano. Se compone por caliza maciza arenosa, areniscas, lutitas ferruginosas y calcáreas ubicadas intercaladamente.

Formación Chúlec: Esta unidad está constituida por rocas sedimentarias estratificadas originadas durante la segunda transgresión marina del Albiano Medio. Se compone por marga amarillenta, lutita gris y caliza marrón crema, las cuales están distribuidas en capas delgadas.

Formación Pariatambo: Se compone por calizas bituminosas de color negro y de grano fino, asimismo, se intercalan lutitas en capas delgadas, las cuales contienen fósiles. Es importante indicar que la estratificación es uniforme de tipo laja.

- **Grupo Goyllarisquizga (Ki-g)**

Esta unidad se ubica en ambientes principalmente continentales, fluviales y eólicos. En la secuencia inferior, se encuentra rocas sedimentarias de grandes laminaciones oblicuas de ambiente eólico. Por otro lado, en la secuencia superior, se visualizan cuarcitas de

grano grueso de origen fluvial, las cuales poseen coloración rojiza y muestran evidencias del proceso de oxidación. Asimismo, en la base de los estratos, hay presencia de clastos redondeados.

- **Formación Tinajones (Jki-t)**

Se compone por lutitas de tamaños variables, areniscas cuarzosas distribuidas en niveles, brechas andesíticas, tufos y flujos piroclásticos asociados a microconglomerados y grauvacas. Se encuentran estratificadas en capas delgadas a medianas.

- **Volcánico Oyotún (J-vo)**

Esta unidad se ubica principalmente en los distritos de Chongoyape y Pucalá. Se compone por lavas andesíticas y dacíticas con niveles piroclásticos y el espesor de sus estratos son de medianos a gruesos. Asimismo, se intercalan rocas sedimentarias, tales como, grauvacas, tobas y areniscas feldespáticas.

- **Formación La Leche (Tr-l)**

En la secuencia inferior, se encuentran areniscas de grano fino. Progresivamente, se forman calizas negras bituminosas parcialmente silificadas y Chert asociadas a una fase nodulosa, con niveles delgados de toba. Por otro lado, en la secuencia superior, predominan las calizas negras bituminosas con olor fétido e intercalan con lutitas delgadas de color negro.

- **Rocas Intrusivas**

Este tipo de rocas corresponden al complejo intrusivo del Batolito de la Costa. Se han podido identificar rocas ígneas del Cretácico, entre ellas, diorita, tonalita, monzonita, ademalita, granodiorita y rocas intrusivas de color negro por la presencia de ferromagnesianos, entre las que se destaca el gabro.

- **Rocas Extrusivas**

Las rocas volcánicas dacitas del Paleoceno presentan óxido de sodio, potasio, cuarzo y óxido de calcio. Asimismo, se encontraron rocas volcánicas del Plioceno que posee pórfidos cuarcíferos con

abundante cuarzo de color blanco brillante en forma de fenocristales. La roca volcánica dacita posee cuarzo, óxido de calcio, potasio y óxido de sodio.

#### **3.1.2.5. Suelos**

Según el Estudio de Suelos con fines de Zonificación Ecológica Económica (Gobierno Regional de Lambayeque, 2012b), se han identificado 28 suelos en la zona de estudio y pertenecen a dos órdenes de suelos de la Soil Taxonomy: Aridisoles y Entisoles, los cuales serán descritos en la Tabla 9.

.

**Tabla 9:** Clasificación taxonómica de los suelos del área de estudio:

| Soil Taxonomy (2010) |           |                |                      |                |         | FAO (2006) | Área (ha) | Porcentaje (%) |
|----------------------|-----------|----------------|----------------------|----------------|---------|------------|-----------|----------------|
| Orden                | Suborden  | Grandes Grupos | Subgrupos            | Serie          | Símbolo |            |           |                |
| Aridisols            | Gypsisds  | Calcigypsisds  | Typic Calcigypsisds  | Cienego        | Ci      | Gypsisoles | 1598.83   | 1.20           |
|                      | Calcids   | Haplocalcids   | Duric Haplocalcids   | Chilcal Alto   | Ccl     | Yermosoles | 9252.52   | 6.92           |
|                      | Calcids   | Haplocalcids   | Sodic Haplocalcids   | Popan Bajo     | Pb      | Solonetz   | 3673.28   | 2.75           |
|                      |           |                | Typic Haplocalcids   | Receptor       | Re      | Yermosoles | 9252.52   | 6.92           |
|                      |           |                |                      | Tabernas       | Ts      |            |           |                |
|                      | Cambids   | Haplocambids   | Lithic Haplocambids  | La Mariposa    | Lm      | Cambisoles | 19455.82  | 14.55          |
|                      |           |                |                      | Las Canteras   | Lca     |            |           |                |
|                      |           |                |                      | Pampa Tablazos | Pt      |            |           |                |
|                      |           |                |                      | Juana Ríos     | Jr      |            |           |                |
|                      |           |                |                      | Los Aguilares  | La      |            |           |                |
|                      |           |                |                      | Piedra Parada  | Pp      |            |           |                |
|                      |           |                | Typic Haplocambids   | Collique Alto  | Col     |            |           |                |
|                      |           |                |                      | Taymi          | Ty      |            |           |                |
|                      |           |                |                      | Camiche Bajo   | Cb      |            |           |                |
|                      |           |                |                      | Villa Saul     | Vs      |            |           |                |
|                      | Gypsisds  | Haplogypsisds  | Typic Haplogypsisds  | Morropillo     | Mr      | Gypsisoles | 1598.83   | 1.20           |
| Entisols             | Orthents  | Torriorthents  | Aquic Torriorthents  | La Victoria    | Lvi     | Regosoles  | 23185.21  | 17.33          |
|                      |           |                | Typic Torriorthents  | Matallana      | Mt      |            |           |                |
|                      |           |                |                      | San Nicolas    | Sn      |            |           |                |
|                      |           |                |                      | Mojonazgo      | Mj      |            |           |                |
|                      |           |                |                      | La Calerita    | Lt      |            |           |                |
|                      |           |                |                      | Los Cocos      | Lco     |            |           |                |
|                      |           |                |                      | El Palmo       | Ep      |            |           |                |
|                      |           |                |                      | La Puntilla    | Ln      |            |           |                |
|                      |           | Ustorthents    | Typic Ustorthents    | Jacobita       | Jb      |            |           |                |
|                      | Psamments | Torripasammets | Typic Torripasammets | Rafan          | Rf      | Arenosoles | 338.95    | 0.25           |
|                      |           |                |                      | Santo Tomas    | St      |            |           |                |
|                      | Fluvents  | Torrifluvents  | Typic Torrifluvents  | Custodio       | Ct      | Fluvisoles | 417.31    | 0.31           |

| Unidades No Edáficas (Áreas Misceláneas) |                      |     |  |          |       |
|------------------------------------------|----------------------|-----|--|----------|-------|
|                                          | Misceláneo Antrópico | Mst |  | 2952.92  | 2.21  |
|                                          | Misceláneo Cauce     | Msc |  | 7540.11  | 5.64  |
|                                          | Misceláneo Litoral   | Msl |  | 25.57    | 0.02  |
|                                          | Misceláneo Roca      | Msr |  | 65311.83 | 48.83 |

Fuente: Elaboración propia.

- **Consociación Villa Saul (Vs)**

Este tipo de consociación está compuesto por material de origen fluvial (cantos rodados, gravas, clastos) y material inconsolidado. Este tipo de composición hace que tengan un drenaje entre algo excesivo a excesivo, lo que repercute en una baja fertilidad.

Por la ubicación donde se presenta esta unidad, es muy propensa a fuertes avenidas, y por consiguiente, a inundaciones principalmente ocasionadas por el fenómeno del Niño.

- **Consociación Jacobita (Jb)**

La consociación Jacobita se caracteriza por estar compuesta por sedimentos de tipo grava y cantos rodados, al ser de origen aluvial. Presenta altos niveles de salinidad al ser afectado por sales y sodio; asimismo tiene una fertilidad media con presencia de drenaje de tipo bueno a moderado.

En este tipo de consociación se pueden encontrar cultivos de caña de azúcar, cultivos permanentes.

- **Consociación Rafan (Rf)**

Este tipo de consociación de suelos es de textura arcillosa – limosa de color beige, esto a causa de tener orígenes marinos. Es caracterizado como un suelo de tipo normal, con altos niveles de drenaje que traen como consecuencia una baja fertilidad. No presenta vegetación y representa la gran parte de áreas eriazas del área de estudio.

- **Consociación Santo Tomas (St)**

Consociación de origen eólico que provoca la presencia sedimentos del mismo tipo con alta cantidad de cuarzo, sílice seguidos de menores porciones de calcio, magnesio y sodio. A partir de su composición es un suelo de baja fertilidad con drenaje en niveles excesivos.

- **Consociación El Palmo (Ep)**

Presenta una composición sedimentaria de gravilla y grava. Tiene un origen coluvio-aluvial. Tiene a ser de normal hasta profundo en cierta medida; en tanto que el relieve presentado es plano y de alta pedregosidad

que hace que sea imposible las actividades agrícolas, sin embargo, se realiza el pastoreo y la actividad forestal. Presenta vegetación característica del bosque seco.

- **Consociación La Calerita (Lt)**

Este tipo de consociación es de origen aluvial, compuesto por cantos rodados, grava, gravilla. Es un suelo de característica salina, sódica, profunda, con presencia de sales y sodio (tiende a ser fuertemente afectados). No tiene niveles altos de fertilidad, además de presentar drenaje moderado a algo excesivo. Superficialmente es plano ligeramente pedregoso pero que no imposibilita la actividad agrícola con vegetación rastrera por encontrarse en descanso, pero en época de siembra predomina la caña de azúcar.

- **Consociación La Puntilla (Ln)**

De origen coluvial, posee sedimentos de grava y cantos rodados, angulosos y semiangulosos; donde también se presenta arena y limo. Es un suelo con bajos niveles de fertilidad y drenaje que va desde excesivo a bueno, superficialmente plano, y presenta cultivos de maíz.

- **Consociación Los Cocos (Lco)**

Es un suelo de origen aluvial, conformado por depósitos de sedimentos compuesto por cantos rodados, grava, gravilla, arena y matriz arenolimosas. Es un suelo de tipo normal, de alta profundidad, con bajos niveles de fertilidad, con drenaje moderado, microrrelieve accidentado y presencia cultivos de caña azúcar.

- **Consociación Matallana (Mt)**

Este tipo de consociación está establecido sobre depósitos con origen aluvial, con presencia de sedimentos como grava, gravilla, cantos rodados, arena y matriz areno limosas. Es un suelo de tipo moderadamente profundo con una baja fertilidad, con drenaje en el rango de algo excesivo a imperfecto. La cobertura vegetal comprende principalmente cultivos de cebolla.

- **Consociación Mojonazgo (Mj)**

La consociación Mojonazgo, de origen aluvial, está compuesto por grava, gravilla, cantos rodados, arena y arenolimosas. Es un suelo moderadamente profundo, de fertilidad baja, con un microrrelieve plano y de un drenaje bueno. Presenta cobertura de pastos.

- **Consociación San Nicolas (Sn)**

Este tipo de consociación es de origen coluvio aluvial, que presenta como sedimentos a la grava, gravilla, cantos rodados y fragmentos de roca angulosos y semiangulosos. Este suelo es salino, profundo y ligeramente afectado por sales y sodio; presenta un bajo índice de fertilidad, y también un drenaje excesivo, con microrrelieve plano y presencia de arbustos.

- **Consociación Custodio (Ct)**

La consociación Custodio, de origen coluvio-aluvial, presenta sedimentos de grava angulosa y semiangulosas; arena y matriz arcilla. El suelo es moderadamente profundo, tiene un bajo índice de fertilidad con presencia de excesivo drenaje, presenta un microrrelieve accidentado, es ligeramente pedregoso, pero no interfiere con la actividad agrícola, y se presencia cultivos de ají.

- **Consociación Morropillo (Mr)**

La consociación Morropillo se ha desarrollado sobre materiales inconsolidados de origen eólico con presencia de sílice-cuarzo; seguido de metales como fierro, sodio, magnesio y calcio. Es un suelo normal, moderadamente profundo, con potencial de salinidad, que tiene tendencia a ser afectado por sales y sodio, de baja fertilidad, con un drenaje bueno a imperfecto, con poca o nula presencia de vegetación, identificándose vegetaciones xerófitas. Esta zona presenta cobertura arenosa y dunas, así como zonas de salares.

- **Consociación Camiche Bajo (Cb)**

Esta consociación está desarrollada sobre depósitos aluviales conformados por cantos rodados y grava. Es un suelo normal, profundo, de bajo índice de fertilidad con un drenaje de rango bueno a algo excesivo y microrrelieve plano, es un poco pedregoso pero no interfiere con

actividades agrícolas, con cobertura vegetal (predomina el bijuco). Es característico que en este tipo de suelo se cultive la caña de azúcar y el arroz.

- **Consociación Collique Alto (Col)**

Este tipo de consociación está formado de depósitos inconsolidados de tipo coluvio-aluvial, con presencia de gravillas. Es un suelo profundo de tipo normal, de bajo índice de fertilidad, con drenaje excesivo, con microrelieve plano, con cobertura vegetal característica del bosque seco ralo (zapote).

- **Consociación Taymi (Ty)**

La consociación Taymi tiene orígenes coluvio-aluvial, está compuesto por sedimentos grava, cantos rodados, rocas angulosas y semiangulosas; arena y matriz arcilla limosa. Este suelo es muy profundo, con bajo índice de fertilidad, con drenaje desde algo excesivo a bueno, es pedregoso y plano suficiente para interferir con cultivos transitorios, pero no los permanentes. Presenta vegetación arbustiva (predomina el zapote).

- **Consociación Receptor (Re)**

La consociación Receptor, de origen aluvial de sedimentos compuesto por cantos rodados, grava, gravilla, arena y matriz arenolimosas. Es te suelo presenta bajos índices de fertilidad con niveles altos de capacidad de drenaje. Es común presenciar cultivos de tomate en este tipo de suelo.

- **Consociación Tabernas (Ts)**

La consociación Tabernas, de origen aluvial, está compuesto por grava, gravilla, cantos rodados, arena y matriz arenolimosas. Este tipo de suelo es muy profundo con bajos índices de fertilidad, con un rango de drenaje bueno a excesivo, presentando cultivos como la caña de azúcar.

- **Consociación Cienego (Ci)**

La consociación Cienego está conformado por depósitos inconsolidados coluviales con presencia de gravillas muy espaciadas. Este suelo es de tipo salino con tendencia a ser salino-sódico, superficial, es afectado por sales, de baja fertilidad, de drenaje excesivo, con microrrelieve plano,

ligeramente pedregoso que no interfiere con las actividades agrícolas, siendo característica la vegetación xerofítica, siendo este parte de las zonas eriazas del área de estudio.

- **Consociación Popan Bajo (Pb)**

La consociación Popan Bajo tiene un origen coluvio-aluvial, está conformado por gravas y cantos rodados, con material anguloso y semianguloso; limo y arena. Este suelo es sódico, profundo, fuertemente afectado por sales o sodio; la fertilidad de este suelo es media, presentando drenaje algo excesivo a excesivo, de drenaje algo excesivo a excesivo, no presenta cobertura vegetal.

- **Consociación Juana Ríos (Jr)**

Esta consociación tiene origen coluvial, está compuesto por cantos rodados, grava, gravilla angulosos, con relleno arenoso y matriz arcillo-limosa. Tiene un bajo índice de fertilidad con un drenaje bueno, es altamente pedregoso que hace que no se lo pueda aprovechar económicamente, ni para uso ganadero ni forestal. Su cobertura vegetal presenta especies como el “palo santo” y plantas cactáceas.

- **Consociación La Mariposa (Lm)**

Es de origen coluvio-aluvial, está conformada por cantos rodados y grava, rocas angulosas y semiangulosas; arena y arcillo-limosos. Este tipo de suelos es muy profundo, con un bajo índice de fertilidad, presentando así un drenaje de rango algo excesivo a excesivo, con microrrelieve planos cubiertos con vegetación arbórea.

- **Consociación Las Canteras (Lca)**

Se encuentra desarrollado sobre depósitos aluviales, compuesto por grava, gravilla y cantos rodados. Es un suelo de mucha profundidad, con bajo índice de fertilidad con drenaje algo excesivo a excesivo, es plano en una superficie plana a fuertemente inclinada, sin presencia de cobertura vegetal.

- **Consociación Los Aguilares (La)**

Este suelo es de origen aluvial, compuesto por sedimentos de cantos rodados, grava, angulosas y semiangulosas; arena y matriz arcilla limosa. Es moderadamente profundo, de baja fertilidad y drenaje algo excesivo, con microrrelieve plano pedregoso que impide el cultivo de especies estacionales, pero sí permite el desarrollo de cultivos permanentes; presenta algunas especies como el algarrobo, “palo verde”, zapote, “azote de Cristo”.

- **Consociación Pampa Tablazos (Pt)**

Esta consociación es de origen aluvial, conformado por sedimentos, cantos rodados, grava, gravilla, arena y arenolimosas. Es un suelo con bajo índice de fertilidad, con drenaje que va desde algo excesivo a moderado, con microrrelieve plano, es ligeramente pedregoso, pero no imposibilita la actividad agrícola, con cobertura vegetal (zapote). Se realizan cultivos de caña de azúcar y de arroz.

- **Consociación Piedra Parada (Pp)**

Este tipo de consociación es de origen aluvial, compuesto por cantos rodados, grava, gravilla, arena y arenolimosas. Es un suelo profundo, que tiene un bajo índice de fertilidad, de buen drenaje, plano y moderadamente pedregoso, dificultando la labranza de tierras, lo que hace que se tienda a quitar las piedras para poder realizar cultivos transitorios; además presenta coberturas vegetales como el vichayo.

- **Consociación Chilcal Alto (Ccl)**

La consociación Chilcal Alto está compuesta de depósitos inconsolidados coluviales, con presencia de cantos rodados. Es un suelo moderadamente profundo, con bajos índices de fertilidad, de drenaje bueno a moderado y microrrelieve plano, con un bajo nivel de pedregosidad pero que no interfiere con las actividades agrícolas; presenta a su vez, especies como el zapote y diversas plantas xerófitas.

- **Consociación La Victoria (Lvi)**

Se encuentra desarrollado sobre depósitos aluviales, conformado por grava, gravilla, cantos rodados arena y arenolimosas. Es un suelo salino,

superficial, que se encuentra afectado por sales y sodio, con bajo índice de fertilidad y con drenaje imperfecto, con microrrelieve plano moderadamente pedregoso, dificultando la labranza de tierras, lo que hace que se tienda a quitar las piedras para poder realizar cultivos transitorios, con cobertura de pastos naturales. En esta área se cultiva transitoriamente arroz.

### 3.1.2.6. Hidrología

El río Chancay es originado por la unión de los ríos Tocomoche y Perlamayo en la zona occidental de la Cordillera de los Andes, a más de 3800 m s.n.m. En la cuenca alta, recibe por la margen izquierda el aporte de los ríos Tayo, Llantán, Las Nieves, Cañad, Chilac y San Lorenzo; mientras que por la margen derecha recibe el aporte de los ríos Huamboyaco, La Chinchera, Cirato, Cumbil y Camellón. Es de régimen irregular, desde sus nacientes hasta su desembocadura en el mar. Las quebradas más importantes son: por la margen derecha, Juana Ríos, Chaparri, Cuculi y Magin; por la margen izquierda Montería y Agua Salada (Zavala, 1995).

Según el Ingemmet (2006), el caudal del río aumenta entre los meses de diciembre a abril, mientras que el resto del año disminuye. Este régimen se basa en las descargas máximas, medias, mínimas durante el periodo de 1914 al 2000.

En dicho estudio se evidencia que durante el fenómeno de El Fenómeno del Niño en los años 1982 - 1983 y 1997 - 1998, en la estación Raca Rumi, se registró descargas máximas de 1200 m<sup>3</sup>/s y 2000 m<sup>3</sup>/s respectivamente, este incremento en las descargas ocasionó desbordes que dañaron la infraestructura de riego, carreteras, puentes, viviendas, terrenos de cultivos.

**Tabla 10:** Descargas río Chancay-Lambayeque, estación Raca Rumi

| Meses   | Q(medio) | Q(máx) | Q(mín) |
|---------|----------|--------|--------|
| Enero   | 28,00    | 83,00  | 5,30   |
| Febrero | 47,00    | 167,60 | 5,10   |
| Marzo   | 68,30    | 465,10 | 22,50  |
| Abril   | 68,50    | 392,70 | 16,90  |
| Mayo    | 39,40    | 89,80  | 11,70  |
| Junio   | 20,60    | 60,60  | 6,00   |
| Julio   | 11,60    | 32,20  | 4,40   |
| Agosto  | 7,80     | 19,90  | 2,90   |

|           |       |       |      |
|-----------|-------|-------|------|
| Setiembre | 9,10  | 32,80 | 2,10 |
| Octubre   | 18,10 | 52,60 | 4,00 |
| Noviembre | 19,70 | 56,10 | 4,00 |
| Diciembre | 20,90 | 72,00 | 4,70 |

Fuente: Asesores Técnicos Asociados, 2002.

### 3.1.2.7. Aspectos Biológicos

#### Flora

En la cuenca baja, la vegetación natural ha sufrido una progresiva disminución por la intensa actividad agrícola que se ha venido desarrollando (Ingemmet, 2006), sin embargo se pueden encontrar especies xerófitas del género *Cereus*, bromelias como la “achupalla” (*Puya sp.*), “barba gris” (*Tillandsia usneoides*); la vegetación arbórea está constituido por las siguientes especies: “tara” (*Caesalpineia tinctoria*), “chamana” (*Dudonae viscosa*), “molle” (*Schinus molle*), “faique” (*Acacia sp.*), “eucalipto” (*Eucalyptus globulus*) y entre las especies arbustivas ribereñas destaca la “caña brava” (*Gynerium sp.*), “palo bobo” (*Tessari integrifolia*).

En relación a la clasificación de la vegetación para el estudio de la Zonificación Ecológica y Económica, elaborado por el Gobierno Regional de Lambayeque (2012c). En la Tabla 11, se presenta la tabla de unidades de vegetación que se ubican dentro del área de estudio.

**Tabla 11:** Distribución porcentual de superficies de las unidades cartográficas de vegetación en el área de estudio.

| Categoría             | Subcategoría                | Tipo de Vegetación             | Área (ha) | Área (%) |
|-----------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------|----------|
| Bosque                | Bosque estacionalmente seco | Bosque seco denso caducifolio  | 25 576,37 | 19,12    |
|                       |                             | Bosque seco ralo caducifolio   | 24,09     | 0,02     |
|                       |                             | Bosque xerofítico perennifolio | 24 036,82 | 17,97    |
|                       | Bosque húmedo               | Bosque montano húmedo bajo     | 1431,14   | 1,07     |
|                       |                             | Bosque montano húmedo alto     | 440,59    | 0,33     |
| Otras áreas naturales | Vegetación arbustiva        | Matorral                       | 296,25    | 0,22     |
|                       |                             | Pradera altoandina             | 147,32    | 0,11     |
|                       |                             | Vegetación xerofítica rala     | 30 167,80 | 22,55    |
|                       | Vegetación herbácea         | Herbazal altoandino            | 17,94     | 0,01     |
|                       |                             | Vegetación herbácea            | 18,45     | 0,01     |

|                      |                               |                                    |            |        |
|----------------------|-------------------------------|------------------------------------|------------|--------|
|                      | Vegetación Leñosa y no Leñosa | Vegetación ribereña                | 625,30     | 0,47   |
| Áreas cultivadas     | Cultivos agrícolas            | Área de cultivos anuales           | 13 901,75  | 10,39  |
|                      |                               | Área de cultivos de arroz          | 3498,39    | 2,62   |
|                      |                               | Área de cultivos de caña de azúcar | 21 021,08  | 15,72  |
|                      | Pasturas                      | Área agropecuaria                  | 2002,65    | 1,50   |
|                      |                               | Pastos naturales                   | 110,37     | 0,08   |
|                      | Área urbana                   | Área urbana                        | 1055,24    | 0,79   |
|                      | Infraestructura hidráulica    | Dique                              | 46,57      | 0,03   |
| Superficies de aguas | Aguas naturales               | Cauce de río                       | 7 252,82   | 5,42   |
|                      |                               | Humedales                          | 230,30     | 0,17   |
|                      |                               | Reservorio                         | 1 851,11   | 1,38   |
| Total                |                               |                                    | 133 752,34 | 100,00 |

Fuente: Estudio de mapa de Zonificación Ecológica y Económica de la región Lambayeque, 2012

A continuación, se describen las principales unidades de vegetación que se ubican dentro del área de estudio:

- **Bosque denso caducifolio**

Esta unidad se caracteriza por una vegetación más densa donde la combinación de árboles con arbustos es desproporcional. A demás las especies son del tipo caducifolio. Se distribuye en el piso inferior de la vertiente occidental de los andes, en los límites con el bosque premontano. Las especies más representativas son el hualtaco, palo santo.

- **Bosque ralo caducifolio**

Se caracteriza por la presencia de especies de árboles y arbustos dispersos, acompañado de hierbas, con pérdida de su follaje en determinadas épocas del año, principalmente en época de escasa o nula humedad. Las especies características lo constituyen el zapote, palo santo, hualtaco, cola de zorro. Esta unidad se encuentra constituyendo la vegetación de llanura y los bosques tipo sabana.

- **Bosque xerofítico perennifolio**

Esta unidad de vegetación se subdivide en el bosque denso y el ralo. El bosque denso xerofítico perennifolio se caracteriza por presentar una fisionomía de vegetación densa y con follaje persistente, que habitan en

lugares de escasa humedad. Se distribuye a lo largo del territorio, generalmente a las vertientes adyacentes a los ríos. Las especies más representativas son el molle, el zapote, el faique, los vichayos, el choloque, entre otros.

Mientras que el bosque ralo xerofítico perennifolio es un conjunto de especies de follaje persistente durante todo el año, a pesar de las condiciones críticas de humedad. Este se encuentra distribuido en gran parte del territorio desde la parte central hacia el oeste. Las especies típicas de esta unidad lo constituye el algarrobo y el zapote principalmente. La forma como se presenta la vegetación leñosa, especialmente los árboles es dispersa a manera de sabanas o en la extensión de la llanura.

- **Bosque montano húmedo bajo**

Esta unidad del bosque húmedo se caracteriza por la presencia de vegetación de bajo porte. Esta formación se atribuye a la dominancia de vegetación arbustiva pero adyacente al bosque montano alto. Su distribución es la misma que para el tipo anterior, solo que ésta se localiza en las lomadas, en los límites con la jalca y en las laderas con suelos muy pedregosos o superficiales. La vegetación de esta unidad, en el bosque húmedo bajo, está conformada por arbustos de porte mediano y algo frondoso, tales como *Senna cajamarcae*, *Cantua pyrifolia*, *Salvia hirta*, *Baccharis latifolia*. También encontramos especies del género *Juglans* “nogal”, *Alnus* “aliso”, *Anona* “chirimoya”, *Peperomia* “congoña”, *Piper* “matico”, *Rubus* “zarzamora mullaka”, *Inga* “huabashilimba”, *Schinus* “molle”, *Passiflora* “poro poro”, *Bixa* “achote de montaña” *Brugmansia* “floripondio rojo”, etc.

En el piso superior, la vegetación natural está representada por arbustos perennifolios, que habitan en las laderas como: *Polylepis* sp., *Hypericum laricifolium*, *Lomatia hirsuta*, *Hesperomeles lanuginosa*, *Baccharis grandicapitulata*. Esta formación se atribuye a la dominancia de vegetación de varios metros de altura, que constituyen los bosques montanos. Se encuentra localizada en las laderas suaves a empinadas, en las depresiones del terreno y en las planicies, áreas con suelo profundo o pedregoso. Son bastante húmedos por la nubosidad que se forma de manera casi permanente. Su distribución en el territorio está por encima de los 2700 m s.n.m.

- **Bosque montano húmedo alto**

Esta unidad del bosque húmedo se caracteriza por la presencia de vegetación de alto porte y se encuentra en la zona andina del departamento. Se atribuye esta formación a la dominancia de vegetación de porte alto. Está relacionado con los bosques alterados por la acción humana, quedando como árboles remanentes.

- **Matorral**

En estas áreas existe una vegetación muy densa, con poca intervención humana, que se ubican en áreas inaccesibles a actividades antrópicas. Las condiciones de humedad son limitantes, la vegetación es favorecida por la humedad existente en la atmósfera.

- **Vegetación Xerofítica Rala**

Esta unidad está caracterizada por la vegetación arbustiva distribuida de forma rala o casi nula, en condiciones de escasa o nula humedad, favorecida por la humedad atmosférica.

- **Herbazal altoandino**

Esta unidad se caracteriza por la presencia de pastos tipo gramíneas, hierbas de diferentes especies y géneros; y en el campo se encuentran agrupadas en forma densa o abierta. En esta unidad se puede desarrollar la actividad ganadera en forma intensiva o extensiva.

- **Vegetación herbácea**

Esta unidad se caracteriza por la total dominancia de flora herbácea, donde se incluyen pastos introducidos y naturalizados en las áreas de ocurrencia y vegetación nativa. Se trata de área de crianza de ganado vacuno, ovino, entre otros.

- **Área de cultivos anuales**

Los cultivos que sobresalen en esta unidad son: limón, mango, maracuyá, dedicados a la industria para la agroexportación como fruta fresca o procesada. La mayor parte del área dedicada a estos cultivos utiliza

sistema de riego tecnificado, a través de pozos de agua subterránea, ya que en estos valles no cuentan con sistema de riego regulado.

- **Área de cultivos de caña de azúcar**

Es considerado como el segundo cultivo en importancia y principal como producto agroindustrial, cuyo producto principal es el azúcar, básico para la alimentación humana y la industria, además de otros subproductos que se pueden obtener de este cultivo.

### **Fauna**

Según el Estudio Geoambiental de la Cuenca del Río Chancay-Lambayeque (Ingemmet, 2006), en la cuenca baja la fauna es escasa y está confinada en algunos casos a lugares poco accesibles, con vegetación arbustiva. Entre “mielero de antifaz” (*Diglossopsis cyanea*), el “mielero” (*Diglossa brunneiventris*), el “quende” (*Chalcostigma ruficeps*), el “quende grande” (*Pterophanes cyanopterus*), la “Guayana” (*Notiochelidon murina*) y el “chingo” (*Coragyps atratus*), la “china linda” (*Phalcoboenus megalopterus*), el “gavilán” (*Buteo polyosoma*), el “canastero dorso manchado” (*Asthenes humilis*) y el “plomito pequeño” (*Phrygilus plebejus*). Entre las especies de mamíferos importantes se tiene: el “venado cola blanca” (*Odocoileus virginianus*), el “ratón montaraz de Taczanowski” (*Thomasomys taczanowskii*), el “murciélago orejón andino” (*Histiotus montanus*), el “ratón montaraz ceniciento” (*Thomasomys cinereus*) y la “rata casera” (*Rattus rattus*). En relación a la herpetofauna determinada por dicho estudio, se registraron dos especies: la “lagartija escorpión” (*Stenocercus melanopygus*) y la “lagartija” (*Proctoporus ventrimaculatus*).

### **3.1.2.8. Aspectos Socioeconómicos**

#### **Población**

Según el Censo Nacional del 2017 realizado por el INEI, el área de estudio posee una población de 142 654 habitantes, siendo el más poblado la ciudad de Monsefú con un 16,8 % de la población seguida por Tumán y Pátapo.

## **Actividades económicas**

Las actividades económicas que se realizan en la cuenca Chancay-Lambayeque son muy diversas, las cuales serán detalladas a continuación (ANA, 2015):

- **Actividad Agrícola**

Los cultivos predominantes en la cuenca baja son el arroz y la caña de azúcar, los cuales son insumos para la agroindustria de la región, asimismo, en menor proporción se siembra algodón y maíz amarillo duro.

- **Actividad Pecuaria**

Esta actividad económica se desarrolla a pequeña escala por mini fundos y pequeños agricultores. Se basa en la crianza y explotación de ganado vacuno, caprino, ovino y aves. Presentan diversas limitaciones, entre ellas, la falta de recursos económicos, asistencia técnica y tecnología.

- **Actividad Pesquera**

El potencial hidrobiológico marino formando sobre todo por peces, tiene gran importancia. Se capturan principalmente bonito, caballa, suco, cachema y tollo. En cuanto a la producción hidrobiológica marítima destinada para consumo humano directo ha disminuido considerablemente en los últimos años, en el 2008 se desembarcaron 8630,0 TMB, en el año 2009, 6150,7 TMB y el año 2010, 4549.8 TMB.

- **Turismo**

Según el Plan Estratégico Regional de Turismo de Lambayeque 2025, el turismo departamental en el año 2017 generó 309 001 visitantes, con 281 874 visitantes nacionales y 27 127 visitantes extranjeros, observándose que la mayor cantidad de turistas en el área de estudio se concentran en el Museo de Sitio Huaca Rajada Sipán. (Gobierno Regional de Lambayeque, 2019) El valor agregado del turismo es la artesanía, principalmente en el sector de Monsefú, una actividad complementaria importante a pesar de tener un escaso impulso. Los

principales productos son los sombreros de paja y tejidos de hilos diversos (mantales, ponchos, alforjas, entre otros).

### **Uso actual de suelo**

Según lo establecido en la Memoria Descriptiva del Mapa de Cobertura y Uso Actual de las Tierras (Gobierno Regional de Lambayeque, 2012d), el área de estudio cuenta con 13 unidades de uso actual de suelos:

- **Tejido urbano continuo**

Se alude a los cascos urbanos del área de estudio en donde se realizan actividades económicas como el intercambio comercial mediante las redes viales circunscritas al ámbito nacional, regional y local.

- **Obras Hidráulicas.**

Los reservorios de Tinajones y de Collique son las obras hidráulicas de mayor importancia en el área de estudio debido a que permite la conducción y almacenamiento de las aguas para riego de cultivos. Por otro lado, tenemos otras obras hidráulicas como el canal Taymi y el dique del reservorio de Tinajones ubicado en Chongoyape.

- **Áreas Arroceras.**

El cultivo que predomina en el área de estudio es el arroz, debido al sistema de riego regulado del valle Chancay, el cual permite asegurar la continuidad de la producción de este cereal.

**Fotografía 1:** Cultivos de arroz



Fuente: Elaboración propia

- **Área de Policultivos**

Estas áreas se ubican principalmente en zonas eriazas y sin uso debido a que se encuentran próximos a una fuente de agua. Los cultivos que suelen producirse en estas zonas son: maíz choclo, maíz amarillo duro, menestras, algodón, hortalizas, y en algunos casos, espárragos, ají paprika y uvas.

**Fotografía 2:** Cultivo de uvas



Fuente: Elaboración propia

- **Áreas de caña de azúcar.**

La caña de azúcar es uno de los productos e insumos más importantes para la agroindustria de la región seguido del arroz. Este cultivo es permanente porque puede permanecer en el campo por más de dos años.

**Fotografía 3:** Cultivo de caña de azúcar



Fuente: Elaboración propia

- **Área Agropecuaria.**

La agricultura usualmente está asociada con la actividad ganadera, sin embargo, su producción es limitada a diferencia de la actividad agrícola. Se cría principalmente ganado vacuno, porcino y caprino.

- **Bosque Abierto bajo.**

En esta unidad se pueden encontrar mayormente bosques secos ralos de llanura, cuya estructura es de árboles, arbustos y hierbas, entre las cuales encontramos: zapote, algarrobo, hualtaco, palo santo, chicáss, faique, choloque, sune, frejolillo, uña de gatos, vichayo, pájaro bobo, chope, chilco, achiote, cola de zorro, grama, cordoncillo, entre otros.

Por otro lado, los bosques tipo sabana se ubican en el sector Casa de Madera y en trayectos de la carretera entre Pomalca y Tumán. Estos bosques están conformados principalmente por los vichayos (*Capparis*

*avicennifolia*) y arbustos de zapotes (*Capparis scabrida*), los cuales se encuentran distanciados a unos 20 metros uno de otro.

- **Bosque Denso Alto**

Los bosques densos altos se caracterizan por sus arbustos de porte mediano y algo frondosos, entre los cuales tenemos: *Canuta pyrifolia*, *Senna cajamarca*, *Baccharis latifolia*, *Salvia hirta*. Asimismo, se puede encontrar nogal, chirimoya, aliso, congona, zarzamora, matico, mullaka, molle, huabashilimba, poro poro, floripondio rojo, achote de montaña, etc.

- **Bosque Denso Bajo**

Los bosques densos bajos están compuestos por vegetación de poca altura, pero distribuida en forma densa, dichas características corresponden a los bosques secos de montaña.

Este tipo de bosque presenta diferentes tipos de vegetación de acuerdo a su altitud. En zonas desde 500 a 1800 m s.n.m, se encuentran árboles caducifolios como *Tournefortia volúbilis*, *Acnistus arborescens*, *Cordia peruviana*, *Schoeffia flexuosa*, *Verbesina pentalobifolia*, *Phytolacca dioica*, *Streptosolen jamaesoni*, etc. En el piso superior, predominan arbustos perennifolios como: *Polylepis ssp.*, *Chuquiranga jussieu*, *Hypericum laricifolium*, *Hesperomeles lanuginosa*, *Lomatia hirsuta*, *Baccharis grandicapitulata*.

- **Herbazal.**

Esta unidad es ideal para el desarrollo de la actividad ganadera en sus distintas formas debido a la presencia de pastos tipo gramíneas y hierbas de diversas especies y géneros distribuidas de forma densa o abierta.

- **Vegetación Herbácea y/o Arbustiva.**

Esta unidad presenta bosques del tipo chaparral, vegetación ribereña y matorral seco. El chaparral se ubica principalmente en laderas escarpadas y está formado por especies como el sune, overo, zapote, trema y árboles de hualtaco. Por otro lado, los matorrales secos se localizan cerca de la carretera que une Pomalca y Tumán y

predominan los algarrobos, mata loba, chopes, palo negro y canutillo, las cuales son especies adaptadas a suelos arenosos. En el caso de la vegetación ribereña, las principales especies son el sauce y el guayaquil.

- **Ríos (50 metros).**

Esta unidad se refiere al cauce del río Chancay- Lambayeque considerando un *buffer* de 50 metros. Estos cauces se activan durante el Fenómeno del Niño causando daños a la infraestructura adyacente, áreas de cultivos y poblaciones aledañas.

- **Humedales.**

Los humedales más representativos del área de estudio son los Humedales de Etén, los cuales se encuentran ubicados en el límite de los distritos de Etén y Monsefú. Los humedales reciben gran cantidad de aves migratorias del Océano Atlántico durante un determinado periodo del año.

## Capítulo IV

# Metodología

---

### 4.1 Tipo y diseño de la investigación

#### 4.1.1. Tipo de investigación

Según Hernández & Baptista (2014), la investigación aplicada tiene fines prácticos en el sentido de solucionar problemas identificados en un área de estudio. Está ligada directamente a la aparición de necesidades o problemas concretos y al deseo del investigador de plantear una solución a estos.

La presente investigación es de tipo aplicada debido a que se identificó como problema la falta de información actualizada relacionada con la delimitación de zonas susceptibles a inundaciones en la cuenca del río Chancay-Lambayeque y se planteó su delimitación mediante los métodos del Proceso de Análisis Jerárquico y Random Forest.

#### 4.1.2. Diseño de investigación

El diseño de investigación es un planeamiento de una serie de actividades sucesivas y organizadas, que pueden adaptarse a las particularidades de cada investigación y que nos indican los pasos y pruebas a efectuar y las técnicas a utilizar para recolectar y analizar los datos. (Tamayo y Tamayo, 2003)

Los diseños de las investigaciones descriptivas se pueden clasificar en transversales y longitudinales. Los diseños de investigación transversal recolectan datos en un solo momento, en un tiempo único. Su propósito es describir variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento. (Hernández & Baptista, 2014)

El diseño de la presente investigación es de tipo transversal, ya que la recolección de la información se hizo en un solo momento y en un tiempo único, así mismo, el análisis de las variables se realizó en un momento determinado.

#### **4.1.3. Unidad de análisis**

La unidad de análisis son los sujetos “que van a ser medidos” y es definida por el investigador (Hernández, Fernández & Baptista, 2006). Es así como la unidad puede estar dada por una persona, un grupo, un objeto u otro que contengan claramente los eventos a investigar.

Es así como en la presente investigación la unidad de estudio son las zonas susceptibles a inundaciones porque es donde se recopila toda la información necesaria para el análisis.

#### **4.1.4. Población**

Una vez que se ha definido cuál será la unidad de análisis, se procede a delimitar la población que va a ser estudiada y sobre cual se pretende generalizar los resultados (Hernández & Baptista, 2014). La población es el conjunto de elementos con características comunes que son objetos de análisis y para los cuales serán válidas las conclusiones de la investigación.

Por lo tanto, la población de la presente investigación son las 53 cuencas de la vertiente del Pacífico.

#### **4.1.5. Muestra**

La muestra es un subconjunto o parte de la población en que se llevará a cabo la investigación. Es una parte representativa de la población (López, 2004). Básicamente, categorizamos las muestras en dos grandes ramas: las muestras no probabilísticas y las muestras probabilísticas. La muestra no probabilística es un subgrupo de la población en la que la

elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino de las características de la investigación. (Hernández & Baptista, 2014)

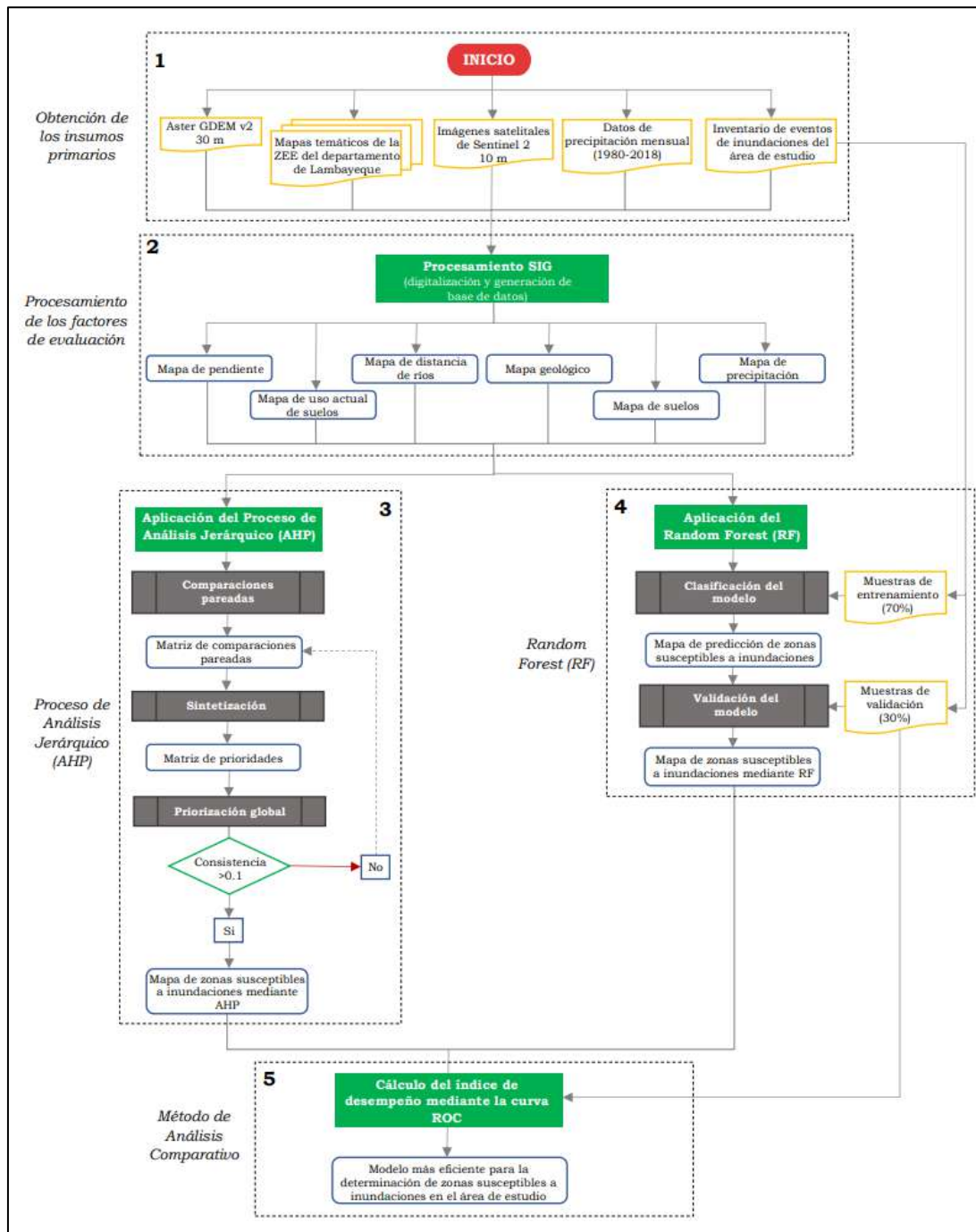
La muestra de nuestra investigación es la cuenca baja del río Chancay-Lambayeque y es una muestra no probabilística debido a los diferentes factores por los que fue seleccionada.

#### **4.1.6. Selección de la muestra**

La muestra no probabilística por conveniencia es conformada por el conjunto de casos que son accesibles al investigador, por lo tanto, disponibles para éste. (Hernández & Baptista, 2014)

La selección de la muestra de la presente investigación se llevó a cabo debido a la disponibilidad de la información de los factores condicionantes, desencadenantes y el inventario de inundaciones ocurridas en las cuencas, por lo que, se tomó como muestra la cuenca baja del río Chancay-Lambayeque.

**Figura 15:** Diagrama de flujo de la investigación.



Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.7. Recolección y procesamiento de la base de datos

Los parámetros cartográficos empleados en la presente investigación para la elaboración de los modelos de predicción fueron los siguientes:

**Tabla 12:** Parámetros cartográficos

| Elipsoide geodésico de referencia |                                         |
|-----------------------------------|-----------------------------------------|
| Elipsoide:                        | WGS84 (World Geodesic System 1984)      |
| Datum:                            | Geocéntrico                             |
| Semi Eje Mayor:                   | 6 378 137 metros                        |
| Semi Eje Menor                    | 6 356 752,31424 metros                  |
| Achatamiento:                     | 1/298,257223563                         |
| Sistema de Coordenadas            |                                         |
| Sistemas de Coordenadas:          | UTM (Universal Transversal de Mercator) |
| Zona:                             | 17 sur con meridiano central 75° oeste  |
| Falso Norte:                      | 10 000 000 metros                       |
| Falso Este:                       | 500 000 metros                          |
| Escala en Meridiano central:      | 0,9996                                  |
| Escala                            |                                         |
| Escala de trabajo:                | 1/100 000                               |
| Resolución                        | 30 metros                               |

Fuente: Adaptado de Asencios Bazán y Ato Vértiz (2015).

Toda la información espacial recopilada ha sido adaptada a estos estándares cartográficos con el fin de obtener insumos estandarizados en la generación de los modelos predictivos.

Es importante precisar que el área de estudio se encuentra dentro de la Zona 17 Sur y faja “M” del sistema de coordenadas UTM.

##### 4.1.7.1. Factores condicionantes

#### Geología

La información de la geología de la zona de estudio fue obtenida del mapa geológico proveniente de la Zonificación Ecológica Económica del departamento de Lambayeque aprobado por Ordenanza Regional N° 005-2014-GR. LAMB/CR, el cual se encuentra en escala 1:100 000. A fin de tener mayor información respecto a las unidades estratigráficas, se tomó en cuenta el Estudio Geológico del Departamento de Lambayeque elaborado el año 2013.

Dicha información fue descargada del Geoservidor del Ministerio del Ambiente:

<http://geoservidor.minam.gob.pe/zee-aprobadas/lambayeque/>

## **Suelos**

El mapa de suelos de la Zonificación Ecológica Económica del departamento de Lambayeque es el insumo de elaboración del factor suelo en nuestra investigación. Es preciso aclarar que dicha información se encuentra en escala 1:100 000. La unidad cartográfica de dicho factor es la serie taxonómica del suelo según clasificación de suelos de la FAO, 2005.

Se tomó en cuenta la descripción de cada una de las series taxonómicas del Estudio de Suelos con Fines de Zonificación Ecológica Económica del año 2012. La información detallada anteriormente fue descargada del Geoservidor del Minam.

## **Uso actual de suelos**

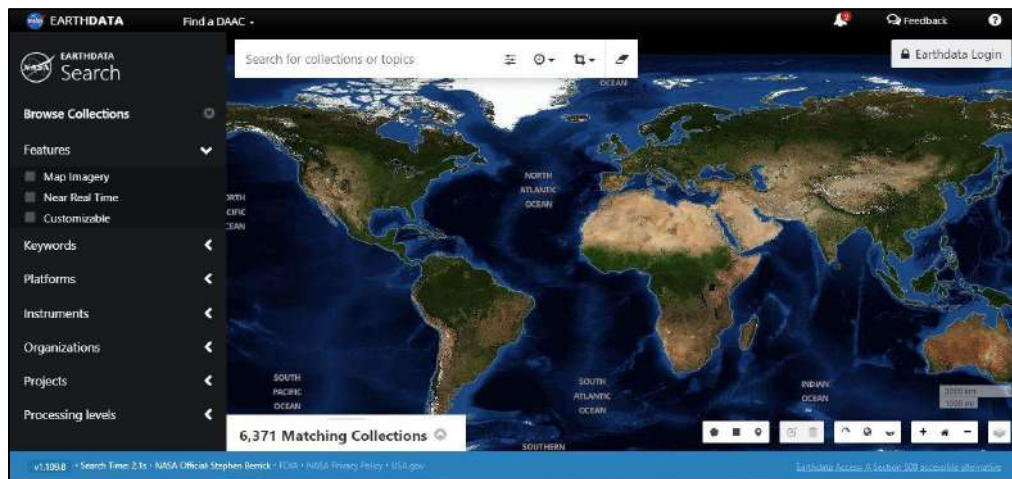
La información del uso actual de suelos del área de estudio fue obtenida del mapa de uso actual de suelos de la Zonificación Ecológica Económica del departamento de Lambayeque, la cual se encuentra en escala 1:100 000. La unidad cartográfica de dicho factor es la categoría Nivel III según el Sistema CORINE Land Cover.

Se tomó en cuenta la descripción de cada una de unidades de cobertura detalladas en la Memoria Descriptiva del Mapa de Cobertura y Uso Actual de Tierras del año 2012. La información detallada anteriormente fue descargada del Geoservidor del Minam.

## **Pendiente**

Para la elaboración del factor pendiente del área de estudio, se procedió a descargar el Aster GDEM de resolución espacial de 30 metros. El Aster GDEM fue obtenido a través del enlace <https://search.earthdata.nasa.gov>, se descarga en formato Geo TIFF a partir de mosaicos provistos de 1° x 1°. Posteriormente, se procedió a procesar en el software ArcGIS. La unidad cartográfica de dicho factor es rango en porcentaje según lo establecido en el Reglamento de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor (D.S. N° 017-2009-AG), así como, en la ZEE departamental.

**Figura 16:** Portal de descargas del Aster GDEM



Fuente: Earthdata

## Distancia al río

El Estudio de la Delimitación del Ámbito Territorial de la Administración Local del Agua Chancay – Lambayeque (2014), la Actualización de Unidades Hidrográficas y Codificación Integral de cursos de Agua Superficial en Ámbitos de Administraciones Locales de Agua (2014) y las cartas nacionales del Instituto Geográfico Nacional (IGN) fueron las fuentes principales para la elaboración de la red hídrica.

Posteriormente, la red hídrica fue actualizada con una imagen Sentinel-2 de resolución espacial 10 metros, la cual fue obtenida a través del enlace <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. La imagen satelital georreferenciada utilizada fue capturada el 24 de agosto del año 2018.

**Figura 17:** Portal de descarga del Sentinel 2



Fuente: EESA Copernicus

Finalmente, se elaboró varias zonas de influencia a distancias especificadas alrededor de la red hídrica con la herramienta Multibuffer del software ArcGIS, la unidad cartográfica de dicho factor es el rango de distancia de cercanía a la red hídrica en metros según lo establecido en el Manual para la Evaluación de Riesgos originados por Fenómenos Naturales elaborado por Cenepred (2014).

#### 4.1.7.2. Factores desencadenantes

##### Precipitación Media Mensual

El Senamhi proporcionó los datos de precipitación para la presente investigación a fin de elaborar el factor de precipitación media mensual. Se seleccionaron ocho estaciones meteorológicas al interior y cerca del área de estudio, las cuales contaban con un registro de datos desde el año 1980 hasta el año 2018 en su mayoría.

#### 4.1.7.3. Inventario de inundaciones

El mapa de inventario de inundaciones se generó sobre toda la superficie del área de estudio, utilizando una recopilación de datos históricos sobre eventos de inundación obtenidas de instituciones gubernamentales, trabajo de campo e interpretación de las imágenes satelitales Sentinel-2 capturadas en 2017.

**Tabla 13:** Base de datos de instituciones gubernamentales

|   | Inventario                                                                         | Año de Publicación | Fuente                                                                                                      | Institución                                         |
|---|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 1 | Zonas afectadas por el Niño Costero 2017                                           | 2017               | Evaluación Geológica de las Zonas Afectadas por el Niño Costero 2017 en las regiones Lambayeque – Cajamarca | Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (Ingemmet) |
| 2 | Distritos afectados por inundación provocada por el fenómeno del Niño Costero 2017 | 2017               | Reporte al 100% del EDAN – Temporada de Lluvias a nivel nacional                                            | Instituto de Defensa Civil (Indeci)                 |
| 3 | Puntos críticos con riesgo a inundaciones                                          | 2015, 2016, 2018   | Descargado Sigrid*                                                                                          | Autoridad Nacional del Agua (ANA)                   |
| 4 | Inventario de peligros a inundación                                                | 2006, 2010         | Descargado del Geocatmin**                                                                                  | Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (Ingemmet) |

|   |                                                                        |           |                                                                                                                                                  |                                                                                          |
|---|------------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5 | Centros poblados en peligro ante inundación pluvial y lluvias intensas | 2017      | Informes de evaluación de riesgo por inundación pluvial u originado por lluvias intensas en los centros poblados del departamento de Lambayeque. | Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (Cenepred) |
| 6 | Listado de Emergencias                                                 | 2003-2018 | Obtenido del Sinpad***                                                                                                                           | Instituto de Defensa Civil (Indeci)                                                      |

Fuente:

\*Sigrid: <http://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/>

\*\*Geocatmin: <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>

\*\*\*Sinpad: <http://sinpad.indeci.gob.pe/sinpad/emergencias/mapa/ListadoEmergencias.asp>

Posteriormente, a fin de verificar la información secundaria recolectada, se realizó la visita de campo el 20, 21 y 22 de setiembre del 2019 a los principales centros poblados de la cuenca baja del río Chancay Lambayeque y se elaboró una breve encuesta a los pobladores. En el Anexo I, se adjunta el formato de la encuesta. En la Tabla 14, se detalla los centros poblados visitados.

**Tabla 14:** Centros poblados visitados en la salida de campo

|                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | <p style="text-align: center;"><b>MONSEFÚ</b></p> <p>Los pobladores encuestados manifestaron que se vieron afectados por los fenómenos del Niño del 2005 y 2017, principalmente la zona donde se encuentran ubicadas las viviendas en la zona sur del distrito. Dicha información fue verificada en el Sinpad y se observa que, en el año 2017, Indeci atendió dos emergencias por lluvias intensas en dicho distrito.</p> |
|  | <p style="text-align: center;"><b>ETÉN</b></p> <p>Los encuestados en el distrito de Etén comentaron que sus viviendas se vieron afectadas por el fenómeno del Niño de 1983, 2007 y 2017. Se realizó la verificación en el Sinpad y se observó que, en el año 2017, Indeci atendió cuatro emergencias por lluvias intensas en dicho distrito.</p>                                                                           |

|                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>MIRAFLORES</b></p> <p>Se encuestó a los pobladores de Miraflores y manifestaron que algunas viviendas y un colegio se vieron afectados por el Niño Costero del 2017. En el “Informe de evaluación de riesgos originado por lluvias intensas en los centros poblados de Reque, Las Delicias y Miraflores, distrito de Reque, provincia Chiclayo, departamento Lambayeque” (Cenepred, 2017), se hace mención que las lluvias intensas del verano 2017 causaron la saturación del suelo y acumulación del agua en este centro poblado.</p> |
|  | <p style="text-align: center;"><b>REQUE</b></p> <p>Los pobladores de Reque nos comentaron que gran parte del área urbana del centro poblado incluyendo la plaza se vieron afectados por el fenómeno del Niño. Dicha información fue verificada Sinpad y se observó que, en el año 2017, Indeci atendió dos emergencias. El puente Reque fue afectado por el fenómeno del Niño del 1998. (Ingemmet, 2017)</p>                                                                                                                                                              |

|                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | <p style="text-align: center;"><b>VALENCIA</b></p> <p>Los encuestados en el centro poblado Valencia manifestaron que la zona agrícola y urbana que se encuentran en la parte de pendiente baja, se ven afectadas por inundaciones. En el “Informe de Evaluación de riesgo originado por inundación pluvial en los centros poblados de Paypay, Guzmán, Valencia y Callanca del distrito de Monsefú, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque” (Cenepred, 2017), menciona que se registraron lluvias intensas en este centro poblado en marzo del 2017, produciendo desastres tanto en la zona urbana como en la agrícola.</p> |
|  | <p style="text-align: center;"><b>ALICÁN BAJO</b></p> <p>Los pobladores de Alicán Bajo manifestaron que únicamente las zonas agrícolas cercanas al margen del río Reque se ven afectadas por inundaciones. Es importante mencionar que la ANA (2015), estableció un punto crítico ante inundaciones cerca de las zonas de cultivo y urbanas de dicho centro poblado y elaboró un mapa de ruta de evacuación y refugio, el cual contempla al centro poblado de Alicán Bajo.</p>                                                                                                                                                        |

|                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | <p style="text-align: center;"><b>SAN PABLO</b></p> <p>Los resultados de las encuestas tomadas en el centro poblado San Pablo nos permiten determinar que dicha zona se vio afectada por inundaciones en los diferentes Fenómenos del Niño. Dicha información fue corroborada ya que la Autoridad Nacional del Agua - ANA ( 2015), estableció un punto crítico ante inundaciones cerca de las zonas de cultivo y urbanas de dicho centro poblado y elaboró un mapa de ruta de evacuación y refugio, el cual contempla San Pablo.</p> |
|  | <p style="text-align: center;"><b>CASA DE MADERA</b></p> <p>Los pobladores de este centro poblado mencionan que en épocas de lluvias intensas no se evidencia inundación, solo el humedecimiento parcial del suelo debido a la textura arenosa del mismo; por lo que, no ha sido incluida en el inventario de inundaciones para la presente investigación.</p>                                                                                                                                                                       |

|                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | <p style="text-align: center;"><b>RINCONAZO</b></p> <p>Los resultados de las encuestas tomadas en el centro poblado Rinconazo nos permiten determinar que no se vio afectado por el FEN 2017, sin embargo, en la tesis “Estudio de encauzamiento y defensas ribereñas en el río Chancay-Lambayeque sector centro poblado Rinconazo Tután”, Bustamente Hernandez (2010) menciona que de ocurrir una nueva avenida extraordinaria como el FEN del 1998 podría arrasarse con todo el pueblo debido a que en dicho FEN se destruyeron áreas agrícolas y parte del borde de la ribera derecha del río. Por lo tanto, dicho centro poblado formará parte del inventario.</p> |
|  | <p style="text-align: center;"><b>PUCALÁ</b></p> <p>Los pobladores encuestados manifestaron que se vieron afectados por los fenómenos del Niño del 1983 y 2017, principalmente en la zona próxima al río. Dicha información fue verificada en el Sinpad y se observa que, en el año 2017, Indeci atendió dos emergencias por lluvias intensas en dicho distrito.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

|                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | <p style="text-align: center;"><b>LA CRÍA</b></p> <p>Los poblados de La Cría nos comentaron que las viviendas ubicadas cerca al cauce de la quebrada se ven afectadas cuando hay presencia de lluvias intensas o el FEN. Dicha información concuerda con lo descrito en la Evaluación Geológica de las zonas afectadas por el Niño Costero 2017 en las regiones Lambayeque – Cajamarca elaborado por Ingemmet (2017), por lo tanto, fue incluido en el inventario.</p> |
|  | <p style="text-align: center;"><b>DESAGUADERO</b></p> <p>Los encuestados del centro poblado Desaguadero nos manifestaron que por la ocurrencia del FEN se activa la quebrada causando daños en sus viviendas y zonas de cultivos. Lo mencionado anteriormente guarda relación con lo descrito en la Evaluación Geológica de las zonas afectadas por el Niño Costero 2017 en las regiones Lambayeque – Cajamarca elaborado por Ingemmet (2017).</p>                     |

|                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | <p style="text-align: center;"><b>PÁTAPO</b></p> <p>Los pobladores del centro poblado Pátapo nos comentaron que las viviendas ubicadas en el cauce o cerca a la quebrada se ven afectadas en los FEN debido a su activación. Dicha información fue corroborada y confirmada con ayuda de la evaluación geológica de las zonas afectadas por el Niño Costero 2017 en las regiones Lambayeque – Cajamarca (Ingemmet, 2017).</p>                                                                                            |
|  | <p style="text-align: center;"><b>CUCULÍ</b></p> <p>Los resultados de las encuestas tomadas en el centro poblado Cuculí nos permiten determinar que dicha zona se vio afectada por el FEN 2017 debido a la activación de la quebrada seca ubicada cercana al área urbana. Se verificó dicha información con lo descrito en la Evaluación Geológica de las zonas afectadas por el Niño Costero 2017 en las regiones Lambayeque – Cajamarca elaborada por Ingemmet (2017), por lo cual, fue incluido en el inventario.</p> |

|                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | <p style="text-align: center;"><b>SAN JUAN</b></p> <p>En los resultados obtenidos por las encuestas realizadas, se evidenció que el centro poblado fue afectado por el Fenómeno del Niño Costero (2017). En el “Informe de evaluación de riesgo por lluvias intensas en el centro poblado de San Juan, distrito de Chongoyape, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque” elaborado por el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (2017), menciona que se registraron lluvias intensas por 15 días en este centro poblado en marzo del 2017, ocasionando desastres en la zona rural con un considerable porcentaje de pérdidas.</p> |
|  | <p style="text-align: center;"><b>CHONGOYAPE</b></p> <p>Los pobladores del centro poblado Chongoyape expresaron que el badén Juana Ríos constantemente se inunda en época de lluvia impidiendo el acceso al centro poblado. En la “Evaluación Geológica de las zonas afectadas por el Niño Costero 2017 en las regiones Lambayeque – Cajamarca”, se detalla que la quebrada Juana Ríos se activa cuando se presentan el FEN (Ingemmet, 2017).</p>                                                                                                                                                                                                                                  |



#### TABLAZO

Los encuestados del centro poblado de Tablazo manifestaron que sus viviendas y cultivos se vieron afectados por el FEN 2017, debido a la activación de la quebrada Montería. Se corroboró dicha información con la “Evaluación Geológica de las zonas afectadas por el Niño Costero 2017 en las regiones Lambayeque - Cajamarca” elaborada por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - Ingemmet (2017), por lo cual, fue incluido en el inventario.

Finalmente, se obtuvo 99 puntos en los cuales hay evidencias de la ocurrencia de inundación por un evento extraordinario. La ubicación de dichos puntos en coordenadas UTM se detallan en la Tabla 15.

**Tabla 15:** Ubicación de los puntos del inventario de inundaciones.

| Codificación del punto | Coordenadas UTM WGS84 17L |           | Altitud (m s.n.m.) |
|------------------------|---------------------------|-----------|--------------------|
|                        | Este (m)                  | Norte (m) |                    |
| D-1                    | 625 658                   | 9 236 828 | 8                  |
| D-2                    | 625 670                   | 9 236 634 | 7                  |
| D-3                    | 625 124                   | 9 237 424 | 8                  |
| D-4                    | 626 665                   | 9 237 676 | 10                 |
| D-5                    | 624 789                   | 9 238 984 | 8                  |
| D-6                    | 625 087                   | 9 239 140 | 7                  |
| D-7                    | 629 151                   | 9 238 268 | 11                 |
| D-8                    | 627 698                   | 9 240 038 | 9                  |
| D-9                    | 628 207                   | 9 240 441 | 13                 |
| D-10                   | 630 518                   | 9 240 985 | 19                 |
| D-11                   | 629 534                   | 9 242 008 | 24                 |
| D-12                   | 629 750                   | 9 242 304 | 18                 |
| D-13                   | 630 186                   | 9 242 872 | 16                 |
| D-14                   | 630 781                   | 9 242 900 | 14                 |
| D-15                   | 631 049                   | 9 242 997 | 13                 |
| D-16                   | 632 475                   | 9 244 828 | 23                 |
| D-17                   | 632 731                   | 9 244 377 | 16                 |
| D-18                   | 632 895                   | 9 244 422 | 19                 |
| D-19                   | 633 460                   | 9 244 819 | 26                 |
| D-20                   | 634 487                   | 9 245 383 | 22                 |
| D-21                   | 634 326                   | 9 243 598 | 28                 |
| D-22                   | 637 321                   | 9 245 871 | 35                 |
| D-23                   | 637 659                   | 9 245 572 | 38                 |
| D-24                   | 642 414                   | 9 247 656 | 39                 |
| D-25                   | 643 621                   | 9 247 290 | 38                 |
| D-26                   | 645 890                   | 9 247 023 | 51                 |
| D-27                   | 650 372                   | 9 246 062 | 86                 |
| D-28                   | 658 391                   | 9 246 715 | 116                |
| D-29                   | 655 165                   | 9 249 705 | 77                 |
| D-30                   | 654 119                   | 9 249 840 | 86                 |
| D-31                   | 654 687                   | 9 250 619 | 78                 |
| D-32                   | 655 166                   | 9 251 929 | 79                 |
| D-33                   | 650 149                   | 9 255 756 | 98                 |
| D-34                   | 651 317                   | 9 255 701 | 114                |
| D-35                   | 652 184                   | 9 255 647 | 106                |
| D-36                   | 655 074                   | 9 257 468 | 107                |

|      |         |           |     |
|------|---------|-----------|-----|
| D-37 | 659 786 | 9 252 111 | 96  |
| D-38 | 660 878 | 9 251 200 | 108 |
| D-39 | 661 327 | 9 250 849 | 117 |
| D-40 | 661 919 | 9 252 037 | 99  |
| D-41 | 663 723 | 9 252 212 | 106 |
| D-42 | 663 787 | 9 254 455 | 113 |
| D-43 | 660 954 | 9 256 133 | 138 |
| D-44 | 665 423 | 9 252 665 | 115 |
| D-45 | 668 232 | 9 253 637 | 140 |
| D-46 | 666 446 | 9 255 038 | 115 |
| D-47 | 666 408 | 9 255 985 | 131 |
| D-48 | 668 194 | 9 255 954 | 125 |
| D-49 | 669 883 | 9 255 462 | 143 |
| D-50 | 668 402 | 9 256 902 | 127 |
| D-51 | 669 455 | 9 256 905 | 132 |
| D-52 | 670 126 | 9 256 764 | 131 |
| D-53 | 669 908 | 9 257 499 | 135 |
| D-54 | 668 016 | 9 258 449 | 148 |
| D-55 | 668 895 | 9 258 450 | 133 |
| D-56 | 668 973 | 9 260 131 | 151 |
| D-57 | 670 372 | 9 259 083 | 133 |
| D-58 | 670 710 | 9 258 819 | 141 |
| D-59 | 670 838 | 9 259 086 | 136 |
| D-60 | 671 363 | 9 259 098 | 148 |
| D-61 | 671 579 | 9 259 276 | 146 |
| D-62 | 671 752 | 9 259 292 | 148 |
| D-63 | 673 167 | 9 259 408 | 167 |
| D-64 | 673 299 | 9 259 155 | 165 |
| D-65 | 674 191 | 9 258 828 | 172 |
| D-66 | 674 470 | 9 259 362 | 190 |
| D-67 | 671 144 | 9 260 096 | 144 |
| D-68 | 671 650 | 9 260 050 | 144 |
| D-69 | 671 846 | 9 260 294 | 146 |
| D-70 | 672 241 | 9 260 378 | 151 |
| D-71 | 673 560 | 9 261 296 | 157 |
| D-72 | 674397  | 9 261 942 | 165 |
| D-73 | 680 018 | 9 257 823 | 236 |
| D-74 | 675 846 | 9 263 204 | 177 |
| D-75 | 675 717 | 9 263 294 | 175 |
| D-76 | 677 621 | 9 262 663 | 206 |
| D-77 | 674 870 | 9 264 944 | 193 |
| D-78 | 672 820 | 9 268 810 | 205 |
| D-79 | 674 021 | 9 268 299 | 208 |
| D-80 | 676 349 | 9 266 873 | 195 |

|      |         |           |     |
|------|---------|-----------|-----|
| D-81 | 675 940 | 9 265 900 | 190 |
| D-82 | 679 624 | 9 264 206 | 203 |
| D-83 | 679 888 | 9 263 673 | 210 |
| D-84 | 680 215 | 9 263 014 | 226 |
| D-85 | 680 590 | 9 263 896 | 211 |
| D-86 | 681 020 | 9 264 943 | 214 |
| D-87 | 681 991 | 9 264 989 | 222 |
| D-88 | 682 790 | 9 265 347 | 226 |
| D-89 | 684 506 | 9 265 493 | 242 |
| D-90 | 686 084 | 9 266 062 | 274 |
| D-91 | 685 429 | 9 267 465 | 272 |
| D-92 | 681 754 | 9 271 149 | 276 |
| D-93 | 677 876 | 9 268 732 | 221 |
| D-94 | 678 177 | 9 270 439 | 242 |
| D-95 | 680 905 | 9 270 854 | 261 |
| D-96 | 680 947 | 9 270 835 | 264 |
| D-97 | 680 395 | 9 272 856 | 286 |
| D-98 | 674 993 | 9 271 601 | 249 |
| D-99 | 674 095 | 9 276 098 | 324 |

Fuente: Elaboración propia

Es importante resaltar que el mapeo de susceptibilidad a las inundaciones se considera una clasificación binaria en la que el índice de inundación se divide en dos clases, es decir, inundación y no inundación. (Tehrany, Jones, & Shabani, 2019) Por lo tanto, para preparar los datos del inventario de inundaciones se asignaron valores a cada muestra: 1 (inundación) y 0 (no inundación).

En el caso de las muestras de no inundación, se seleccionó el mismo número de puntos que las muestras de inundación, tomando como criterio que se encuentren ubicados en zonas que no reúnen las condiciones favorables para la ocurrencia de inundaciones, tales como su ubicación en un alta pendiente, la lejanía al río, entre otros respecto a los parámetros considerados en la presente investigación.

Los puntos de inundación y no inundación se convirtieron a píxeles (30 m x 30 m) para poder superponerse con los factores condicionantes y desencadenantes a fin de constituir el conjunto de datos definitivo.

Por lo general, el 70% de las muestras son destinadas a entrenar el modelo y el resto se utiliza para la validación. (Taalab, Cheng, & Zhang,

2018). En la presente investigación, las muestras de entrenamiento y validación son 140 y 58 respectivamente.

## **4.2. Construcción y validación de los modelos de predicción**

### **4.2.1. Modelo de predicción mediante el Proceso de Análisis Jerárquico - AHP**

El desarrollo del método AHP se desarrolló a través del Software ArcGIS para el análisis espacial de los parámetros; el software Microsoft Excel, para el cálculo de la consistencia de las variables, y del lenguaje de programación R para la etapa de validación de los resultados obtenidos, mediante la curva ROC.

#### **4.2.1.1. Determinación de las prioridades de los factores**

##### **Método de las comparaciones pareadas**

La preparación de pares se da a partir de la identificación de los parámetros que permitan caracterizar la ocurrencia de inundaciones, los cuales se han considerado para la presente investigación.

- Precipitación
- Geología
- Distancia al río
- Suelos
- Uso actual del suelo
- Pendiente

Para el proceso AHP, es necesario comparar la mayor importancia que posee un parámetro en relación al otro (Saaty, 1980). Este análisis determinó la importancia que representa cada uno de los factores para la ocurrencia de inundaciones en el área de estudio. Esta comparación fue cuantificada en relación a la Escala de asignación de pesos (importancia) y su interpretación de Saaty. (Saaty, 1980)

**Tabla 16:** Escala de asignación de pesos

| Extremo | Menos importante |        |          | Igualmente importante |          | Más importante |            |         |
|---------|------------------|--------|----------|-----------------------|----------|----------------|------------|---------|
|         | Muy fuerte       | Fuerte | Moderado | Igual importancia     | Moderado | Fuerte         | Muy fuerte | Extremo |
| 1/9     | 1/7              | 1/5    | 1/3      | 1                     | 3        | 5              | 7          | 9       |

Fuente: Saaty (1980)

Donde se establece que la comparación de cada par de parámetros radica en cuán importante es el primer parámetro enunciado en relación al segundo.

Se procedió a realizar la comparación de pares a partir de las unidades de cada parámetro, en base a la escala proporcionada por Saaty. Diferenciando así a las unidades que favorecen más a las inundaciones

### Análisis y cálculo de la prioridad general

En esta etapa se desarrolló las comparaciones pareadas entre los seis factores considerados en la presente investigación. A través de experiencia y referencia de investigaciones previas, se realizó el análisis de importancia entre pares (Tabla 17), el cual fue jerarquizado de acuerdo a la escala de asignación de pesos (Tabla 16) propuesto por Saaty.

**Tabla 17:** Comparación de pares de los factores

|                                           | Conclusión                                                                                                        | Valor |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| <b>Pendiente vs. Distancia al río</b>     | El factor pendiente es <b>igualmente importante - moderado</b> en comparación que el factor distancia al río.     | 3     |
| <b>Pendiente vs. Precipitación</b>        | El factor pendiente es <b>igualmente importante - moderado</b> en comparación con el factor precipitación.        | 3     |
| <b>Pendiente vs. Geología</b>             | El factor pendiente es <b>más importante - fuerte</b> en comparación con el factor geología.                      | 5     |
| <b>Pendiente vs. Suelos</b>               | El factor pendiente es <b>más importante - muy fuerte</b> en comparación con el factor suelos.                    | 7     |
| <b>Pendiente vs. Uso Actual de Suelos</b> | El factor pendiente es <b>más importante - extremo</b> en comparación con el factor uso actual de suelos.         | 9     |
| <b>Distancia al río vs. Precipitación</b> | El factor distancia al río es <b>igualmente importante - moderado</b> en comparación con el factor precipitación. | 3     |

|                                           |                                                                                                                                       |   |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| Distancia al río vs. Geología             | El factor distancia al río es <b>igualmente importante - moderado</b> en comparación con el factor geología.                          | 3 |
| Distancia al río vs. Suelos               | El factor distancia al río es <b>más importante - fuerte</b> en comparación con el factor suelos.                                     | 5 |
| Distancia al río vs. Uso actual de suelos | El factor distancia al río es <b>más importante - muy fuerte</b> en comparación con el factor uso actual de suelos.                   | 7 |
| Precipitación vs. Geología                | El factor precipitación es <b>igualmente importante - moderado</b> en comparación con el factor geología.                             | 3 |
| Precipitación vs. Suelos                  | Los suelos son <b>igualmente importante - moderado</b> que la precipitación para la generación de inundaciones                        | 3 |
| Precipitación vs. Uso actual de suelos    | La es <b>más importante, de fuerte</b> que el tipo de suelo para la generación de inundaciones.                                       | 5 |
| Geología vs. Suelos                       | La geología influye de manera <b>igualmente importante - moderado</b> que el uso actual de suelos para la generación de inundaciones. | 3 |
| Geología vs. Uso actual de suelos         | El factor de uso actual de suelos influye <b>igualmente importante - moderado</b> que los suelos para la generación de inundaciones.  | 3 |
| Suelos vs. Uso actual del Suelo           | El factor suelos es <b>igualmente importante - moderado</b> que el uso actual de suelos en la ocurrencia de inundaciones              | 3 |

Fuente: Elaboración propia

Dicho análisis de pares fue plasmado en la matriz de comparación de pares, donde se plasma a manera matricial los valores asignados a cada par, es allí donde se realiza los cálculos respectivos para el proceso de importancia de cada factor

**Tabla 18:** Matriz de comparaciones pareadas de los factores

| Parámetros           | Pendiente | Distancia al río | Precipitación | Geología | Suelos | Uso actual de suelos |
|----------------------|-----------|------------------|---------------|----------|--------|----------------------|
| Pendiente            | 1         | 3                | 3             | 5        | 7      | 9                    |
| Distancia al río     | 1/3       | 1                | 3             | 3        | 5      | 7                    |
| Precipitación        | 1/3       | 1/3              | 1             | 3        | 3      | 5                    |
| Geología             | 1/5       | 1/3              | 1/3           | 1        | 3      | 3                    |
| Suelos               | 1/7       | 1/5              | 1/3           | 1/3      | 1      | 3                    |
| Uso actual de suelos | 1/9       | 1/7              | 1/5           | 1/3      | 1/3    | 1                    |
| SUMA                 | 2,12      | 5,00             | 7,87          | 12,67    | 19,33  | 28                   |

Fuente: Elaboración propia

Luego se procedió a realizar la matriz de comparaciones normalizada, la cual se determina con la división de cada valor con el total de su columna. Una vez obtenido los valores, se calcula el promedio de cada fila; los valores obtenidos generan un vector de pesos relativos. Este vector nos indica la importancia de cada factor respecto a la susceptibilidad ante las inundaciones.

**Tabla 19:** Matriz de comparaciones normalizada

|                      |      |      |      |      |      |      | Pesos relativos | Puestos |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|-----------------|---------|
| Pendiente            | 0,47 | 0,60 | 0,38 | 0,40 | 0,36 | 0,32 | 0,42            | 1       |
| Distancia al río     | 0,16 | 0,20 | 0,38 | 0,24 | 0,26 | 0,25 | 0,25            | 2       |
| Precipitación        | 0,16 | 0,07 | 0,13 | 0,24 | 0,16 | 0,18 | 0,15            | 3       |
| Geología             | 0,09 | 0,07 | 0,04 | 0,08 | 0,16 | 0,11 | 0,09            | 4       |
| Suelos               | 0,07 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,05 | 0,11 | 0,06            | 5       |
| Uso actual de suelos | 0,05 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,04 | 0,03            | 6       |
|                      |      |      |      |      |      |      | 1               |         |

Nota: Los valores han sido redondeados a dos decimales para su representación en la presente tabla.

Fuente: Elaboración propia.

El orden de la importancia de cada factor se determina del mayor al menor valor, como bien se puede apreciar en la Tabla 19, se obtuvo que el valor más importante es la pendiente, al tener un peso relativo de 0,42, mientras que el de menor importancia es el uso actual de suelos con un factor de 0,03.

### **Consistencia**

Una vez que se ha determinado el orden de la importancia de los factores, es necesario determinar la consistencia de los mismos, es por ello que Saaty, menciona la necesidad de realizar un análisis de consistencia, a fin de comprobar que los valores obtenidos sean representativos al análisis que se realiza.

Este tratamiento consiste en realizar el producto de la matriz de comparaciones pareadas con la matriz de pesos relativos. Este cálculo se presenta en la Tabla 20.

**Tabla 20:** Cálculo de producto matricial de matrices de comparaciones pareadas y matriz de pesos relativos.

| Parámetro            | Cálculo                                                               | Resultado |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| Pendiente            | $1(0,42) + 3(0,25) + 3(0,15) + 5(0,09) + 7(0,06) + 9(0,03)$           | 2,75      |
| Distancia al río     | $1/3(0,42) + 1(0,25) + 3(0,15) + 3(0,09) + 5(0,06) + 7(0,03)$         | 1,62      |
| Precipitación        | $1/3(0,42) + 1/3(0,25) + 1(0,15) + 3(0,09) + 3(0,06) + 5(0,03)$       | 0,97      |
| Geología             | $1/5(0,42) + 1/3(0,25) + 1/3(0,15) + 1(0,09) + 3(0,06) + 3(0,03)$     | 0,57      |
| Suelos               | $1/7(0,42) + 1/5(0,25) + 1/3(0,15) + 1/3(0,09) + 1(0,06) + 3(0,03)$   | 0,34      |
| Uso actual de suelos | $1/9(0,42) + 1/7(0,25) + 1/5(0,15) + 1/3(0,09) + 1/3(0,06) + 1(0,03)$ | 0,19      |

Nota: Los valores han sido redondeados a dos decimales para su representación en la presente tabla.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos, dividen a los pesos relativos que se obtuvieron en la Tabla 19 para así obtener a los vectores de consistencia (Saaty, 1990).

**Tabla 21:** Cálculo del vector de consistencia.

| Parámetro            | Cálculo     | Vector de consistencia |
|----------------------|-------------|------------------------|
| Pendiente            | $2,75/0,42$ | 6,51                   |
| Distancia al río     | $1,62/0,25$ | 6,54                   |
| Precipitación        | $0,97/0,15$ | 6,32                   |
| Geología             | $0,57/0,09$ | 6,27                   |
| Suelos               | $0,34/0,06$ | 6,09                   |
| Uso actual de suelos | $0,19/0,03$ | 6,23                   |
|                      | $\lambda$   | 6,33                   |

Nota: Los valores han sido redondeados a dos decimales para su representación en la presente tabla.

Fuente: Elaboración propia.

El promedio de los vectores de consistencia nos resulta de 6,33 como se señala en la Tabla 21. Nuestro valor “n” es 6 por la cantidad de parámetros que se han considerado, por lo que se realiza el cálculo del IC.

$$IC = \frac{6,33 - 6}{6 - 1} = 0,065302 \quad (14)$$

Ya habiendo obtenido nuestro índice de consistencia, se procede a calcular el Radio de consistencia, el cual es obtenido mediante la relación entre el índice de consistencia, con el índice aleatorio (IA), el cual depende de la cantidad de parámetros usados. Este valor ya está predefinido por Saaty (1980), que corresponde a un valor de 1,252.

$$RC = \frac{IC}{IA} = \frac{0,065302}{1,252} = 0,052158 \quad (15)$$

Según Saaty (1980), al ser este valor obtenido menor que 0,1, muestra una representación consistente de los pesos obtenidos para cada parámetro utilizado, denotando a su vez razonabilidad entre la comparación de pares que se realizó de manera intrínseca en la Tabla 18.

Una vez obtenido los “pesos” de los factores, se procede a realizar la jerarquización de cada una de las unidades que integra cada factor considerado. El procedimiento es el mismo realizado como en el anterior caso según el proceso del AHP.

#### **4.2.1.2. Determinación de las prioridades de unidades de los factores**

##### **Análisis y cálculo de las prioridades de las unidades geológicas**

La geología se comprende doce unidades en el área de estudio, presentándose en la Tabla 22 la matriz de comparaciones pareadas.

**Tabla 22:** Matriz de comparaciones pareadas de las unidades geológicas.

|                           | Río  | Represa | Depósito Fluvio aluvial | Depósito Fluvial reciente | Depósito aluvial | Depósito coluvial | Depósito marino reciente | Depósito Eólico reciente | Tablazo Talara | Área Urbana | Depósito aluvial antiguo | Roca  |
|---------------------------|------|---------|-------------------------|---------------------------|------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|----------------|-------------|--------------------------|-------|
| Río                       | 1    | 2       | 3                       | 3                         | 3                | 3                 | 5                        | 5                        | 5              | 5           | 7                        | 9     |
| Represa                   | 1/2  | 1       | 2                       | 3                         | 3                | 3                 | 3                        | 5                        | 5              | 5           | 5                        | 7     |
| Depósito fluvio-aluvial   | 1/3  | 1/2     | 1                       | 2                         | 3                | 3                 | 3                        | 3                        | 5              | 5           | 5                        | 5     |
| Depósito fluvial reciente | 1/3  | 1/3     | 1/2                     | 1                         | 2                | 3                 | 3                        | 3                        | 3              | 5           | 5                        | 5     |
| Depósito aluvial          | 1/3  | 1/3     | 1/3                     | 1/2                       | 1                | 2                 | 3                        | 3                        | 3              | 3           | 5                        | 5     |
| Depósito coluvial         | 1/3  | 1/3     | 1/3                     | 1/3                       | 1/2              | 1                 | 2                        | 3                        | 3              | 3           | 3                        | 5     |
| Depósito marino reciente  | 1/5  | 1/3     | 1/3                     | 1/3                       | 1/3              | 1/2               | 1                        | 2                        | 3              | 3           | 3                        | 3     |
| Depósito Eólico reciente  | 1/5  | 1/5     | 1/3                     | 1/3                       | 1/3              | 1/3               | 1/2                      | 1                        | 2              | 3           | 3                        | 3     |
| Tablazo Talara            | 1/5  | 1/5     | 1/5                     | 1/3                       | 1/3              | 1/3               | 1/3                      | 1/2                      | 1              | 2           | 3                        | 3     |
| Área Urbana               | 1/5  | 1/5     | 1/5                     | 1/5                       | 1/3              | 1/3               | 1/3                      | 1/3                      | 1/2            | 1           | 2                        | 3     |
| Depósito aluvial antiguo  | 1/7  | 1/5     | 1/5                     | 1/5                       | 1/5              | 1/3               | 1/3                      | 1/3                      | 1/3            | 1/2         | 1                        | 2     |
| Roca                      | 1/9  | 1/7     | 1/5                     | 1/5                       | 1/5              | 1/5               | 1/3                      | 1/3                      | 1/3            | 1/3         | 1/2                      | 1     |
| SUMA                      | 3,89 | 5,78    | 8,63                    | 11,43                     | 14,23            | 17,03             | 21,83                    | 26,50                    | 31,17          | 35,83       | 42,50                    | 51,00 |

Fuente: Elaboración propia.

Consecutivamente se procedió a realizar la matriz de comparaciones normalizada a partir de la división entre los valores de la matriz con la suma total de su respectiva columna; resultando así los pesos que corresponde a cada unidad, y consecuentemente la importancia de cada uno en relación del mayor al menor valor obtenido.

**Tabla 23:** Matriz de comparaciones normalizada para las unidades geológicas

| Unidades Geológicas       | Pesos relativos | Puestos |
|---------------------------|-----------------|---------|
| Río                       | 0,22            | 1       |
| Represa                   | 0,17            | 2       |
| Depósito fluvio - aluvial | 0,13            | 3       |
| Depósito fluvial reciente | 0,11            | 4       |
| Depósito aluvial          | 0,09            | 5       |
| Depósito coluvial         | 0,07            | 6       |
| Depósito marino reciente  | 0,06            | 7       |
| Depósito eólico reciente  | 0,04            | 8       |
| Tablazo Talara            | 0,04            | 9       |
| Área Urbana               | 0,03            | 10      |
| Depósito aluvial antiguo  | 0,02            | 11      |
| Roca                      | 0,02            | 12      |
|                           | 1               |         |

Nota: Los valores han sido redondeados a dos decimales para su representación en la presente tabla.

Fuente: Elaboración propia.

### Consistencia

La consistencia de la importancia obtenida se determinó calculando el producto de la matriz de comparaciones pareadas con la matriz de pesos relativos. Este cálculo se presenta en la Tabla 24.

**Tabla 24:** Cálculo de producto matricial de matrices de comparaciones pareadas y matriz de pesos relativos de las unidades geológicas

| Unidades geológicas       | Cálculo                                                                                                                       | Resultado |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Río                       | $1(0,22) + 2(0,17) + 3(0,13) + 3(0,11) + 3(0,09) + 3(0,07) + 5(0,06) + 5(0,04) + 5(0,04) + 5(0,03) + 7(0,02) + 9(0,02)$       | 2,95      |
| Represa                   | $1/2(0,22) + 1(0,17) + 2(0,13) + 3(0,11) + 3(0,09) + 3(0,07) + 3(0,06) + 5(0,04) + 5(0,04) + 5(0,03) + 5(0,02) + 7(0,02)$     | 2,33      |
| Depósito fluvio - aluvial | $1/3(0,22) + 1/2(0,17) + 1(0,13) + 2(0,11) + 3(0,09) + 3(0,07) + 3(0,06) + 3(0,04) + 5(0,04) + 5(0,03) + 5(0,02) + 5(0,02)$   | 1,84      |
| Depósito fluvial reciente | $1/3(0,22) + 1/3(0,17) + 1/2(0,13) + 1(0,11) + 2(0,09) + 3(0,07) + 3(0,06) + 3(0,04) + 3(0,04) + 5(0,03) + 5(0,02) + 5(0,02)$ | 1,48      |

| Unidades geológicas      | Cálculo                                                                                                                                       | Resultado |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Depósito aluvial         | $1/3(0,22) + 1/3(0,17) + 1/3(0,13) + 1/2(0,11) + 1(0,09) + 2(0,07) + 3(0,06) + 3(0,04) + 3(0,04) + 3(0,03) + 5(0,02) + 5(0,02)$               | 1,18      |
| Depósito coluvial        | $1/3(0,22) + 1/3(0,17) + 1/3(0,13) + 1/3(0,11) + 1/2(0,09) + 1(0,07) + 2(0,06) + 3(0,04) + 3(0,04) + 3(0,03) + 3(0,02) + 5(0,02)$             | 0,94      |
| Depósito marino reciente | $1/5(0,22) + 1/3(0,17) + 1/3(0,13) + 1/3(0,11) + 1/3(0,09) + 1/2(0,07) + 1(0,06) + 2(0,04) + 3(0,04) + 3(0,03) + 3(0,02) + 3(0,02)$           | 0,72      |
| Depósito eólico reciente | $1/5(0,22) + 1/5(0,17) + 1/3(0,13) + 1/3(0,11) + 1/3(0,09) + 1/3(0,07) + 1/2(0,06) + 1(0,04) + 2(0,04) + 3(0,03) + 3(0,02) + 3(0,02)$         | 0,58      |
| Tablazo Talara           | $1/5(0,22) + 1/5(0,17) + 1/5(0,13) + 1/3(0,11) + 1/3(0,09) + 1/3(0,07) + 1/3(0,06) + 1/2(0,04) + 1(0,04) + 2(0,03) + 3(0,02) + 3(0,02)$       | 0,47      |
| Área urbana              | $1/5(0,22) + 1/5(0,17) + 1/5(0,13) + 1/5(0,11) + 1/3(0,09) + 1/3(0,07) + 1/3(0,06) + 1/3(0,04) + 1/2(0,04) + 1(0,03) + 2(0,02) + 3(0,02)$     | 0,37      |
| Depósito aluvial antiguo | $1/7(0,22) + 1/5(0,17) + 1/5(0,13) + 1/5(0,11) + 1/5(0,09) + 1/3(0,07) + 1/3(0,06) + 1/3(0,04) + 1/3(0,04) + 1/2(0,03) + 1(0,02) + 2(0,02)$   | 0,28      |
| Roca                     | $1/9(0,22) + 1/7(0,17) + 1/5(0,13) + 1/5(0,11) + 1/5(0,09) + 1/5(0,07) + 1/3(0,06) + 1/3(0,04) + 1/3(0,04) + 1/3(0,03) + 1/2(0,02) + 1(0,02)$ | 0,22      |

Nota: Los valores han sido redondeados a dos decimales para su representación en la presente tabla.

Fuente: Elaboración propia.

Luego se realizó la división de los resultados obtenidos en la Tabla 24, con los pesos relativos obtenidos para así obtener a los vectores de consistencia.

**Tabla 25:** Cálculo del vector de consistencia.

| Unidades geológicas       | Cálculo   | Vector de consistencia |
|---------------------------|-----------|------------------------|
| Río                       | 2,95/0,22 | 13,32                  |
| Represa                   | 2,33/0,17 | 13,56                  |
| Depósito fluvio aluvial   | 1,84/0,13 | 13,69                  |
| Depósito fluvial reciente | 1,48/0,11 | 13,57                  |
| Depósito aluvial          | 1,18/0,09 | 13,40                  |
| Depósito coluvial         | 0,94/0,07 | 13,09                  |
| Depósito marino reciente  | 0,72/0,06 | 13,15                  |
| Depósito eólico reciente  | 0,58/0,04 | 13,03                  |
| Tablazo Talara            | 0,47/0,04 | 12,93                  |
| Área urbana               | 0,37/0,03 | 12,73                  |
| Depósito aluvial antiguo  | 0,28/0,02 | 11,32                  |
| Roca                      | 0,22/0,02 | 13,02                  |
|                           | $\lambda$ | 13,07                  |

Nota: Los valores han sido redondeados a dos decimales para su representación en la presente tabla.

Fuente: Elaboración propia.

Realizando el cálculo de del índice de consistencia:

$$IC = \frac{13,07 - 12}{12 - 1} = 0,097061 \quad (16)$$

Y así calculando el radio de consistencia:

$$RC = \frac{IC}{IA} = \frac{0,097061}{1,535} = 0,063232 \quad (17)$$

Al ser este valor menor a 0,1, se demuestra la consistencia de las comparaciones pareadas y así, de la importancia obtenida de cada unidad geológica.

### **Análisis y cálculo de las prioridades de las unidades taxonómicas del suelo**

El área de estudio comprende once unidades taxonómicas del suelo, presentándose en la Tabla 26 la matriz de comparaciones pareadas.

**Tabla 26:** Matriz de comparaciones pareadas de las unidades taxonómicas del suelo.

|                      | Misceláneo cauce | Cambisols | Misceláneo litoral | Regosols | Yermosols | Fluvisols | Solonetz | Gypsisols | Arenosols | Misceláneo antrópico | Miscelánea roca |
|----------------------|------------------|-----------|--------------------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------------------|-----------------|
| Misceláneo cauce     | 1                | 3         | 3                  | 3        | 5         | 5         | 5        | 7         | 7         | 7                    | 9               |
| Cambisols            | 1/3              | 1         | 3                  | 3        | 3         | 5         | 5        | 5         | 7         | 7                    | 7               |
| Misceláneo litoral   | 1/3              | 1/3       | 1                  | 3        | 3         | 3         | 5        | 5         | 5         | 7                    | 7               |
| Regosols             | 1/3              | 1/3       | 1/3                | 1        | 3         | 3         | 3        | 5         | 5         | 5                    | 7               |
| Yermosols            | 1/5              | 1/3       | 1/3                | 1/3      | 1         | 3         | 3        | 3         | 5         | 5                    | 5               |
| Fluvisols            | 1/5              | 1/5       | 1/3                | 1/3      | 1/3       | 1         | 3        | 3         | 3         | 5                    | 5               |
| Solonetz             | 1/5              | 1/5       | 1/5                | 1/3      | 1/3       | 1/3       | 1        | 3         | 3         | 3                    | 5               |
| Gypsisols            | 1/7              | 1/5       | 1/5                | 1/5      | 1/3       | 1/3       | 1/3      | 1         | 3         | 3                    | 3               |
| Arenosols            | 1/7              | 1/7       | 1/5                | 1/5      | 1/5       | 1/3       | 1/3      | 1/3       | 1         | 3                    | 3               |
| Misceláneo antrópico | 1/7              | 1/7       | 1/7                | 1/5      | 1/5       | 1/5       | 1/3      | 1/3       | 1/3       | 1                    | 3               |
| Miscelánea roca      | 1/9              | 1/7       | 1/7                | 1/7      | 1/5       | 1/5       | 1/5      | 1/3       | 1/3       | 1/3                  | 1               |
| SUMA                 | 3,14             | 6,03      | 8,89               | 11,74    | 16,6      | 21,4      | 26,2     | 33,0      | 39,67     | 46,33                | 55,00           |

Nota: Los valores han sido redondeados a dos decimales para su representación en la presente tabla.

Fuente: Elaboración propia.

Consecutivamente se procedió a realizar la matriz de comparaciones normalizada a partir de la división entre los valores de la matriz con la suma total de su respectiva columna; resultando así los pesos que corresponde a cada unidad, y consecuentemente la importancia de cada uno en relación del mayor al menor valor obtenido.

**Tabla 27:** Matriz de comparaciones normalizada para las unidades taxonómicas del suelo.

| Unidades de suelo    | Pesos relativos | Puestos |
|----------------------|-----------------|---------|
| Misceláneo Cauce     | 0,26            | 1       |
| Cambisols            | 0,19            | 2       |
| Misceláneo Litoral   | 0,14            | 3       |
| Regosols             | 0,11            | 4       |
| Yermosols            | 0,08            | 5       |
| Fluvisols            | 0,06            | 6       |
| Solonetzs            | 0,05            | 7       |
| Gypsisols            | 0,04            | 8       |
| Arenosols            | 0,03            | 9       |
| Misceláneo antrópico | 0,02            | 10      |
| Misceláneo roca      | 0,01            | 11      |

Nota: Los valores han sido redondeados a dos decimales para su representación en la presente tabla.

Fuente: Elaboración propia.

### Consistencia

La consistencia de la importancia obtenida se determinó calculando el producto de la matriz de comparaciones pareadas con la matriz de pesos relativos. Este cálculo se presenta en la Tabla 28.

**Tabla 28:** Cálculo de producto matricial de matrices de comparaciones pareadas y matriz de pesos relativos de las unidades del suelo

| Unidades de suelo  | Cálculo                                                                                                               | Resultado |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Misceláneo Cauce   | $1(0,26) + 3(0,19) + 3(0,15) + 3(0,11) + 5(0,08) + 5(0,06) + 5(0,05) + 7(0,04) + 7(0,03) + 7(0,02) + 9(0,01)$         | 3,30      |
| Cambisols          | $1/3(0,26) + 1(0,19) + 3(0,15) + 3(0,11) + 3(0,08) + 5(0,06) + 5(0,05) + 5(0,04) + 7(0,03) + 7(0,02) + 7(0,01)$       | 2,49      |
| Misceláneo Litoral | $1/3(0,26) + 1/3(0,19) + 1(0,15) + 3(0,11) + 3(0,08) + 3(0,06) + 5(0,05) + 5(0,04) + 5(0,03) + 7(0,02) + 7(0,01)$     | 1,86      |
| Regosols           | $1/3(0,26) + 1/3(0,19) + 1/3(0,15) + 1(0,11) + 3(0,08) + 3(0,06) + 3(0,05) + 5(0,04) + 5(0,03) + 5(0,02) + 7(0,01)$   | 1,42      |
| Yermosols          | $1/5(0,26) + 1/3(0,19) + 1/3(0,15) + 1/3(0,11) + 1(0,08) + 3(0,06) + 3(0,05) + 3(0,04) + 5(0,03) + 5(0,02) + 5(0,01)$ | 1,05      |

| Unidades de suelo    | Cálculo                                                                                                                           | Resultado |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Fluvisols            | $1/5(0,26) + 1/5(0,19) + 1/3(0,15) + 1/3(0,11) + 1/3(0,08) + 1(0,06) + 3(0,05) + 3(0,04) + 3(0,03) + 5(0,02) + 5(0,01)$           | 0,78      |
| Solonetz             | $1/5(0,26) + 1/5(0,19) + 1/5(0,15) + 1/3(0,11) + 1/3(0,08) + 1/3(0,06) + 1(0,05) + 3(0,04) + 3(0,03) + 3(0,02) + 5(0,01)$         | 0,58      |
| Gypsisols            | $1/7(0,26) + 1/5(0,19) + 1/5(0,15) + 1/5(0,11) + 1/3(0,08) + 1/3(0,06) + 1/3(0,05) + 1(0,04) + 3(0,03) + 3(0,02) + 3(0,01)$       | 0,42      |
| Arenosols            | $1/7(0,26) + 1/7(0,19) + 1/5(0,15) + 1/5(0,11) + 1/5(0,08) + 1/3(0,06) + 1/3(0,05) + 1/3(0,04) + 1(0,03) + 3(0,02) + 3(0,01)$     | 0,32      |
| Misceláneo antrópico | $1/7(0,26) + 1/7(0,19) + 1/7(0,15) + 1/5(0,11) + 1/5(0,08) + 1/5(0,06) + 1/3(0,05) + 1/3(0,04) + 1/3(0,03) + 1(0,02) + 3(0,01)$   | 0,24      |
| Miscelánea roca      | $1/9(0,26) + 1/7(0,19) + 1/7(0,15) + 1/7(0,11) + 1/5(0,08) + 1/5(0,06) + 1/5(0,05) + 1/3(0,04) + 1/3(0,03) + 1/3(0,02) + 1(0,01)$ | 0,17      |

Nota: Los valores han sido redondeados a dos decimales para su representación en la presente tabla.

Fuente: Elaboración propia.

Luego se realizó la división de los resultados obtenidos en la Tabla 28 con los pesos relativos para así obtener a los vectores de consistencia.

**Tabla 29:** Cálculo del vector de consistencia.

| Unidades de suelo    | Cálculo                     | Vector de consistencia |
|----------------------|-----------------------------|------------------------|
| Misceláneo Cauce     | 3,30/0,26                   | 12,80                  |
| Cambisols            | 2,49/0,19                   | 13,17                  |
| Misceláneo Litoral   | 1,89/0,15                   | 12,99                  |
| Regosols             | 1,42/0,11                   | 12,71                  |
| Yermosols            | 1,05/0,08                   | 12,59                  |
| Fluvisols            | 0,78/0,06                   | 12,14                  |
| Solonetz             | 0,58/0,05                   | 11,73                  |
| Gypsisols            | 0,42/0,04                   | 11,71                  |
| Arenosols            | 0,32/0,03                   | 11,45                  |
| Misceláneo antrópico | 0,24/0,02                   | 11,37                  |
| Misceláneo roca      | 0,17/0,01                   | 11,98                  |
|                      | <b><math>\lambda</math></b> | <b>12,24</b>           |

Nota: Los valores han sido redondeados a dos decimales para su representación en la presente tabla.

Fuente: Elaboración propia.

Realizando el cálculo de del índice de consistencia:

$$IC = \frac{12,24 - 11}{11 - 1} = 0,123941 \quad (18)$$

Y así calculando el radio de consistencia:

$$RC = \frac{IC}{IA} = \frac{0,123941}{1,513} = 0,081917 \quad (19)$$

Al ser este valor menor a 0,1, se demuestra la consistencia de las comparaciones pareadas y así, de la importancia obtenida de cada unidad de suelo.

### **Análisis y cálculo de las prioridades de las unidades de uso actual de suelos**

El área de estudio comprende nueve unidades taxonómicas del suelo, presentándose en la Tabla 30 la matriz de comparaciones pareadas

**Tabla 30:** Matriz de comparaciones pareadas de las unidades de uso actual de suelos

|                                             | Aguas continentales | Áreas húmedas costeras | Áreas urbanizadas | Áreas industriales y de infraestructura | Cultivos transitorios | Áreas agrícolas heterogéneas | Áreas con vegetación herbácea 7/o arbustiva | Cultivos permanentes | Bosques |
|---------------------------------------------|---------------------|------------------------|-------------------|-----------------------------------------|-----------------------|------------------------------|---------------------------------------------|----------------------|---------|
| Aguas continentales                         | 1                   | 2                      | 3                 | 3                                       | 5                     | 7                            | 7                                           | 9                    | 9       |
| Áreas húmedas costeras                      | 1/2                 | 1                      | 2                 | 3                                       | 3                     | 5                            | 7                                           | 7                    | 9       |
| Áreas urbanizadas                           | 1/3                 | 1/2                    | 1                 | 2                                       | 3                     | 3                            | 5                                           | 7                    | 7       |
| Áreas industriales y de infraestructura     | 1/3                 | 1/3                    | 1/2               | 1                                       | 2                     | 3                            | 3                                           | 5                    | 7       |
| Cultivos transitorios                       | 1/5                 | 1/3                    | 1/3               | 1/2                                     | 1                     | 2                            | 3                                           | 3                    | 5       |
| Áreas agrícolas heterogéneas                | 1/7                 | 1/5                    | 1/3               | 1/3                                     | 1/2                   | 1                            | 2                                           | 3                    | 3       |
| Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva | 1/7                 | 1/7                    | 1/5               | 1/3                                     | 1/3                   | 1/2                          | 1                                           | 2                    | 3       |
| Cultivos permanentes                        | 1/9                 | 1/7                    | 1/7               | 1/5                                     | 1/3                   | 1/3                          | 1/2                                         | 1                    | 2       |
| Bosques                                     | 1/9                 | 1/9                    | 1/7               | 1/7                                     | 1/5                   | 1/3                          | 1/3                                         | 1/2                  | 1       |
| SUMA                                        | 2,87                | 4,76                   | 7,65              | 10,51                                   | 15,37                 | 22,17                        | 28,83                                       | 37,5                 | 46      |

Nota: Los valores han sido redondeados a dos decimales para su representación en la presente tabla.

Fuente: Elaboración propia.

Consecutivamente se procedió a realizar la matriz de comparaciones normalizada a partir de la división entre los valores de la matriz con la suma total de su respectiva columna; resultando así los pesos que corresponde a cada unidad, y consecuentemente la importancia de cada uno en relación del mayor al menor valor obtenido.

**Tabla 31:** Matriz de comparaciones normalizada para las unidades de uso actual del suelo.

| Unidades de uso actual de suelos            | Pesos relativos | Puestos |
|---------------------------------------------|-----------------|---------|
| Aguas continentales                         | 0,31            | 1       |
| Áreas húmedas costeras                      | 0,22            | 2       |
| Áreas urbanizadas                           | 0,15            | 3       |
| Áreas industriales y de infraestructura     | 0,11            | 4       |
| Cultivos transitorios                       | 0,08            | 5       |
| Áreas agrícolas heterogéneas                | 0,05            | 6       |
| Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva | 0,04            | 7       |
| Cultivos permanentes                        | 0,03            | 8       |
| Bosques                                     | 0,02            | 9       |

Nota: Los valores han sido redondeados a dos (2) decimales para su representación en la presente tabla.

Fuente: Elaboración propia.

### Consistencia

La consistencia de la importancia obtenida se determinó calculando el producto de la matriz de comparaciones pareadas con la matriz de pesos relativos. Este cálculo se presenta en la Tabla 32.

**Tabla 32:** Cálculo de producto matricial de matrices de comparaciones pareadas y matriz de pesos relativos de las unidades taxonómicas del suelo

| Unidades de uso actual de suelo         | Cálculo                                                                                           | Resultado |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Aguas continentales                     | $1(0,31) + 2(0,22) + 3(0,15) + 3(0,11) + 5(0,08) + 7(0,05) + 7(0,04) + 9(0,03) + 9(0,02)$         | 2,94      |
| Áreas húmedas costeras                  | $1/2(0,31) + 1(0,22) + 2(0,15) + 3(0,11) + 3(0,08) + 5(0,05) + 7(0,04) + 7(0,03) + 9(0,02)$       | 2,10      |
| Áreas urbanizadas                       | $1/3(0,31) + 1/2(0,22) + 1(0,15) + 2(0,11) + 3(0,08) + 3(0,05) + 5(0,04) + 7(0,03) + 7(0,02)$     | 1,46      |
| Áreas industriales y de infraestructura | $1/3(0,31) + 1/3(0,22) + 1/2(0,15) + 1(0,11) + 2(0,08) + 3(0,05) + 3(0,04) + 5(0,03) + 7(0,02)$   | 1,04      |
| Cultivos transitorios                   | $1/5(0,31) + 1/3(0,22) + 1/3(0,15) + 1/2(0,11) + 1(0,08) + 2(0,05) + 3(0,04) + 3(0,03) + 5(0,02)$ | 0,70      |

| Unidades de uso actual de suelo             | Cálculo                                                                                                   | Resultado |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Áreas agrícolas heterogéneas                | $1/7(0,31) + 1/5(0,22) + 1/3(0,15) + 1/3(0,11) + 1/2(0,08) + 1(0,05) + 2(0,04) + 3(0,03) + 3(0,02)$       | 0,47      |
| Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva | $1/7(0,31) + 1/7(0,22) + 1/5(0,15) + 1/3(0,11) + 1/3(0,08) + 1/2(0,05) + 1(0,04) + 2(0,03) + 3(0,02)$     | 0,34      |
| Cultivos permanentes                        | $1/9(0,31) + 1/7(0,22) + 1/7(0,15) + 1/5(0,11) + 1/3(0,08) + 1/3(0,05) + 1/2(0,04) + 1(0,03) + 2(0,02)$   | 0,23      |
| Bosques                                     | $1/9(0,31) + 1/9(0,22) + 1/7(0,15) + 1/7(0,11) + 1/5(0,08) + 1/3(0,05) + 1/3(0,04) + 1/2(0,03) + 1(0,02)$ | 0,17      |

Nota: Los valores han sido redondeados a dos decimales para su representación en la presente tabla.

Fuente: Elaboración propia.

Luego se realizó la división de los resultados obtenidos en la Tabla 32 con los pesos relativos para así obtener a los vectores de consistencia.

**Tabla 33:** Cálculo del vector de consistencia.

| Unidades de uso actual de suelo             | Cálculo   | Vector de consistencia |
|---------------------------------------------|-----------|------------------------|
| Aguas continentales                         | 2,94/0,31 | 9,56                   |
| Áreas húmedas costeras                      | 2,11/0,22 | 9,58                   |
| Áreas urbanizadas                           | 1,46/0,15 | 9,52                   |
| Áreas industriales y de infraestructura     | 1,04/0,11 | 9,34                   |
| Cultivos transitorios                       | 0,70/0,08 | 9,30                   |
| Áreas agrícolas heterogéneas                | 0,47/0,05 | 9,26                   |
| Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva | 0,34/0,04 | 9,09                   |
| Cultivos permanentes                        | 0,23/0,03 | 9,12                   |
| Bosques                                     | 0,17/0,02 | 9,19                   |
|                                             | $\lambda$ | 9,33                   |

Nota: Los valores han sido redondeados a dos decimales para su representación en la presente tabla.

Fuente: Elaboración propia.

Realizando el cálculo de del índice de consistencia:

$$IC = \frac{9,33 - 9}{9 - 1} = 0,041187 \quad (20)$$

Y así calculando el radio de consistencia:

$$RC = \frac{IC}{IA} = \frac{0,041187}{1,452} = 0,028366 \quad (21)$$

Al ser este valor menor a 0,1, se demuestra la consistencia de las comparaciones pareadas y así, de la importancia obtenida de cada unidad de uso actual de suelo.

## Análisis y cálculo de las prioridades de la pendiente

El área de estudio fue clasificada en siete rangos de pendiente, presentándose en la Tabla 34 la matriz de comparaciones pareadas.

**Tabla 34:** Matriz de comparaciones pareadas de los rangos de pendiente

| Rangos de pendiente | [0 -4> % | [4 - 8> % | [8 -15> % | [15 -25> % | [25 - 50> % | [50 - 75> % | >75 % |
|---------------------|----------|-----------|-----------|------------|-------------|-------------|-------|
| [0 -4> %            | 1        | 3         | 3         | 5          | 5           | 7           | 9     |
| [4 - 8> %           | 1/3      | 1         | 3         | 3          | 5           | 5           | 7     |
| [8 -15> %           | 1/3      | 1/3       | 1         | 3          | 5           | 5           | 7     |
| [15 -25> %          | 1/5      | 1/3       | 1/3       | 1          | 3           | 3           | 5     |
| [25 - 50> %         | 1/5      | 1/5       | 1/5       | 1/3        | 1           | 3           | 3     |
| [50 - 75> %         | 1/7      | 1/5       | 1/5       | 1/3        | 1/3         | 1           | 3     |
| >75 %               | 1/9      | 1/7       | 1/7       | 1/5        | 1/3         | 1/3         | 1     |
| <b>SUMA</b>         | 2,32     | 5,21      | 7,88      | 12,87      | 19,67       | 24,33       | 35    |

Nota: Los valores han sido redondeados a dos decimales para su representación en la presente tabla.

Fuente: Elaboración propia

Consecutivamente se procedió a realizar la matriz de comparaciones normalizada a partir de la división entre los valores de la matriz con la suma total de su respectiva columna; resultando así los pesos que corresponde a cada unidad, y consecuentemente la importancia de cada uno en relación del mayor al menor valor obtenido.

**Tabla 35:** Matriz de comparaciones normalizada para las unidades de uso actual del suelo.

| Rangos de pendiente | Pesos relativos | Puestos |
|---------------------|-----------------|---------|
| [0 -4> %            | 0,37            | 1       |
| [4 - 8> %           | 0,23            | 2       |
| [8 -15> %           | 0,18            | 3       |
| [15 -25> %          | 0,10            | 4       |
| [25 - 50> %         | 0,06            | 5       |
| [50 - 75> %         | 0,04            | 6       |
| >75 %               | 0,02            | 7       |

Nota: Los valores han sido redondeados a dos decimales para su representación en la presente tabla.

Fuente: Elaboración propia.

## Consistencia

La consistencia de la importancia obtenida se determinó calculando el producto de la matriz de comparaciones pareadas con la matriz de pesos relativos. Este cálculo se presenta en la Tabla 36.

**Tabla 36:** Cálculo de producto matricial de matrices de comparaciones pareadas y matriz de pesos relativos de las unidades del suelo.

| Rangos de pendiente | Cálculo                                                                           | Resultado |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| [0 -4> %            | $1(0,37) + 3(0,23) + 3(0,18) + 5(0,10) + 5(0,06) + 7(0,04) + 9(0,02)$             | 2,90      |
| [4 - 8> %           | $1/3(0,37) + 1(0,23) + 3(0,18) + 3(0,10) + 5(0,06) + 5(0,04) + 7(0,02)$           | 1,86      |
| [8 -15> %           | $1/3(0,37) + 1/3(0,23) + 1(0,18) + 3(0,10) + 5(0,06) + 5(0,04) + 7(0,02)$         | 1,36      |
| [15 -25> %          | $1/5(0,37) + 1/3(0,23) + 1/3(0,18) + 1(0,10) + 3(0,06) + 3(0,04) + 5(0,02)$       | 0,74      |
| [25 - 50> %         | $1/5(0,37) + 1/5(0,23) + 1/5(0,18) + 1/3(0,10) + 1(0,06) + 3(0,04) + 3(0,02)$     | 0,45      |
| [50 - 75> %         | $1/7(0,37) + 1/5(0,23) + 1/5(0,18) + 1/3(0,10) + 1/3(0,06) + 1(0,04) + 3(0,02)$   | 0,30      |
| >75 %               | $1/9(0,37) + 1/7(0,23) + 1/7(0,18) + 1/5(0,10) + 1/3(0,06) + 1/3(0,04) + 1(0,02)$ | 0,18      |

Nota: Los valores han sido redondeados a dos decimales para su representación en la presente tabla.

Fuente: Elaboración propia.

Luego se realizó la división de los resultados obtenidos en la Tabla 36 con los pesos relativos para así obtener a los vectores de consistencia.

**Tabla 37:** Cálculo del vector de consistencia.

| Rangos de pendiente | Cálculo     | Vector de consistencia |
|---------------------|-------------|------------------------|
| [0 -4> %            | $2,90/0,37$ | 7,88                   |
| [4 - 8> %           | $1,86/0,23$ | 8,11                   |
| [8 -15> %           | $1,36/0,18$ | 7,76                   |
| [15 -25> %          | $0,74/0,10$ | 7,52                   |
| [25 - 50> %         | $0,45/0,06$ | 7,20                   |
| [50 - 75> %         | $0,30/0,04$ | 7,15                   |
| >75 %               | $0,18/0,02$ | 7,38                   |
|                     | $\lambda$   | 7,57                   |

Nota: Los valores han sido redondeados a dos decimales para su representación en la presente tabla.

Fuente: Elaboración propia.

Realizando el cálculo de del índice de consistencia:

$$IC = \frac{7,57 - 7}{7 - 1} = 0,095193 \quad (22)$$

Y así calculando el radio de consistencia:

$$RC = \frac{IC}{IA} = \frac{0,095193}{1,341} = 0,070920 \quad (23)$$

Al ser este valor menor a 0,1, se demuestra la consistencia de las comparaciones pareadas y así, de la importancia obtenida de cada unidad de pendiente.

### Análisis y cálculo de las prioridades de la distancia al río

El área de estudio fue clasificada en cinco rangos de distancia al río, presentándose en la Tabla 38 la matriz de comparaciones pareadas.

**Tabla 38:** Matriz de comparaciones pareadas de los rangos de distancia al río

| Rangos de Distancia al río | <20  | 20-100 | 100-500 | 500-1000 | >1000 |
|----------------------------|------|--------|---------|----------|-------|
| < a 20                     | 1    | 3      | 5       | 7        | 9     |
| [20 - 100>                 | 1/3  | 1      | 3       | 5        | 7     |
| [100 - 500>                | 1/5  | 1/3    | 1       | 3        | 5     |
| [500 - 1000>               | 1/7  | 1/5    | 1/3     | 1        | 3     |
| > a 1000]                  | 1/9  | 1/7    | 1/5     | 1/3      | 1     |
| SUMA                       | 1,79 | 4,68   | 9,53    | 16,33    | 25    |

Nota: Los valores han sido redondeados a dos decimales para su representación en la presente tabla.

Fuente: Elaboración propia

Consecutivamente se procedió a realizar la matriz de comparaciones normalizada a partir de la división entre los valores de la matriz con la suma total de su respectiva columna; resultando así los pesos que corresponde a cada unidad, y consecuentemente la importancia de cada uno en relación del mayor al menor valor obtenido.

**Tabla 39:** Matriz de comparaciones normalizada para las distancias de río

| Rangos de Distancia al río | Pesos relativos | Puestos |
|----------------------------|-----------------|---------|
| < a 20                     | 0,50            | 1       |
| [20 – 100>                 | 0,26            | 2       |
| [100 – 500>                | 0,13            | 3       |
| [500 – 1000>               | 0,07            | 4       |
| > a 1000]                  | 0,03            | 5       |

Nota: Los valores han sido redondeados a dos decimales para su representación en la presente tabla.

Fuente: Elaboración propia.

### Consistencia

La consistencia de la importancia obtenida se determinó calculando el producto de la matriz de comparaciones pareadas con la matriz de pesos relativos. Este cálculo se presenta en la Tabla 40.

**Tabla 40:** Cálculo de producto matricial de matrices de comparaciones pareadas y matriz de pesos relativos de los rangos de distancia al río.

| Clases de distancia al río | Cálculo                                                   | Resultado |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------|
| < a 20                     | $1(0,50) + 3(0,26) + 5(0,13) + 7(0,07) + 9(0,03)$         | 2,74      |
| [20 – 100>                 | $1/3(0,26) + 1(0,26) + 3(0,13) + 5(0,07) + 7(0,03)$       | 1,41      |
| [100 – 500>                | $1/5(0,13) + 1/3(0,26) + 1(0,13) + 3(0,07) + 5(0,03)$     | 0,70      |
| [500 – 1000>               | $1/7(0,07) + 1/5(0,26) + 1/3(0,13) + 1(0,07) + 3(0,03)$   | 0,34      |
| > a 1000]                  | $1/9(0,03) + 1/7(0,26) + 1/5(0,13) + 1/3(0,07) + 1(0,03)$ | 0,18      |

Nota: Los valores han sido redondeados a dos decimales para su representación en la presente tabla.

Fuente: Elaboración propia.

Luego se realizó la división de los resultados obtenidos en la Tabla 40 con los pesos relativos para así obtener a los vectores de consistencia.

**Tabla 41:** Cálculo del vector de consistencia.

| Parámetro    | Cálculo   | Vector de consistencia |
|--------------|-----------|------------------------|
| < a 20       | 2,74/0,50 | 5,46                   |
| [20 – 100>   | 1,41/0,26 | 5,43                   |
| [100 – 500>  | 0,70/0,13 | 5,20                   |
| [500 – 1000> | 0,34/0,07 | 5,03                   |
| > a 1000]    | 0,18/0,03 | 5,09                   |
|              | $\lambda$ | 5,24                   |

Nota: Los valores han sido redondeados a dos decimales para su representación en la presente tabla.

Fuente: Elaboración propia.

Realizando el cálculo de del índice de consistencia:

$$IC = \frac{5,24 - 5}{5 - 1} = 0,060652 \quad (24)$$

Y así calculando el radio de consistencia:

$$RC = \frac{IC}{IA} = \frac{0,060652}{1,115} = 0,054396 \quad (25)$$

Al ser este valor menor a 0,1, se demuestra la consistencia de las comparaciones pareadas y así, de la importancia obtenida de cada clase de unidad de río.

## Análisis y cálculo de las prioridades de la precipitación

El área de estudio fue clasificada en seis rangos de precipitación, presentándose en la Tabla 42 la matriz de comparaciones pareadas.

**Tabla 42:** Matriz de comparaciones pareadas de la precipitación

|               | > a 500] | [400-500> | [300-400> | [300-400> | [100-200> | [27,48 - 100> |
|---------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| > a 500]      | 1        | 2         | 3         | 5         | 7         | 9             |
| [400-500>     | 1/2      | 1         | 2         | 3         | 5         | 7             |
| [300-400>     | 1/3      | 1/2       | 1         | 2         | 3         | 5             |
| [200-300>     | 1/5      | 1/3       | 1/2       | 1         | 2         | 3             |
| [100-200>     | 1/7      | 1/5       | 1/3       | 1/2       | 1         | 2             |
| [27.48 - 100> | 1/9      | 1/7       | 1/5       | 1/3       | 1/2       | 1             |
| SUMA          | 2,29     | 4,18      | 7,03      | 11,83     | 18,5      | 27            |

Nota: Los valores han sido redondeados a dos decimales para su representación en la presente tabla.

Fuente: Elaboración propia

Consecutivamente se procedió a realizar la matriz de comparaciones normalizada a partir de la división entre los valores de la matriz con la suma total de su respectiva columna; resultando así los pesos que corresponde a cada unidad, y consecuentemente la importancia de cada uno en relación del mayor al menor valor obtenido.

**Tabla 43:** Matriz de comparaciones normalizada para la precipitación

| Rangos de precipitación | Pesos relativos | Puestos |
|-------------------------|-----------------|---------|
| > a 500]                | 0,41            | 1       |
| [400-500>               | 0,25            | 2       |
| [300-400>               | 0,15            | 3       |
| [200-300>               | 0,09            | 4       |
| [100-200>               | 0,05            | 5       |
| [27.48 – 100>           | 0,03            | 6       |

Nota: Los valores han sido redondeados a dos decimales para su representación en la presente tabla.

Fuente: Elaboración propia.

### *Consistencia*

La consistencia de la importancia obtenida se determinó calculando el producto de la matriz de comparaciones pareadas con la matriz de pesos relativos. Este cálculo se presenta en la Tabla 44.

**Tabla 44:** Cálculo de producto matricial de matrices de comparaciones pareadas y matriz de pesos relativos de las unidades precipitación.

| Rangos de precipitación | Cálculo                                                               | Resultado |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| > a 500]                | $1(0,41) + 2(0,25) + 3(0,15) + 5(0,09) + 7(0,05) + 9(0,03)$           | 2,52      |
| [400-500>               | $1/2(0,41) + 1(0,25) + 2(0,15) + 3(0,09) + 5(0,05) + 7(0,03)$         | 1,55      |
| [300-400>               | $1/3(0,41) + 1/2(0,25) + 1(0,15) + 2(0,09) + 3(0,05) + 5(0,03)$       | 0,93      |
| [200-300>               | $1/5(0,41) + 1/3(0,25) + 1/2(0,15) + 1(0,09) + 2(0,05) + 3(0,03)$     | 0,55      |
| [100-200>               | $1/7(0,41) + 1/5(0,25) + 1/3(0,15) + 1/2(0,09) + 1(0,05) + 2(0,03)$   | 0,33      |
| [27.48 – 100>           | $1/9(0,41) + 1/7(0,25) + 1/5(0,15) + 1/3(0,09) + 1/2(0,05) + 1(0,03)$ | 0,20      |

Nota: Los valores han sido redondeados a dos decimales para su representación en la presente tabla.

Fuente: Elaboración propia.

Luego se realizó la división de los resultados obtenidos en la Tabla 44 con los pesos relativos para así obtener a los vectores de consistencia.

**Tabla 45:** Cálculo del vector de consistencia.

| Rangos de precipitación | Cálculo   | Vector de consistencia |
|-------------------------|-----------|------------------------|
| > a 500]                | 2,52/0,41 | 6,11                   |
| [400-500>               | 1,55/0,25 | 6,10                   |
| [300-400>               | 0,93/0,15 | 6,06                   |
| [200-300>               | 0,55/0,09 | 6,04                   |
| [100-200>               | 0,33/0,05 | 6,01                   |
| [27.48 - 100>           | 0,20/0,03 | 6,03                   |
|                         | $\lambda$ | 6,06                   |

Nota: Los valores han sido redondeados a dos decimales para su representación en la presente tabla.

Fuente: Elaboración propia.

Realizando el cálculo de del índice de consistencia:

$$IC = \frac{6,06 - 6}{6 - 1} = 0,011639 \quad (26)$$

Y así calculando el radio de consistencia:

$$RC = \frac{IC}{IA} = \frac{0,011639}{1,252} = 0,009296 \quad (27)$$

Al ser este valor menor a 0,1, se demuestra la consistencia de las comparaciones pareadas y así, de la importancia obtenida de cada rango de precipitación.

#### 4.2.1.3. Determinación del mapa de susceptibilidad

Según Adiat et al. (2012), se debe usar el método de combinación lineal ponderada para estimar el índice de susceptibilidad de inundación (FSPI). Este método generalmente se especifica en términos de ponderaciones normalizadas para cada parámetro, así como las tasas normalizadas para todas las opciones relativas a cada uno de los criterios. La utilidad final  $U$  para cada opción  $O_i$  se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$U(O_i) = \sum_{R=1}^{R=n} Z_R(O_i) \times W(C_R) \quad (28)$$

donde  $Z_R(O_i)$  es la tasa normalizada de opción  $O_i$  bajo el criterio  $C_R$ , y  $W(C_R)$  es la ponderación normalizada para cada criterio  $C_R$ .

Reemplazar el lado izquierdo (LHS) de la Ecuación 28 con FSPI y el derecho lado (RHS) a ser reemplazado con la suma de los productos de los pesos normalizados (W) y clasificaciones normalizadas (NR) de cada parámetro, el FSPI para cada celda se calculó utilizando la Ecuación 29.

$$FSPI_i = Sp_w Sp_{NR} + Sl_w Sl_{NR} + LS_w LS_{NR} + Dr_w Dr_{NR} + G_w G_{NR} + Pp_w Pp_{NR} \quad (29)$$

Donde:

*Sp = Pendiente*

*Sl = Suelo*

*LS = Uso de suelo*

*Dr = Distancia al río*

*G = Geología*

*Pp = Precipitación*

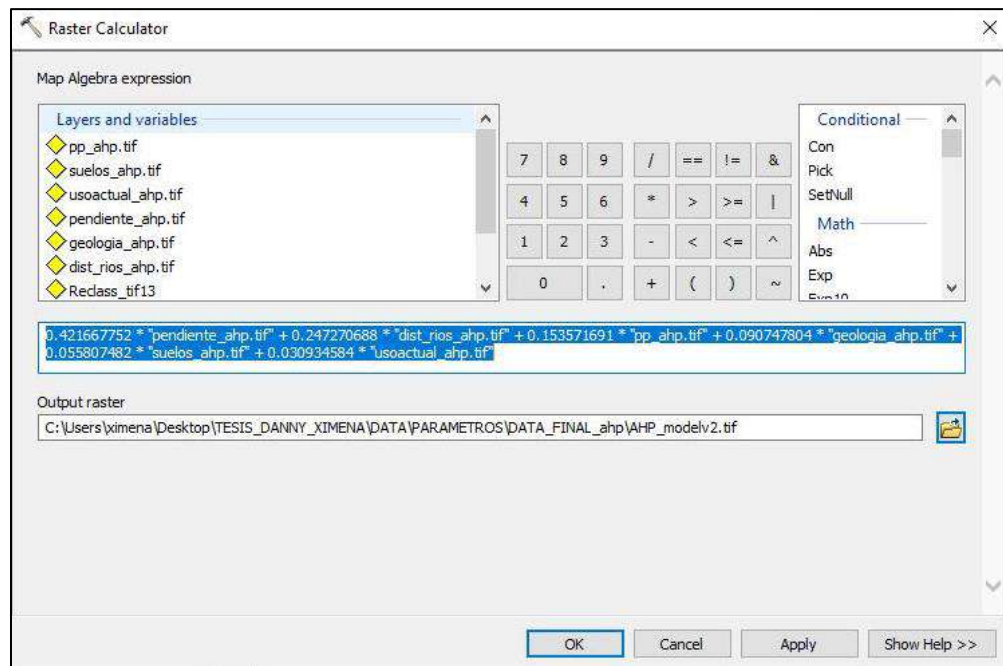
A partir de lo mencionado al ya tener determinado los pesos normalizados de las unidades de los seis factores, y a su vez tenemos los pesos normalizados entre los mismos, será necesaria realizar la aplicación del método de superposición de mapas mediante los SIG.

Este proceso se realizó con apoyo del ArcGIS; con la inclusión de cada uno de los factores. Cada factor en formato ráster con una resolución de 30 m x 30 m, contiene en su tabla de atributos el peso normalizado que se determinó para cada una de sus unidades.

Posteriormente se realizó la superposición de los factores considerando los pesos de cada uno de ellos. Esta etapa se hizo posible mediante la herramienta de Raster calculator, donde se realizó la suma ponderada de los factores, estos últimos multiplicados por sus pesos. (ver Figura 18)

$$IS = 0,421667752 * pendiente + 0,247270688 * distancia al río + 0,153571691 * precipitación + 0,090747804 * geología + 0,055807482 * suelos + 0,030934584 * uso actual de suelo \quad (30)$$

**Figura 18:** Cálculo de la suma ponderada



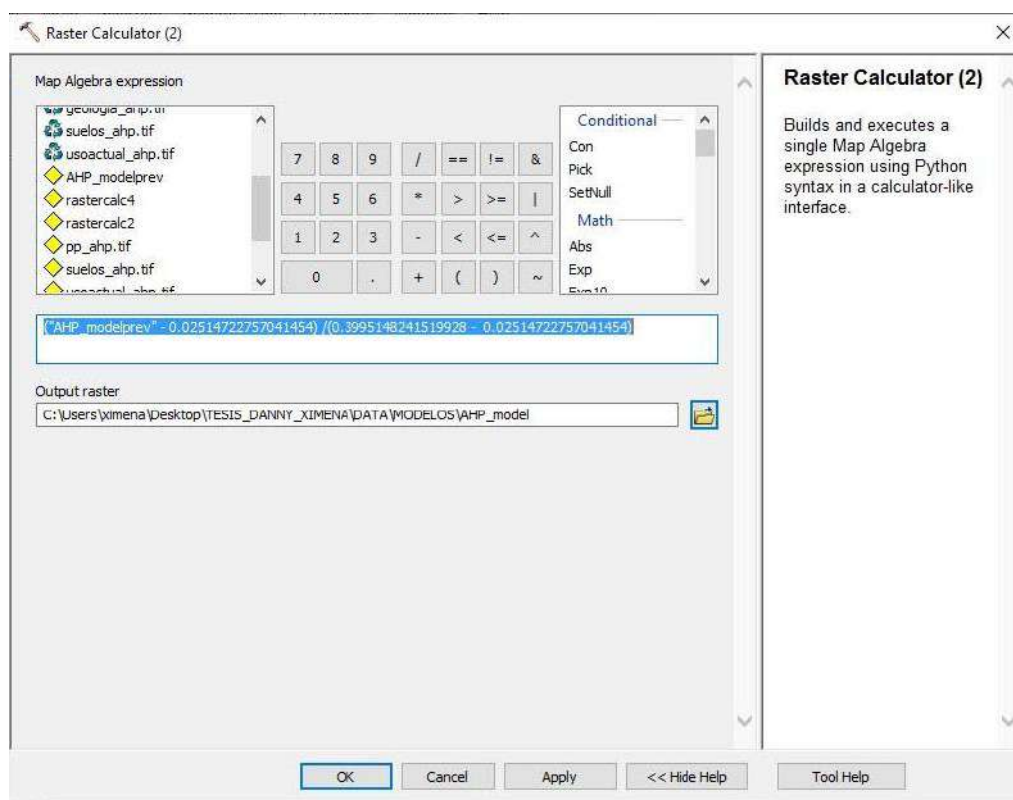
Fuente: Elaboración propia.

### *Normalización del modelo*

El modelo resultado producto de la superposición de los factores a partir del cálculo de la suma ponderada, nos arroja valores de susceptibilidad comprendidos entre 0,025147 y 0,399515.

Posteriormente, se realizó la normalización para dichos valores del 0 al 1 (ver Figura 19), siendo el 0 un escenario de no susceptibilidad y el 1, de susceptibilidad muy alta.

**Figura 19:** Normalización



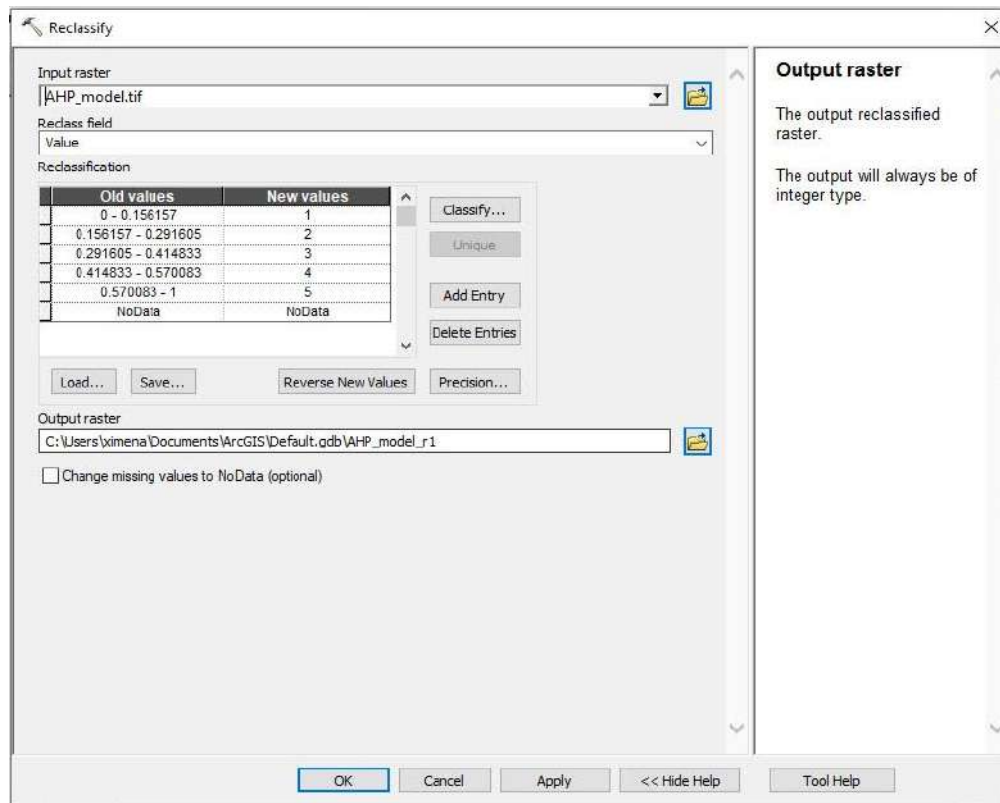
Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se realizó la clasificación mediante el método de rupturas naturales o *natural breaks*, el cual se basa en agrupaciones naturales inherentes a los datos. Estos se caracterizan porque agrupan mejor los valores similares y maximizan las diferencias entre clases. Las entidades se dividen en clases cuyos límites quedan establecidos dónde hay diferencias considerables entre los valores de los datos. (ESRI, s.f.)

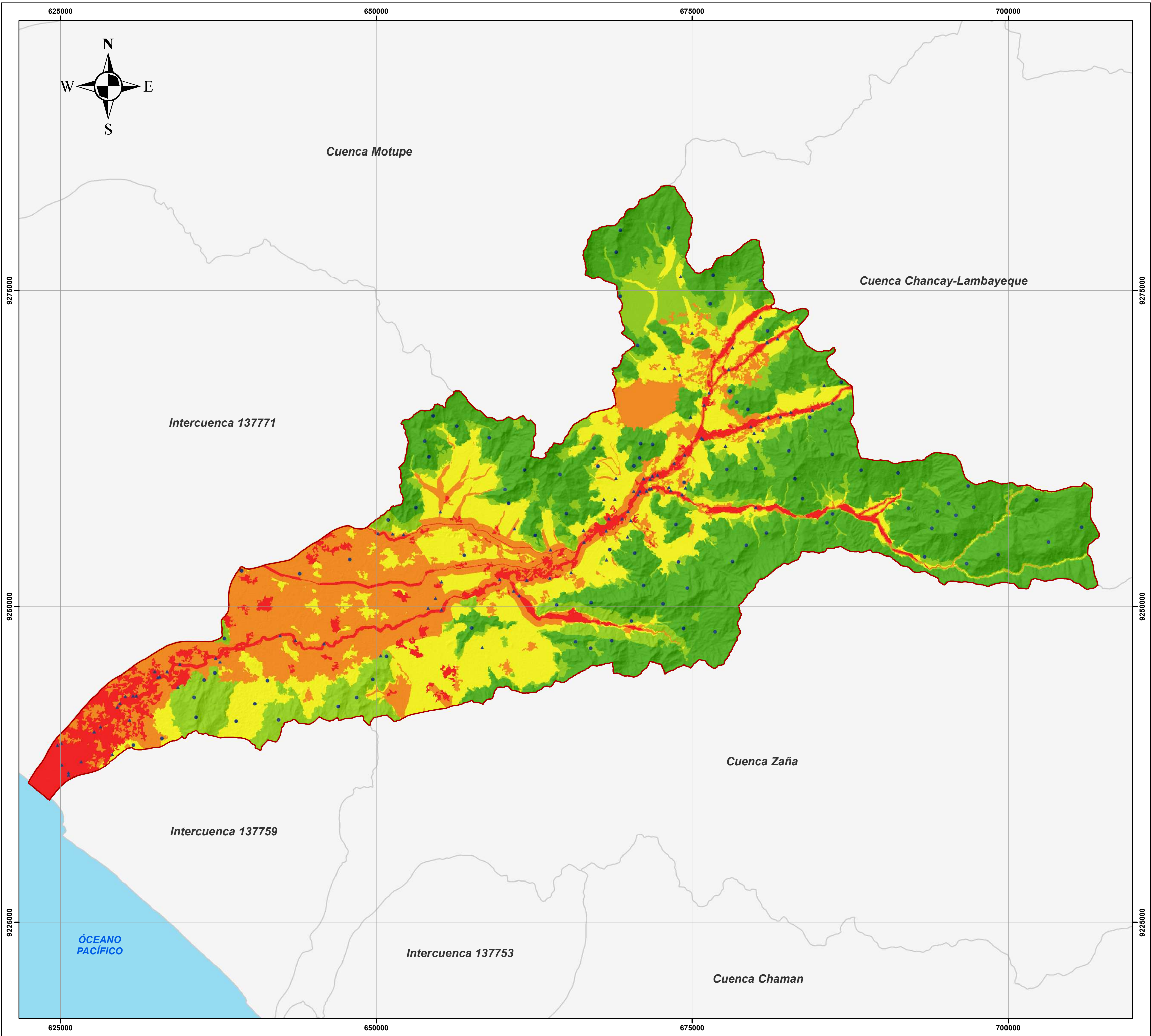
A partir de esta premisa, se utilizó la herramienta *reclassify* desde el software ArcGIS (ver Figura 20).

De esta manera se generó el mapa final de susceptibilidad ante inundaciones mediante el método AHP, el cual se adjunta en el Mapa A.

**Figura 20:** Clasificación de la susceptibilidad



Fuente: Elaboración propia.



UBICACIÓN GENERAL

**SIGNOS CONVENCIONALES**

Cuencas hidrográficas

Área de estudio

**Inventario de inundaciones**

Inundación

No inundación

**NIVEL DE SUSCEPTIBILIDAD**

Muy baja

Baja

Media

Alta

Muy alta





**UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS**  
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA

*Determinación de zonas susceptibles a inundaciones y análisis comparativo del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y Random Forest (RF).  
Caso estudio: Cuenca baja del río Chancay-Lambayeque*

**MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A INUNDACIONES - PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO**

|                                                      |                                       |                                |             |
|------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|-------------|
| <b>Elaborado:</b><br>Danny Anchelía<br>Ximena Mori   | <b>Proyección:</b><br>UTM Zona 17 Sur | <b>Escala:</b><br>1:200 000    | <b>MAPA</b> |
| <b>Fuente:</b><br>IGN, INEI, ANA,<br>GORE Lambayeque | <b>DATUM:</b><br>WGS 84               | <b>Fecha:</b><br>Febrero, 2020 | <b>A</b>    |

## 4.2.2. Modelo de predicción mediante Random Forest

Para el procesamiento del modelo de predicción mediante Random Forest se utilizó el lenguaje de programación R tanto en la etapa de entrenamiento como la validación, la cual se detallará a continuación:

### 4.2.2.1. Entrenamiento

**Primero:** Se deberá instalar diversas librerías entre ellas, *randomforest*. Dicha librería es usada para la clasificación y la regresión basada en un bosque de árboles utilizando entradas aleatorias, planteadas por Breiman (Liaw & Wiener, 2018).

**Figura 21:** Librerías instaladas

```
## Librerías
library(randomForest)
library(sp)
library(lattice)
library(latticeExtra)
library(RColorBrewer)
library(leaflet)
library(raster)
library(rgdal)
library(rasterVis)
library(caret)
```

Fuente: Elaboración propia

**Segundo:** Mediante la librería *raster*, llamamos a los factores; cuando estos son de resolución y extensiones comunes, en lugar de trabajar con cada ráster de forma independiente, es mucho más eficiente concatenarlos todos en un solo objeto, lo cual se puede realizar mediante la función *stack*. (P. Malone, Minasny, & McBratney, 2017)

**Figura 22:** Llamado de factores

```
#Llamar a los factores

setwd("C:/Users/ximena/Desktop/TESIS_DANNY_XIMENA/DATA/PARAMETROS/DATA_FINAL")

DISTANCIA_RIOS=raster("distancia_rio.tif")
GEOLOGIA=raster("geologia.tif")
PENDIENTE=raster("pendiente.tif")
PRECIPITACION=raster("precip.tif")
SUELOS=raster("suelos.tif")
USO_ACTUAL=raster("uso_actual.tif")

PARAMETROS=stack(DISTANCIA_RIOS,GEOLOGIA,PENDIENTE, PRECIPITACION, SUELOS,USO_ACTUAL)
```

Fuente: Elaboración propia

**Tercero:** Se instala previamente la librería *rgdal* a fin de poder utilizar la función *readOGR* que nos permite importar archivos vectoriales en objetos espaciales. Dicha función es utilizada para importar el

inventario de inundaciones y no inundaciones. Posteriormente, se rasterizan las muestras del inventario mediante la función *rasterize*, la cual transfiere los valores asociados a los datos espaciales como puntos, líneas y polígonos a celdas rásters.

**Figura 23:** Inserción del inventario

```
#Generar el inventario de inundaciones y no inundaciones  
  
#Cargar el inventario  
inventario <- readOGR("C:/Users/ximena/Desktop/TESIS_DANNY_XIMENA/DATA/INVENTARIO/  
inventario3.shp")  
  
#Convertir las muestras a formato raster  
invent<- rasterize(inventario, PARAMETROS, field='INUND')
```

Fuente: Elaboración propia

**Cuarto:** Se utiliza la función *stack* para concatenar los rásters de los factores y del inventario de inundaciones y al hacer uso de la función *values* se convierte los valores de RasterLayer en una matriz, donde las filas representan las celdas y las columnas, las capas. Después, se procede a eliminar los “sin datos” (NA).

A continuación, se convierte la matriz a un *data frame* mediante la función *as.data.frame* y convierte la clase de referencia (el inventario de inundaciones) en una variable de categoría mediante la función *factor*.

**Figura 24:** Generación de la tabla de valores

```
#Generamos la tabla de valores  
invent.df <- na.omit(values(stack(invent,PARAMETROS)))  
tabVAL <- as.data.frame(invent.df)  
tabVAL$layer <- factor(tabVAL$layer)
```

Fuente: Elaboración propia

**Quinto:** Para dividir los datos en la muestra de entrenamiento (70% del total) y otra de validación (30% del total) se usa la función *createDataPartition* de la librería *caret*. Previamente, se establece un valor arbitrario o semilla como punto de partida para que los resultados sean replicables utilizando *set.seed*.

**Figura 25:** Creación de índice aleatorio

```
#Crear índice aleatorio para la selección de filas en cada ronda  
set.seed(43)  
inTrain <- createDataPartition(tabVAL$layer, p=0.7, list=F)  
training <- tabVAL[inTrain,]  
testing <- tabVAL[-inTrain,]
```

Fuente: Elaboración propia

**Sexto:** La función *randomForest* implementa el algoritmo Random Forest propuesto por Breiman basado en el código original en Fortran elaborado por Breiman y Cutler's tanto para clasificación como regresión (Liaw & Wiener, 2018).

$$\text{randomForest}(\text{formula}, \text{data}) \quad (31)$$

Donde:

- *formula* = Fórmula que describe las variables predictoras y de respuesta.
- *data* = Datos de las muestras de entrenamiento

Los parámetros de ajuste del modelo a considerar son el número de árboles para construir (*ntree*), el número de variables que se muestrean aleatoriamente como candidatos en cada división de árbol de decisión (*mtry*), entre otros (P. Malone, Minasny, & McBratney, 2017). Sin embargo, en la presente investigación, dichos parámetros no serán modificados y solo permanecerán los predeterminados, los cuales son *ntree* = 500 y *mtry* = 2. El valor predeterminado de *mtry* es la raíz del número de variables predictoras (Liaw & Wiener, 2002).

La función *print* permite evaluar rápidamente el ajuste del modelo entre los datos.

Asimismo, la función *importance* extrae la medición de la importancia de las variables (Liaw & Wiener, 2018)

La función *plot.randomForest* grafica las tasas de error o el error cuadrático medio (MSE) del modelo resultante.

**Figura 26:** Calibración de Random Forest

```
#Calibrar el clasificador random forest
INUND.RF.Exp <- randomForest(layer~ ., data = training[,c(1:7)])

print(INUND.RF.Exp)

importance(INUND.RF.Exp)

varImpPlot(INUND.RF.Exp,type=2, main = "Importancia de los factores")

plot(INUND.RF.Exp, main = "Tasa de error (OOB) de random forest")
```

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 28, se presenta la tasa de error del OOB, en función de los número de árboles considerados, donde se puede evidenciar que el error disminuye a medida que se incrementa el número de árbol y la tasa de error obtenida en el modelo es de 7,14 %.

A partir de la función varImpPlot se grafica el orden de importancia de los factores (ver Figura 29), donde se observa que el factor pendiente tiene una notable mayor importancia en la generación del modelo, a diferencia del factor precipitación que es el de menor importancia.

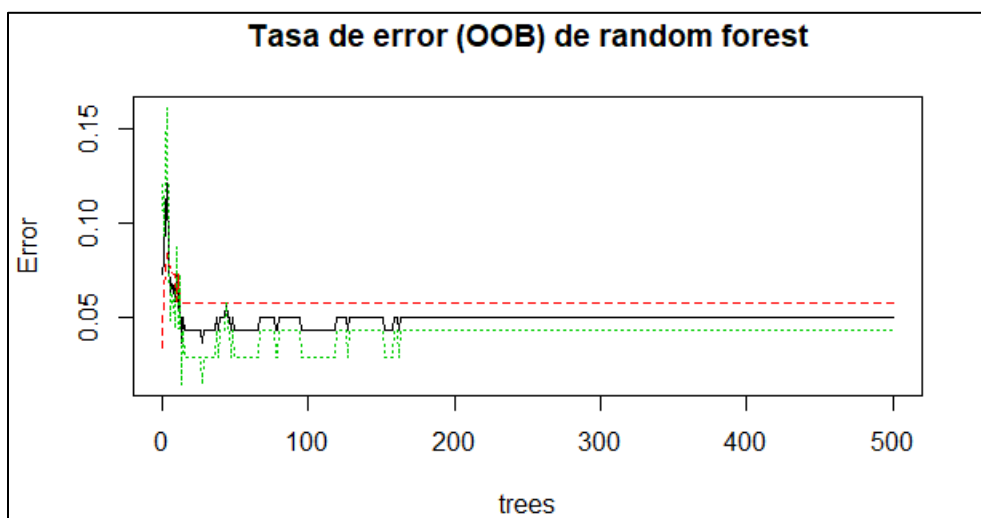
**Figura 27:** Resultados obtenidos en la consola

```
Call:
randomForest(formula = layer ~ ., data = training[, c(1:7)])
  Type of random forest: classification
    Number of trees: 500
No. of variables tried at each split: 2

  OOB estimate of error rate: 7.14%
Confusion matrix:
  0  1 class.error
0 65  5 0.07142857
1  5 65 0.07142857
>
> importance(INUND.RF.Exp)
      MeanDecreaseGini
distancia_rio      8.672841
geologia           16.186583
pendiente          23.063131
precip             1.627785
suelos             7.233656
uso_actual         10.644057
```

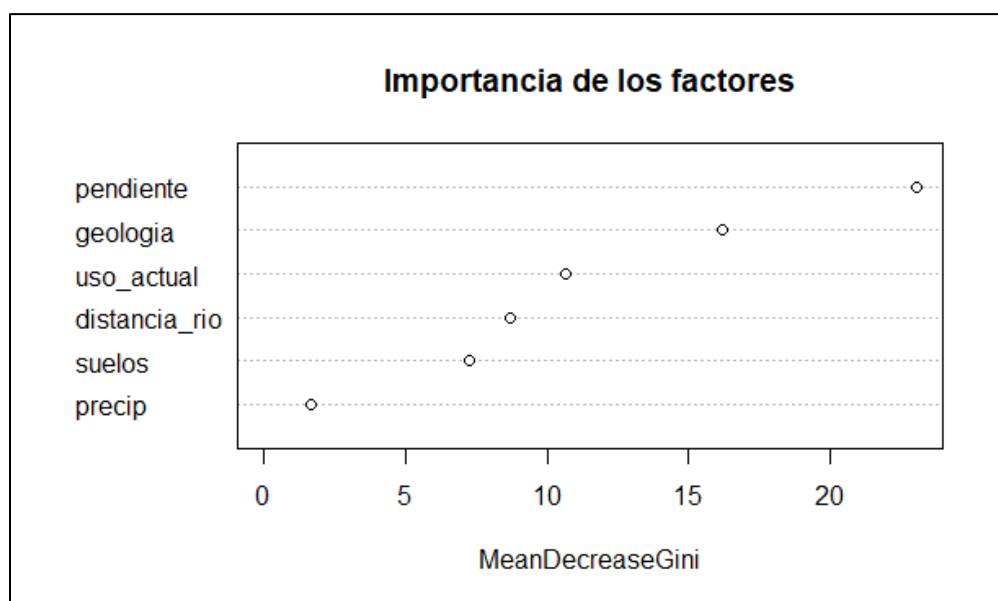
Fuente: Elaboración propia

**Figura 28:** Tasa de error (OOB) del Random Forest



Fuente: Elaboración propia

**Figura 29:** Importancia de los factores en el modelo Random Forest



Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.2.2. Validación

**Primero:** Luego de haber realizado la clasificación, se deberá hacer uso de la función *predict* de la librería *randomForest*, la cual nos permite predecir las muestras de validación usando el modelo resultante (Liaw & Wiener, 2018)

`pred(object, newdata, type)` (32)

Donde:

- `object` = el modelo resultante obtenido de la función *randomForest*
- `newdata` = los datos de las muestras de validación
- `type` = Es la respuesta, probabilidad o votos, que indican el tipo de salida: valores pronosticados, matriz de probabilidades de clase o recuento de matriz de votos respectivamente.

**Figura 30:** Predicción de las muestras de validación

```
pred1=predict(INUND.RF.Exp,testing, type = "prob")
```

Elaboración: Los autores

**Segundo:** La función *predict* del paquete *raster* elabora un ráster a partir de un modelo de un método de predicción como regresión lineal, binomial, gaussiana, Poisson, Random Forest, entre otros. (Hijmans, y otros, 2020)

```
predict(object, model, index = 2, filename,  
format, datatype, overwrite = TRUE)
```

 (33)

Donde:

- object = Variables predictoras del modelo concatenadas (RasterStack)
- model = el modelo resultante obtenido de la función randomForest

Posteriormente, se visualiza los datos ráster del modelo *randomForest* utilizando la función *plot*.

**Figura 31:** Generación del mapa de susceptibilidad

```
#Mapa de Susceptibilidad a inundaciones  
map.RF.r1<- predict(PARAMETROS, INUND.RF.Exp, type = "prob", index = 2, "modelo_RF",  
format = "GTiff", datatype = "FLT4S", overwrite = TRUE)  
plot(map.RF.r1,  
main = "Mapa de Susceptibilidad a inundaciones - RF")
```

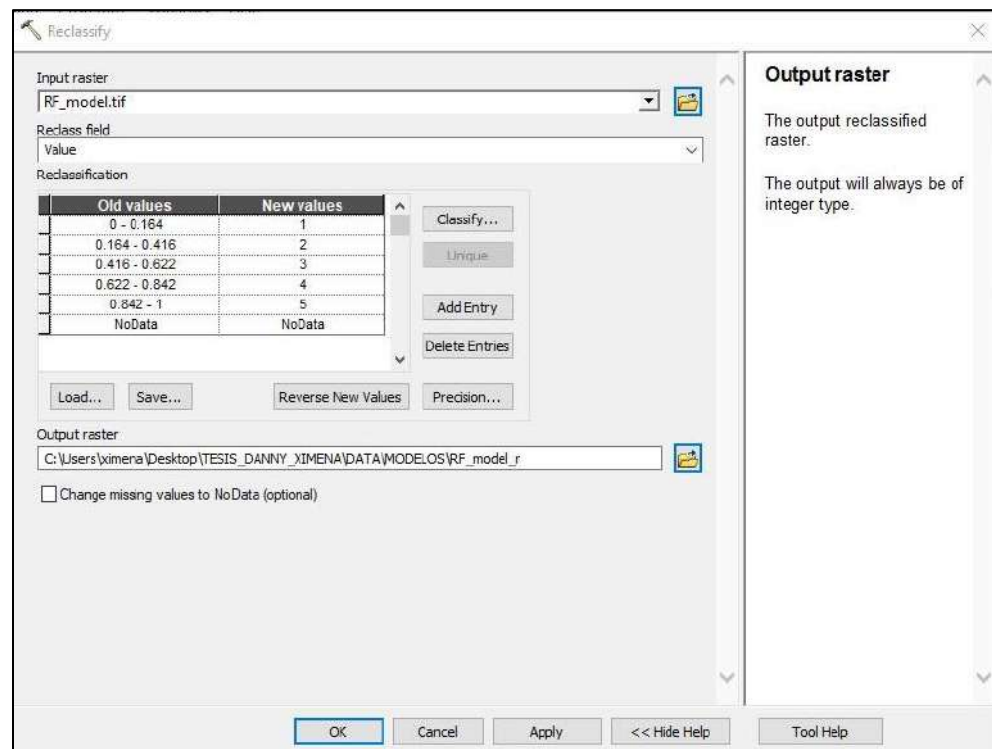
Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.2.3. Clasificación del modelo

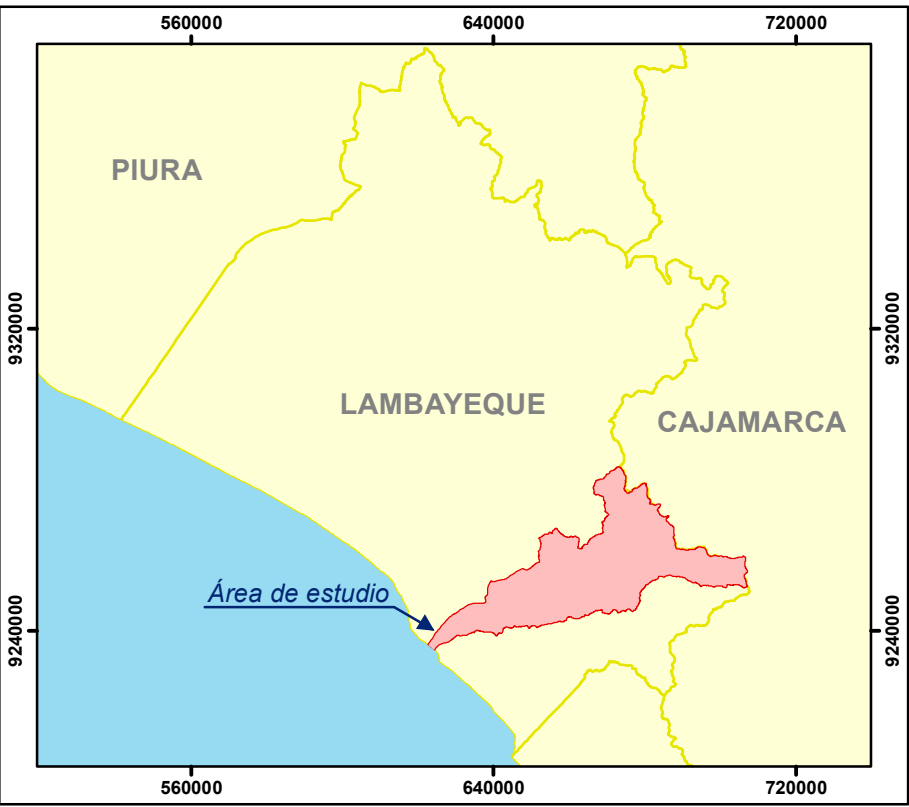
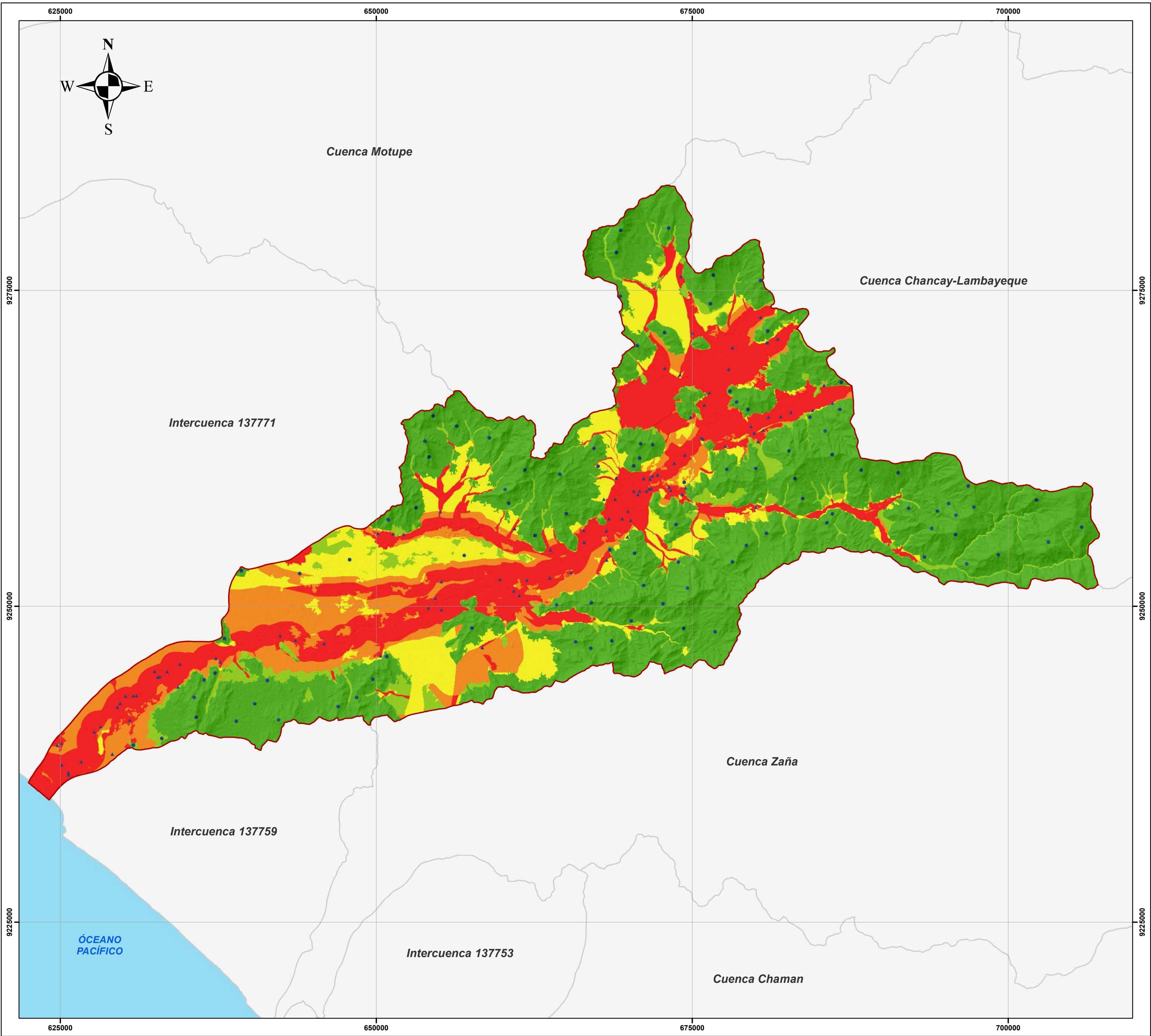
Posteriormente se realizó la clasificación mediante el método de rupturas naturales o *natural breaks* en 5 clases con apoyo de la herramienta *Reclassify* desde el software ArcGIS (ver Figura 32).

De esta manera se generó el mapa final de susceptibilidad ante inundaciones mediante el método Random Forest, el cual se adjunta en el Mapa B.

**Figura 32:** Generación del mapa de susceptibilidad



Fuente: Elaboración propia



UBICACIÓN GENERAL

**SIGNOS CONVENCIONALES**

■ Cuencas hidrográficas

■ Área de estudio

**Inventario de inundaciones**

▲ Inundación

● No inundación

**NIVEL DE SUSCEPTIBILIDAD**

■ Muy baja

■ Baja

■ Media

■ Alta

■ Muy alta



|                                                                                                                                                                                                                                                             |                                       |                                |             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|-------------|
|  <b>UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS</b><br>FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA<br>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA |                                       |                                |             |
| <i>Determinación de zonas susceptibles a inundaciones y análisis comparativo del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y Random Forest (RF).<br/>Caso estudio: Cuenca baja del río Chancay-Lambayeque</i>                                                    |                                       |                                |             |
| <b>MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A INUNDACIONES -<br/>RANDOM FOREST</b>                                                                                                                                                                                           |                                       |                                |             |
| <b>Elaborado:</b><br>Danny Anchelía<br>Ximena Mori                                                                                                                                                                                                          | <b>Proyección:</b><br>UTM Zona 17 Sur | <b>Escala:</b><br>1:200 000    | <b>MAPA</b> |
| <b>Fuente:</b><br>IGN, INEI, ANA,<br>GORE Lambayeque                                                                                                                                                                                                        | <b>DATUM:</b><br>WGS 84               | <b>Fecha:</b><br>Febrero, 2020 | <b>B</b>    |

### 4.2.3. Validación de la hipótesis mediante la curva ROC y el área debajo de la curva (AUC)

La validación de la hipótesis principal se realiza mediante el cálculo del área debajo de la curva ROC en ambos modelos. A continuación, se detalla el procedimiento a seguir:

#### 4.2.3.1. Curva ROC para el método AHP

**Primero:** Se instaló diversas librerías entre ellas, ROCR. Dicha librería es fácil de usar, ya que, cuenta solo con tres comandos y es flexible porque se integra perfectamente con las instalaciones gráficas integradas de R. (Sing et al, 2015)

**Figura 33:** Ingreso de librerías

```
# Modelo de susceptibilidad a inundaciones - AHP  
  
# Librerías  
library(sp)  
library(lattice)  
library(latticeExtra)  
library(RColorBrewer)  
library(leaflet)  
library(raster)  
library(rgdal)  
library(rasterVis)  
library(ithir)  
library(caret)  
library(ROCR)
```

Fuente: Elaboración propia

**Segundo:** Se incorporó los ráster de los factores condicionantes y desencadenantes debido a que tienen integrada la información de la ponderación de cada uno de los factores mediante AHP, lo cual permite el análisis de las muestras de inundaciones y no inundaciones, para lo cual se utilizará la librería *raster* para su incorporación y la función *stack* para su concatenación.

**Figura 34:** Incorporación de los factores

```
#Incorporación de los factores condicionantes y desencadenantes

setwd("C:/Users/ximena/Desktop/TESIS_DANNY_XIMENA/DATA/PARAMETROS/DATA_FINAL_ahp")

DISTANCIA_RIOS=raster("dist_rios_ahp.tif")
GEOLOGIA=raster("geologia_ahp.tif")
PENDIENTE=raster("pendiente_ahp1.tif")
PRECIPITACION=raster("pp_ahp.tif")
SUELOS=raster("suelos_ahp.tif")
USO_ACTUAL=raster("usoactual_ahp.tif")

PARAMETROS_AHP=stack(DISTANCIA_RIOS,GEOLOGIA,PENDIENTE,PRECIPITACION,SUELOS,
                     USO_ACTUAL)
```

Fuente: Elaboración propia

**Tercer:** Mediante la función *readOGR*, se importan los archivos vectoriales: inventario de inundaciones y no inundaciones y el *dataset* de entidades de puntos que incluye los valores del modelo AHP. Dicho *dataset* de entidades de puntos fue obtenido utilizando la herramienta *extract values to points* en el software ArcGIS. Posteriormente, se rasteriza ambos archivos vectoriales mediante la función *rasterize*.

**Figura 35:** Inclusión del inventario de inundaciones y no inundaciones

```
#Generación del inventario de inundaciones y no inundaciones

#Incorporación de la base de datos
inventario_ahp <- readOGR("C:/Users/ximena/Desktop/TESIS_DANNY_XIMENA/DATA
                        /INVENTARIO/inventario3.shp")

val_ahp <- readOGR("C:/Users/ximena/Desktop/TESIS_DANNY_XIMENA/DATA/VALORES_AHP
                  /valores_AHP3.shp")

#Conversión a formato raster
invent_ahp <- rasterize(inventario_ahp, PARAMETROS_AHP, field='INUND')
val_ahp2 <- rasterize(val_ahp, PARAMETROS_AHP, field='RASTERVALU')
```

Fuente: Elaboración propia

**Cuarto:** Se hace uso de la función *stack* para concatenar los rásters de los factores, el inventario de inundaciones y no inundaciones y el *dataset* de entidades de puntos que incluye los valores del modelo AHP, posteriormente, se convierte los valores de RasterLayer en una matriz y se procede a eliminar los “sin datos” (NA).

Después, haciendo uso de la función *as.data.frame* se convierte la matriz a un *data frame* y convierte la clase de referencia (el inventario de inundaciones) en una variable de categoría mediante la función *factor*, asimismo, se convierte la clase de referencia (los valores obtenidos del modelo AHP) en una variable de categoría y luego en un objeto de tipo numérico mediante la función *as.numeric*.

**Figura 36:** Unión de base de datos y conversión a matriz de valores

```
#Unión de la base de datos y conversión a matriz de valores

invent.df.ahp <- na.omit(values(stack(invent_ahp, val_ahp2, PARAMETROS_AHP)))

#Generación la tabla de valores

tabVAL_AHP <- as.data.frame(invent.df.ahp)
tabVAL_AHP$layer.1 <- factor(tabVAL_AHP$layer.1)
tabVAL_AHP$layer.2 <- as.numeric(factor(tabVAL_AHP$layer.2))
```

Fuente: Elaboración propia

**Quinto:** Para dividir los datos en la muestra de entrenamiento (70% del total) y otra de validación (30% del total) se usa la función `createDataPartition` de la librería *caret*. Previamente, se establece un valor arbitrario o semilla como punto de partida para que los resultados sean replicables utilizando `set.seed`.

**Figura 37:** Creación de índice aleatorio para la obtención de muestras de entrenamiento y validación

```
# índice aleatorio para obtención de muestras de entrenamiento y validación

set.seed(43)
inTrain <- createDataPartition(tabVAL_AHP$layer.1, p=0.7, list=F)
training_ahp <- tabVAL_AHP[inTrain,]
testing_ahp <- tabVAL_AHP[-inTrain,]
```

Fuente: Elaboración propia

**Sexto:** La función *prediction* permite transformar los datos de entrada (el inventario de inundaciones y los valores obtenidos del modelo AHP) en un formato estandarizado.

Posteriormente, la función *performance* realiza la relación entre la tasa de verdaderos positivos (sensibilidad) y la tasa de falsos positivos (1-especificidad) obtenida del modelo AHP. El resultado de la relación de TVP y TFP es la curva de ROC.

**Figura 38:** Generación de curva ROC

```
#Curva ROC

predict.rocr <- prediction(testing_ahp$layer.2, testing_ahp$layer.1)
perf.rocr <- performance(predict.rocr, "tpr", "fpr")
```

Fuente: Elaboración propia

**Séptimo:** La función *performance* de la librería *ROCR* permite obtener el área debajo de la curva ROC.

**Figura 39:** Tasa de falsos y verdaderos positivos

```
#True y False positive rate  
auc <- performance(predict.rocr, measure = "auc")  
auc <- auc@y.values[[1]]  
auc
```

Fuente: Elaboración propia

**Octavo:** Se visualiza la curva ROC en conjunto con el calcula del área debajo de la curva mediante la función *plot*.

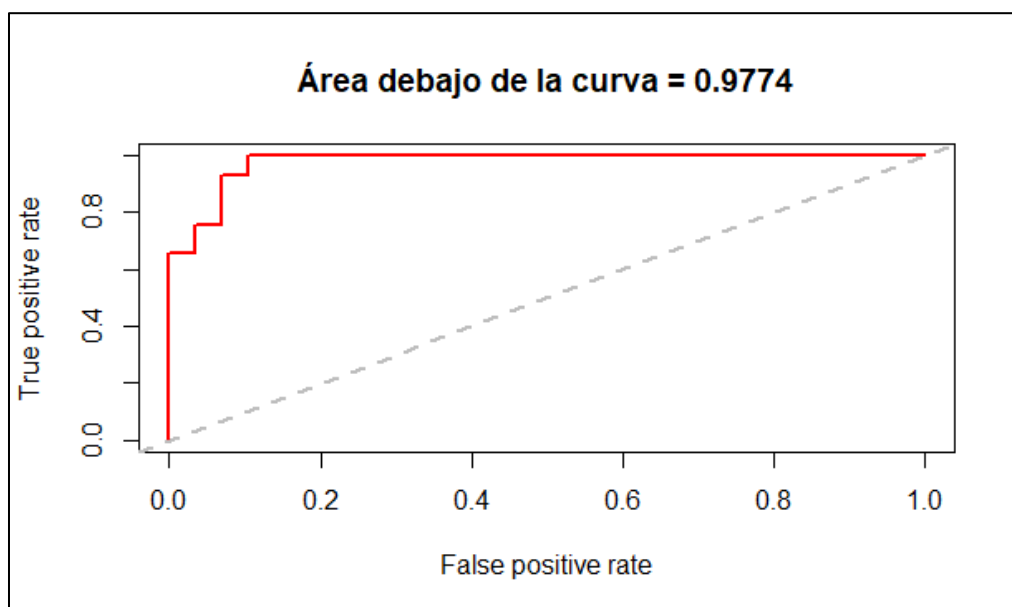
**Figura 40:** Ploteo de la curva ROC

```
# 3. Plot the ROC curve  
plot(perf.rocr, main= paste("Área debajo de la curva =", round(auc,4)), col=2,  
      lwd=2)  
abline(a=0,b=1,lwd=2,lty=2,col="gray")
```

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se obtiene la curva ROC del modelo AHP, la cual se muestra en la Figura 41. y el área debajo de la curva de dicho modelo es 0,9774.

**Figura 41:** Curva ROC obtenida del método de Proceso de Análisis Jerárquico



Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.3.2. Curva ROC para el método Random Forest

**Primero:** El paquete ROCR es una herramienta flexible para crear curvas de rendimiento 2D de corte parametrizado mediante la combinación de dos de las más de 25 medidas de rendimiento con las que cuenta dicho paquete. (Sing, Oliver, Beerenwinkel, & Lengauer, 2015)

Se utiliza la función *prediction* para transformar datos de entrada (vector, matriz, marco de datos o lista) en un formato estandarizado.

Después, con ayuda de la función *performance*, la cual ejecuta todo tipo de evaluaciones predictivas, se realiza la relación entre la tasa de verdaderos positivos (sensibilidad) y la tasa de falsos positivos (1-especificidad) obtenida del modelo Random Forest. El resultado de la relación de TVP y TFP generan la curva ROC.

**Figura 42:** Establecimiento de la curva ROC

```
#Curva ROC
library(ROCR)
library(gplots)

perf = prediction(pred1[,2], testing$layer)
ROCRperf <- performance(perf, "tpr", "fpr")
```

Fuente: Elaboración propia

**Segundo:** A fin de obtener el área debajo de la curva ROC, se utilizó la función *performance* de la librería *ROCR*. Dado que la salida de AUC depende del corte del fin, esta medida no se puede combinar con otras medidas en una curva paramétrica. (Sing, Oliver, Beerenwinkel, y Lengauer, 2015)

**Figura 43:** Inclusión de la función “performance”

```
auc <- performance(perf, measure = "auc")
auc <- auc@y.values[[1]]
auc
```

Fuente: Elaboración propia

**Tercero:** Se visualiza la curva ROC en conjunto con el calcula del área debajo de la curva mediante la función *plot*.

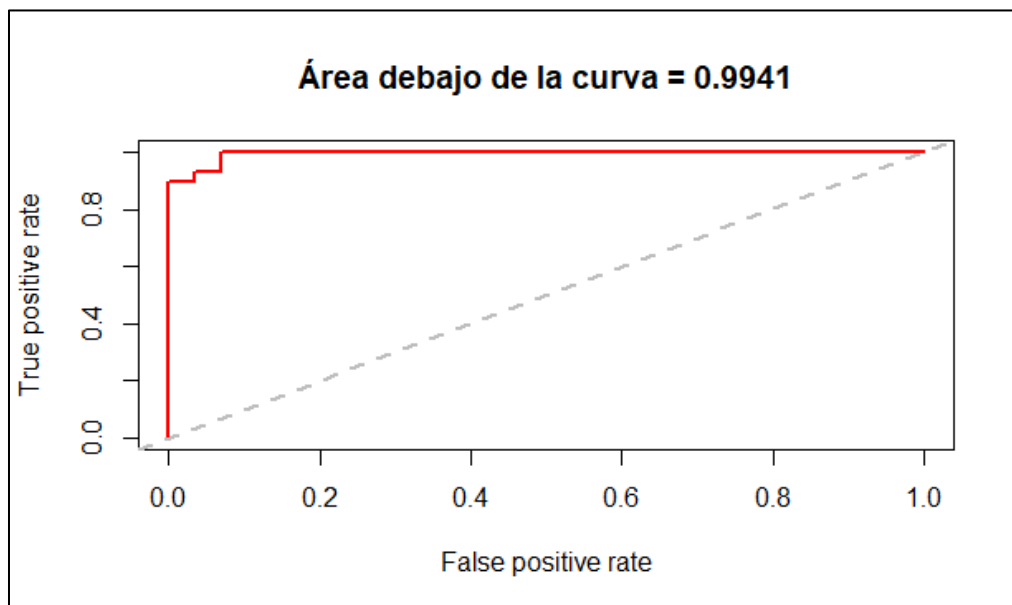
**Figura 44:** Ploteo de la curva ROC

```
plot(ROCperf, main= paste("Área debajo de la curva =",  
                           round(auc,4)), col=2,lwd=2),  
abline(a=0,b=1,lwd=2,lty=2,col="gray")
```

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se obtiene la curva ROC del modelo Random Forest, la cual se muestra en la Figura 45. y el área debajo de la curva de dicho modelo es 0.9941.

**Figura 45:** Curva ROC obtenido del método de Random Forest



Fuente: Elaboración propia

Cuando el valor del AUC se aproxima a la unidad, significa que el método de predicción empleado es más preciso, es decir, que estamos ante un método de predicción con más posibilidades de discernir entre inundación y no inundación. Por lo tanto, se puede afirmar que el método Random Forest (AUC=0,9941) es más preciso que el método AHP (AUC=0,9774) para la determinación de zonas susceptibles a inundaciones. Por lo afirmado anteriormente, se concluye que se acepta la hipótesis principal.

## Capítulo V

# Discusión de Resultados

### 5.1. Presentación de Resultados

Luego del desarrollo de cada una de las metodologías aplicadas, se obtuvieron como resultado modelos cartográficos que representan la susceptibilidad ante inundaciones del área de estudio. El objetivo de la presente investigación es la de realizar un análisis comparativo a fin de establecer el método más adecuado para la determinación de zonas susceptibles a inundaciones; por lo que, para realizar dicha comparación, es necesario que ambos modelos tengan un rango común de susceptibilidad.

Por tal motivo, en el caso del método AHP, se realizó dicha normalización a un rango de  $[0;1]$ , para que pueda ser comparado con el modelo obtenido por Random Forest mediante la curva ROC. Posteriormente se realizó la clasificación de ambos modelos, mediante *natural breaks* en cinco niveles (ver Tabla 46).

**Tabla 46:** Rangos establecidos por el método Natural Breaks para ambos modelos

| Niveles  | Random Forest | AHP           |
|----------|---------------|---------------|
| Muy bajo | 0 – 0,164     | 0 – 0,156     |
| Bajo     | 0,164 – 0,416 | 0,156 – 0,292 |
| Medio    | 0,416 – 0,622 | 0,292 – 0,415 |
| Alto     | 0,622 – 0,842 | 0,415 – 0,570 |
| Muy alto | 0,842 - 1     | 0,570 - 1     |

Fuente: Elaboración propia

### 5.1.1. Resultados de la aplicación del método AHP

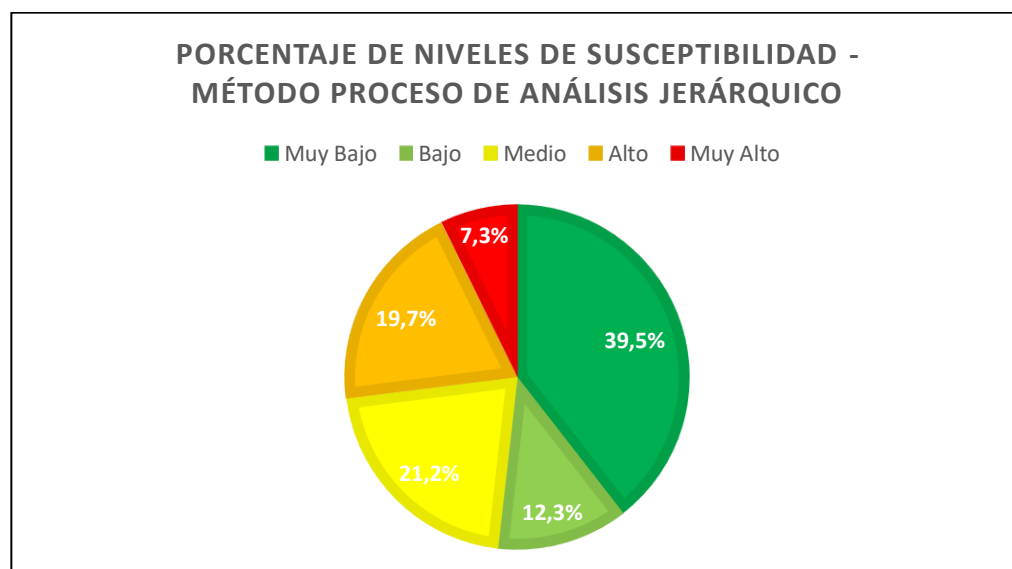
El modelo obtenido mediante la aplicación de este método se presenta en el Mapa N° 02, donde los niveles de susceptibilidad ocupan las áreas presentadas en la Tabla 47.

**Tabla 47:** Áreas susceptibles a inundaciones mediante el método AHP

| Niveles  | Área (km <sup>2</sup> ) | Porcentaje (%) |
|----------|-------------------------|----------------|
| Muy Bajo | 528,4                   | 39,5           |
| Bajo     | 164,5                   | 12,3           |
| Medio    | 283,4                   | 21,2           |
| Alto     | 264,1                   | 19,7           |
| Muy Alto | 97,1                    | 7,3            |

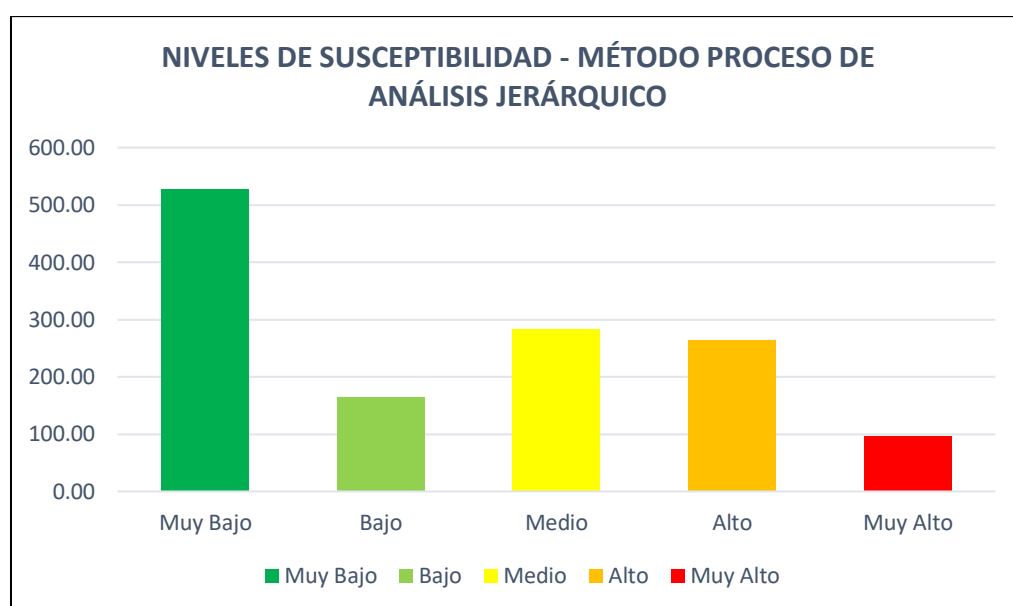
Fuente: Elaboración propia

**Figura 46:** Distribución de porcentaje mediante el método AHP



Fuente: Elaboración propia

**Figura 47:** Representación de los niveles de susceptibilidad - AHP



Fuente: Elaboración propia

### 5.1.2. Resultados de la aplicación del método Random Forest

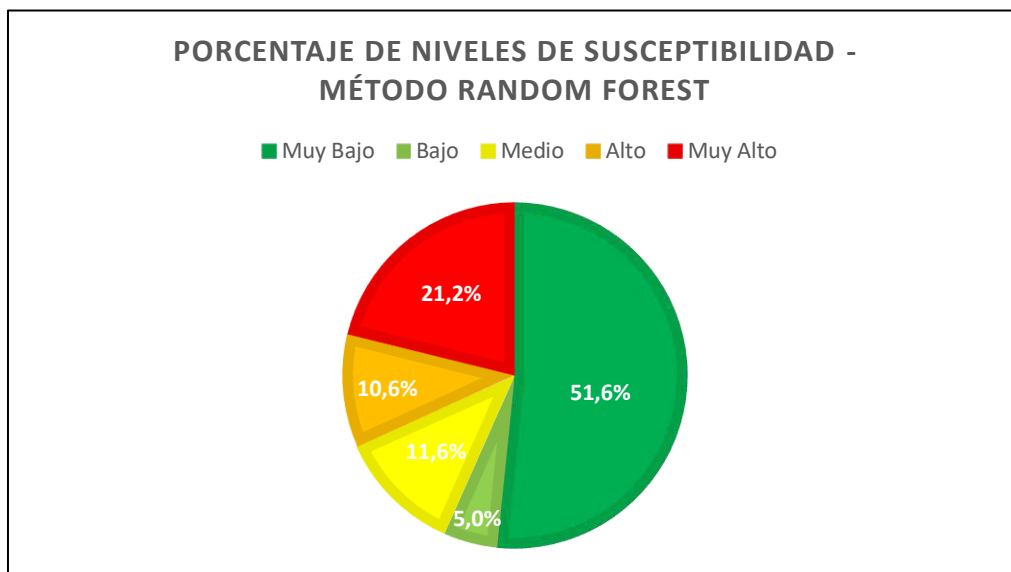
El modelo obtenido mediante la aplicación de este método se presenta en el Mapa N° 03, donde los niveles de susceptibilidad ocupan las áreas presentadas en la Tabla 48.

**Tabla 48:** Áreas susceptibles a inundaciones mediante el método Random Forest

| Niveles  | Área (km <sup>2</sup> ) | Porcentaje (%) |
|----------|-------------------------|----------------|
| Muy Bajo | 690,3                   | 51,6           |
| Bajo     | 67,3                    | 5,0            |
| Medio    | 155,8                   | 11,6           |
| Alto     | 141,2                   | 10,6           |
| Muy Alto | 283,0                   | 21,2           |

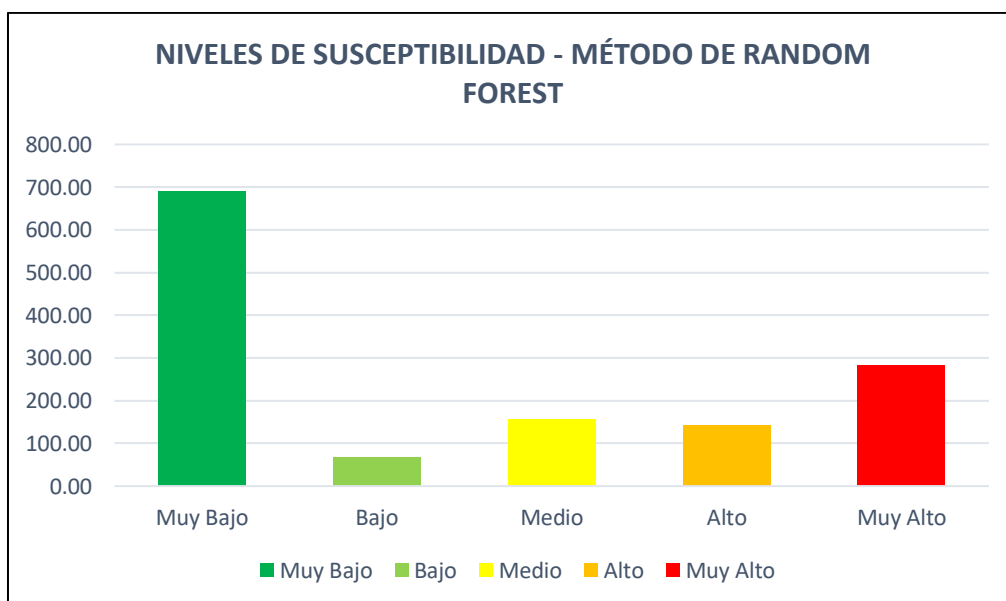
Fuente: Elaboración propia

**Figura 48:** Distribución de porcentaje de áreas – Método Random Forest



Fuente: Elaboración propia

**Figura 49:** Representación de los niveles de susceptibilidad – Método Random Forest



Fuente: Elaboración propia

### **5.1.3. Análisis comparativo de los modelos mediante el indicador de desempeño**

Los mapas de susceptibilidad obtenidos mediante el empleo del Proceso de Análisis Jerárquico y Random Forest deben ser comparados entre sí para determinar cuál de estos modelos será el más preciso para obtener la susceptibilidad a inundaciones de la cuenca baja del río Chancay-Lambayeque.

La precisión y calidad de un modelo de susceptibilidad propuesto se puede validar cuantitativamente utilizando la curva de características operativas del receptor (ROC) al comparar el mapa de susceptibilidad obtenido con los datos reales existentes (Youssef & Hegab, 2019). En la presente investigación, se utilizó el 30% del inventario de inundaciones y no inundaciones para la obtención de la curva ROC de ambos modelos.

Para las clasificaciones binarias, los 4 posibles resultados que se obtienen son: verdadero positivo, verdadero negativo, falso positivo y falso negativo. Un verdadero positivo (VP) ocurre cuando un resultado correcto se identifica correctamente como positivo, mientras que un falso positivo (FP) identifica un resultado negativo como incorrectamente positivo. Por el contrario, un verdadero negativo (VN) ocurre cuando un resultado negativo se identifica correctamente como negativo y un falso negativo (FN) identifica incorrectamente un resultado verdadero como negativo. (Carter et al., 2016)

En la presente investigación, la curva ROC determina la eficiencia de cada modelo a partir del análisis de los valores del inventario de inundaciones y no inundaciones, y los valores presentados en los modelos, los cuales se obtienen de la extracción de los valores de aquellas celdas que se encuentran en la misma ubicación que los puntos del inventario.

A partir del análisis realizado, se obtienen los 4 posibles resultados y se traza la curva ROC a partir de la tasa de VP y FP que se interpretan de la siguiente forma:

1. Lugar donde ha ocurrido inundaciones según el inventario, y cuya predicción del modelo lo determina como “inundación”. Estos lugares reciben el nombre de “Verdaderos Positivos”
2. Lugar donde no ha ocurrido inundaciones según el inventario y cuya predicción del modelo lo determina como “inundación”. Estos lugares reciben el nombre de “Falso Positivo”.

Una vez obtenida la curva ROC para cada modelo, la determinación del Área debajo de la curva (AUC) cuantifica la eficiencia del modelo realizado. AUC se refiere al área entre lo siguiente: la curva formada al trazar la tasa de verdaderos positivos - VP (eje Y) vs. la tasa de falsos positivos - FP (eje X), y la línea 1:1 para VP vs. FP. (Darabi, y otros, 2019).

En la Figura 41 y Figura 45, se muestra la curva ROC de los modelos del Proceso de Análisis Jerárquico y Random Forest respectivamente. El área debajo de la curva del modelo AHP es 0,9774 y el del modelo RF, 0,9941.

## 5.2. Análisis, interpretación y discusión de datos

De acuerdo a Tien Bui et al. (2016) y Kantardzic (2011), la correlación de la capacidad predictiva y el área debajo de la curva (AUC) podría cuantificarse de la siguiente manera: excelente (0,9 - 1), muy bueno (0,8 - 0,9), bueno (0,7 - 0,8), regular (0,6 - 0,7), y pobre (0,5 - 0,6). (Chen et al, 2017).

Las gráficas de la curva ROC obtenidas, nos muestran un área debajo de la curva (AUC), según la clasificación de Tien Bui et al. (2016) y Kantardzic (2011), de resultado excelente, al estar en el rango 0,9 - 1, lo que denota una efectividad de los modelos. Sin embargo, el modelo Random Forest registra un mayor valor (0,9941) el cual se acerca con mayor proximidad a la unidad a diferencia de lo obtenido mediante el modelo AHP.

Este resultado es determinado debido a la existencia de una mayor tasa de verdaderos positivos en relación a la de falsos positivos; es decir, se obtuvo una mayor cantidad de puntos donde se predijo la ocurrencia de inundaciones y sí se registraron las mismas, a diferencia de los puntos donde se predijo la ocurrencia de inundaciones y no se registraron.

Para ambos modelos, las zonas con muy alta susceptibilidad a inundaciones son aquellas que se encuentran cerca al río, las cuales han sido identificadas en cuatro de los cinco factores condicionantes (geología, distancia al río, suelos, uso actual de suelos), por lo cual, se remarca dicha zona a pesar de que dichos factores condicionantes no son los de mayor importancia en ambos modelos.

Comparando los resultados presentados en la Tabla 47 y Tabla 48, el porcentaje del área caracterizada como susceptibilidad media a inundaciones es mayor en el modelo AHP (21,2%), mientras que el modelo RF proporciona el mayor porcentaje del área con susceptibilidad muy baja (51,6 %). En el caso de la clasificación de susceptibilidad muy alta, el modelo Random Forest presenta el 21,2 % y el modelo AHP, 7,3 %.

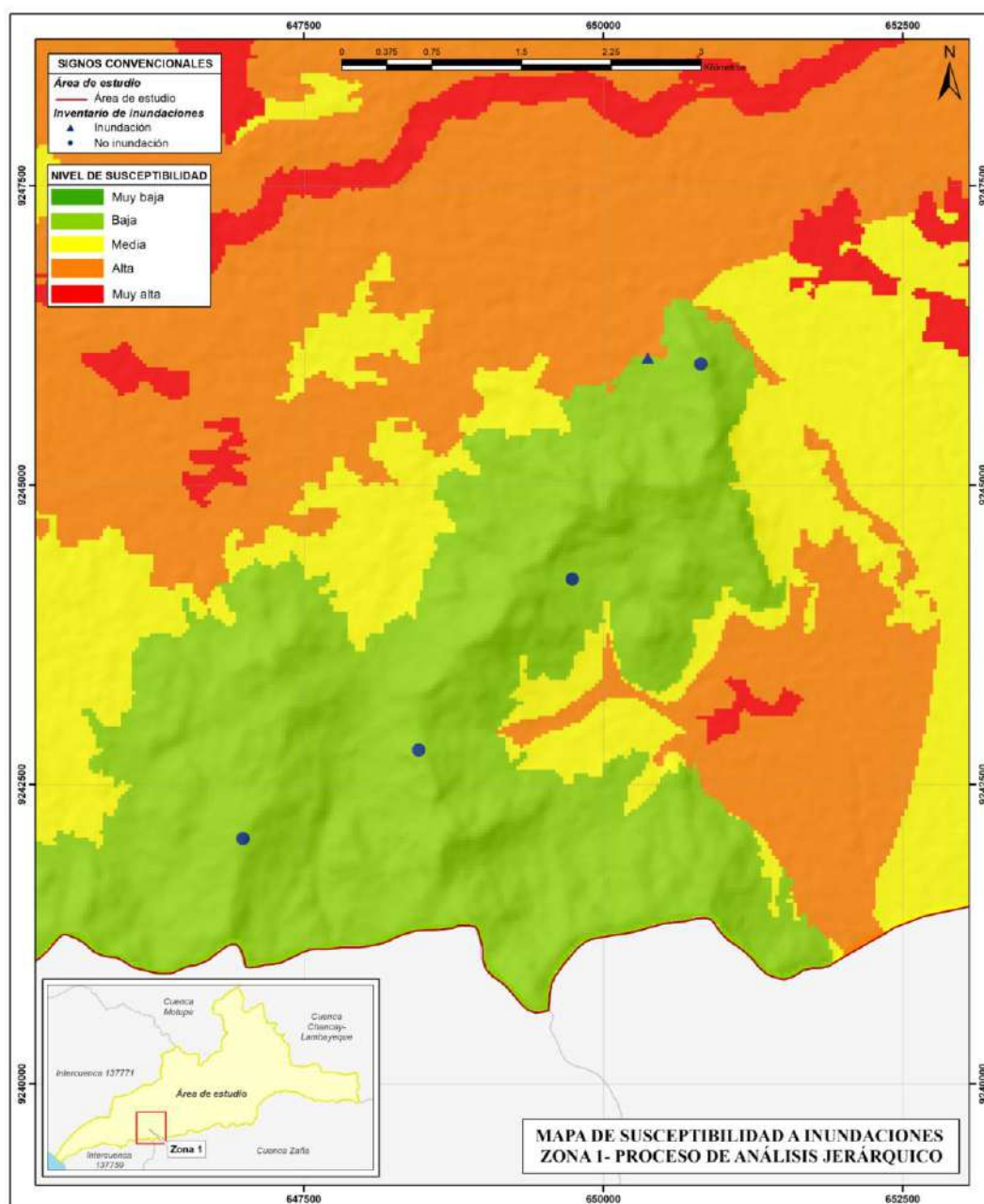
De acuerdo a los resultados presentados, las zonas de baja pendiente son las zonas con mayor susceptibilidad a la ocurrencia de inundaciones para ambos modelos, lo que nos permite evidenciar que el factor con mayor importancia en la determinación de zonas susceptibles a inundaciones es la pendiente. Esto se refleja en el modelo Random Forest, donde es considerado como el factor con mayor relevancia en la división de nodos en cada nivel de árbol de decisión. Así como en el modelo AHP, la pendiente obtuvo el mayor peso relativo en comparación con los demás factores, el cual fue determinado por los juicios de valor ingresados en la matriz de comparaciones pareadas.

Para el modelo Random Forest, el factor precipitación tiene menor importancia que los otros debido a que la distribución del inventario de inundaciones tiende a ser más uniforme en los rangos de la precipitación media mensual, esta característica da como resultado la poca relevancia en la división de los nodos en cada nivel del árbol de decisión. Asimismo, el factor geología es considerado de mayor importancia después de la pendiente a causa de que sus unidades están relacionadas con la permeabilidad de la roca y la tasa de infiltración, lo que es determinante para incrementar o atenuar la magnitud de las inundaciones.

Realizando el análisis de la Zona 1, podemos apreciar que en el modelo generado mediante AHP (Figura 50), las áreas clasificadas con alta susceptibilidad corresponden a un polígono que resulta tener una pendiente de 0 - 4%. Esto se da debido a que para este modelo la pendiente es el factor de mayor importancia y considerando que la pendiente 0 - 4% tiene el mayor peso en dicho factor, ambos pesos se multiplican y obtienen un valor que permite

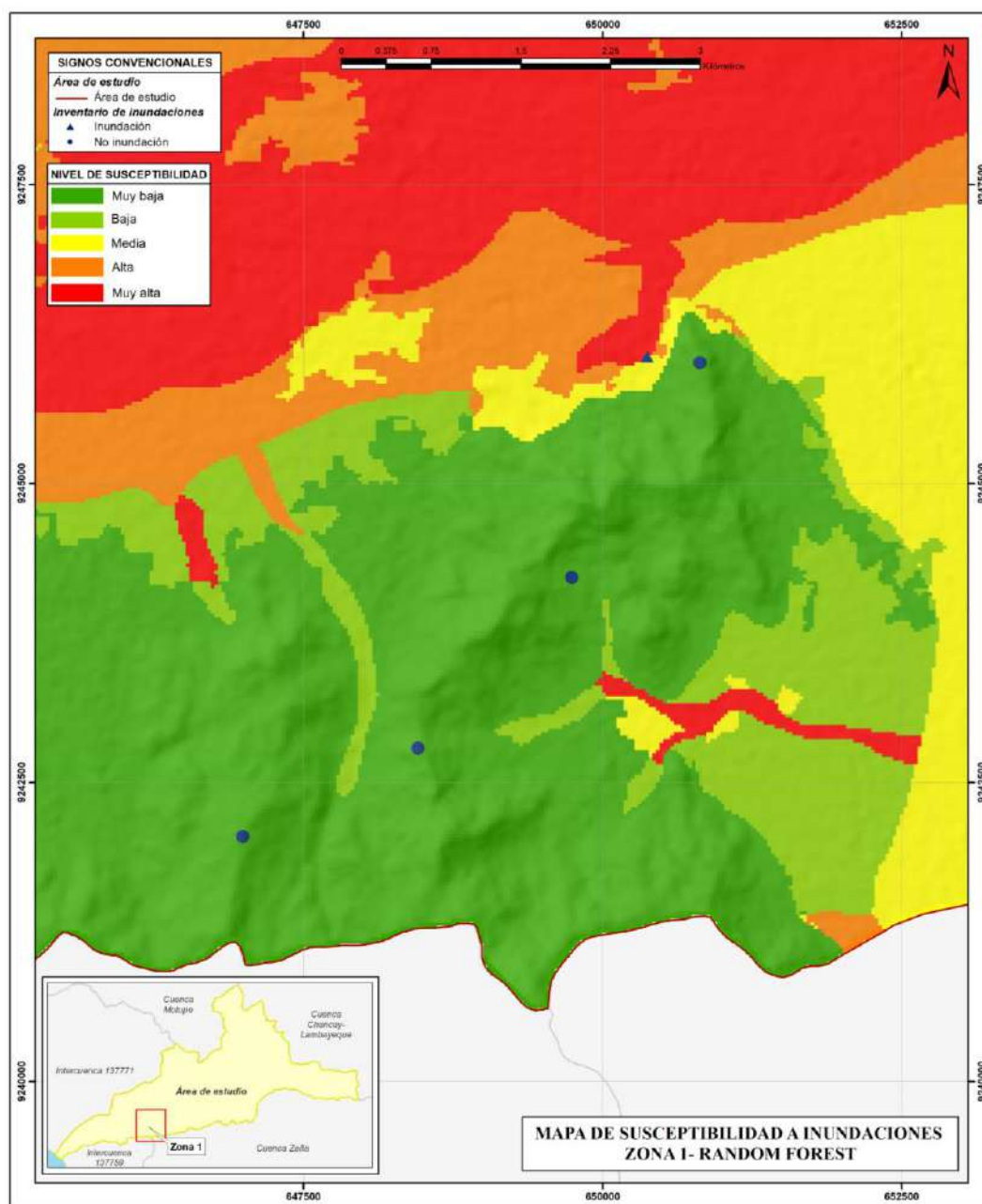
clasificarla como alta susceptibilidad sin la intervención de otros factores que favorezcan a la ocurrencia de inundaciones. En el modelo generado por Random Forest (Figura 51), la clasificación de susceptibilidad muy alta se emplaza sobre una quebrada, donde se evidencia que ha sido descrita por este modelo en función a inundaciones ocurridas en zonas con características similares basado en un proceso de entrenamiento; dicho proceso permite determinar las características que predisponen a que las inundaciones sucedan o no sobre un determinado ámbito geográfico.

**Figura 50:** Zona 1 – Modelo AHP



Fuente: Elaboración propia

**Figura 51:** Zona 1 – Modelo Random Forest

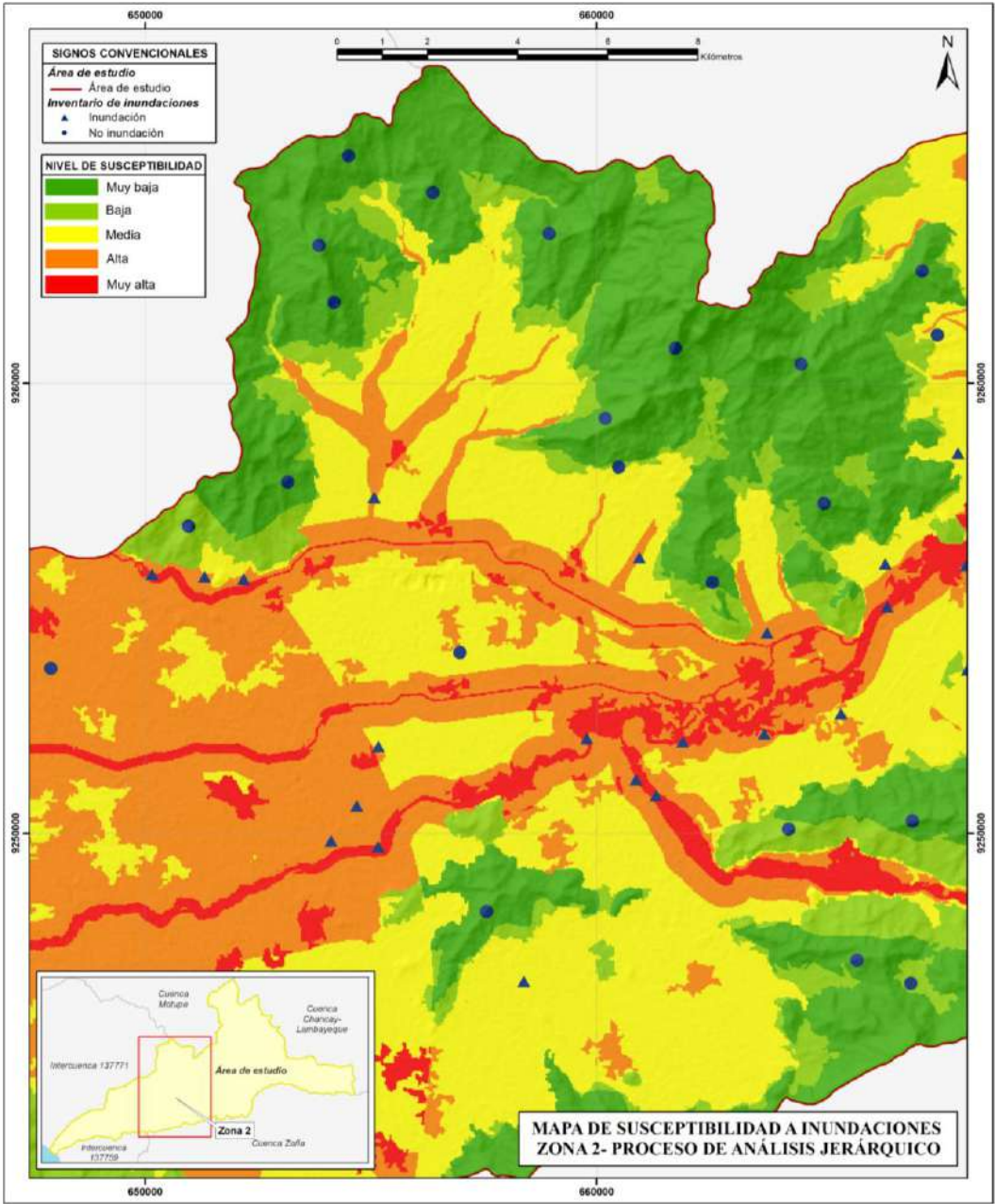


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 52, se presenta el mapa del modelo AHP, mientras que en la Figura 53 con el modelo Random Forest, respecto a la zona localizada próxima al noreste del área de estudio, donde se visualiza que el modelo Random Forest ha clasificado gran parte de las zonas cercanas al río y quebradas como susceptibilidad muy alta a diferencia del modelo AHP que ha clasificado las mismas áreas como susceptibilidad muy alta, alta y media. Esto se debe a que el modelo AHP ha considerado como factor de segundo orden de importancia a la distancia al río, sin embargo, no se tomó en cuenta los depósitos aluviales que se encuentran a más de 500 metros de distancia del río referidos en el factor

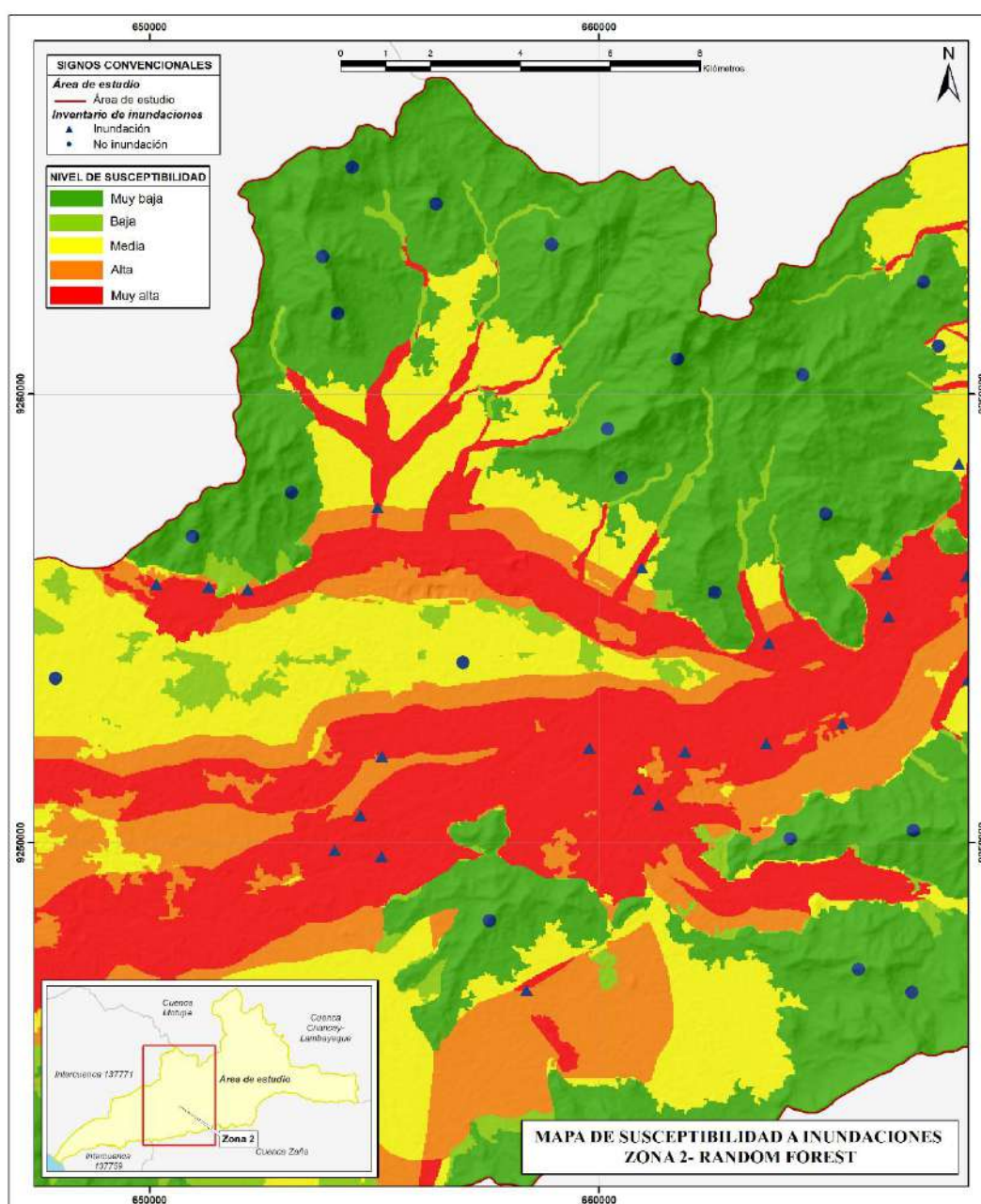
geología, unidades donde se han registrado inundaciones; mientras que, en el modelo generado por Random Forest, a partir de estos registros se realiza el entrenamiento para la determinación de las zonas susceptibles a inundaciones.

**Figura 52:** Zona 2 – Modelo AHP



Fuente: Elaboración propia

**Figura 53:** Zona 2 – Modelo Random Forest



Fuente: Elaboración propia

Como se ha visto, con el modelo AHP se ingresa los mismos parámetros que con el Random Forest, pero este último adicionalmente toma en consideración el inventario de inundaciones: puntos que representan la ocurrencia de inundaciones en el pasado; es decir, además de tener nuestras características físicas del terreno, este modelo se alimenta de puntos donde con certeza corroborada tanto en bibliografía, como las declaraciones de los mismos pobladores que indicaron las zonas donde sí y no llegaron las inundaciones. Con base a esto, el modelo Random Forest, interpreta las características de estos puntos de ocurrencia comprobada y establece las zonas de inundaciones. Es por

ello que la zona de nivel muy alto puede aparecer más engrosada, como en otros lados no.

Con base en ello, se puede interpretar que el Random Forest le da baja importancia al factor precipitación ya que en la espacialización de este factor no existe una relación directa de las zonas donde sí hubo inundaciones con las zonas donde hubo mayor precipitación. A nivel de inundaciones, estos son de mayor envergadura en las zonas bajas de la cuenca (donde hay menos precipitación) por la acumulación de caudal. Dicho sea también la precipitación es un factor desencadenante por su naturaleza.

Asimismo, si bien el factor fisiografía no fue incluido en los factores condicionantes para la generación de los modelos, este se ha utilizado para poder establecer una relación con cada uno de los modelos generados por ambas metodologías, debido a su naturaleza integral de varios factores llegando a la conclusión de que hay mayor correspondencia respecto a las unidades del modelo generado por Random Forest con la fisiografía, a diferencia con el modelo AHP.

## Capítulo VI

# Conclusiones

---

Lo expuesto a lo largo de la presente investigación, permite arribar a las siguientes conclusiones:

1. Según los resultados obtenidos, se concluye que el método Random Forest ha permitido una adecuada determinación de zonas de muy alta a muy baja susceptibilidad a inundaciones en la cuenca del río Chancay- Lambayeque, la cual se basa en el entrenamiento del algoritmo a partir de eventos ocurridos anteriormente; a diferencia del método AHP que está condicionado solo a interpretaciones subjetivas de los tomadores de decisiones sobre las características del área de estudio.
2. El modelo desarrollado por el método AHP presenta el 7,3% de las áreas con susceptibilidad muy alta, 19,7% alta, 21,2% media, 19,7% baja y 39,5% muy baja.
3. El modelo desarrollado por el método Random Forest presenta el 21,2% de las áreas con susceptibilidad muy alta, 10,6% alta, 11,6% media, 5% baja y 51,6% muy baja.
4. Los factores condicionantes contribuyen de forma positiva o negativa, al desarrollo de inundaciones, considerándose a la pendiente como el más importante e influyente en ambos modelos. El factor distancia al río se encuentra como segundo y cuarto nivel de importancia en los

modelos AHP y Random Forest, respectivamente, a diferencia del factor geología que ocupa el segundo y cuarto nivel de importancia en los modelos Random Forest y AHP, respectivamente.

5. El factor desencadenante de las inundaciones es la precipitación, sin embargo, tiene un diferente comportamiento en ambos modelos. En el caso del modelo AHP, se establece que tiene el tercer nivel de importancia debido a que no solo se deben de dar las condiciones del terreno propicias para la ocurrencia del fenómeno, sino también el evento que lo desencadene. No obstante, el modelo Random Forest considera que el factor precipitación tiene poca relevancia en la división de los nodos en cada nivel del árbol de decisión debido a que la ubicación de los puntos de entrenamiento (inundación y no inundación) se encuentran ubicados indiferentemente en cada una de sus unidades.
6. El análisis comparativo del área debajo de la curva ROC (AUC) demostró que el modelo generado mediante el método Random Forest es el método más preciso para la determinación de zonas susceptibles a inundaciones en la cuenca baja del río Chancay - Lambayeque al tener una mayor área (0,9941) a diferencia del AHP (0,9774).

## Capítulo VII

# Recomendaciones

1. Se recomienda la aplicación del método Random Forest para la determinación de zonas susceptibles a inundaciones en cuencas que dispongan principalmente de un inventario de inundaciones consistente. Asimismo, que posean información detallada por cada tipo de parámetro. Ya que este modelo establece condiciones de inundación a puntos que tengan similares características.
2. Para mejorar la precisión del modelo Random Forest, los reportes del Instituto de Defensa Civil de los distritos afectados por inundaciones o Fenómenos del Niño se deberían realizar a un nivel de mayor precisión, por ejemplo, centros poblados a fin de poder tener la exactitud de dónde ocurrieron pérdidas humanas y/o económicas.
3. Las fuentes de información para obtener los factores condicionantes y desencadenantes son los más importante en el proceso de la investigación debido a que depende de la escala, la antigüedad y la fiabilidad de estas la obtención de un modelo más preciso y real posible en cualquiera de los métodos realizados, a fin de poder ser un insumo para la prevención de desastres en la zona de estudio.
4. Se recomienda que los juicios de valor en la matriz de comparaciones pareadas sean realizados por un equipo multidisciplinario y

especializado, a fin de poder tener una evaluación más objetiva y mejorar la consistencia.

5. Las zonas con alta susceptibilidad a inundaciones de ambos modelos se encuentran ubicadas en las planicies y terrazas cercanas al río, por lo tanto, se recomienda que se implementen medidas estructurales y no estructurales a fin de evitar pérdidas humanas y económicas.
6. Para futuras investigaciones, se recomienda incorporar en los factores condicionantes el Índice Topográfico de Humedad, el cual está relacionado con la humedad edáfica y la tendencia del suelo a la generación de escorrentía; así como la curvatura topográfica, la cual indica el grado de convexidad o concavidad de la superficie del terreno en la dirección de la pendiente, debido a que es determinante en los procesos de escorrentía e infiltración en el área.

# Referencias Bibliográficas

- Aguaron, J., & Moreno-Jimenez, J. M. (2003). The geometric consistency index: Approximated thresholds. *European Journal of Operational Research*, 137-145.
- Al-Abadi, A. M. (2018). Mapping flood susceptibility in an arid region of southern Iraq using ensemble machine learning classifiers: a comparative study. *Arabian Journal of Geosciences*.
- Al-Abadi, A. M., Shahid, S., & Al-Ali, A. K. (2016). A GIS-based integration of catastrophe theory and analytical hierarchy process for mapping flood susceptibility: a case study of Teeb area, Southern Iraq. *Environmental Earth Sciences*, 686-705.
- Alarcón Flores, J. B. (2017). Modelos de minería de datos: random forest y adaboost, para identificar los factores asociados al uso de las TIC (internet, telefonía Fija y televisión de paga) en los hogares del Perú. 2014. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Amit, Y., & German, D. (1996). Shape Quantization and Recognition with Randomized Trees. *Neural Computation*, 1545-1588.
- Asencios Bazán, J. M., & Ato Vértiz, M. T. (2015). Propuesta metodológica para la evaluación semicuantitativa de riesgo de desastres con fines de ordenamiento territorial, en el distrito de San Marcos, provincia de Huari, departamento de Ancash. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Asesores Técnicos Asociados. (2002). Plan de gestión de la oferta de agua en las cuencas de ámbito del Proyecto Tinajones Vol II. Lima: Asesores Técnicos Asociados.
- Autoridad Nacional del Agua – ANA (2010). Tratamiento de cauce del río para el control de inundaciones en la cuenca Chancay Lambayeque. Dirección de Estudios de Proyectos Hidráulicos Multisectoriales.
- Autoridad Nacional del Agua - ANA. (2015). Mapas de rutas de evacuación ante inundación y huaicos 2015 - 2016. Mapa de rutas de evacuación y zonas de refugio Localidad Callanca - Río Reque.
- Bender, S., & Bello, E. (1993). Applications for Natural Hazard Management in Latin América and the Caribbean. Washington D.C.

- Berumen, S. A., & Llamazares Redondo, F. (2007). La utilidad de los métodos de decisión multicriterio (como el AHP) en un entorno de competitividad creciente. En P. U. Javeriana, Cuadernos de administración (págs. 65-87). Bogotá.
- Breiman, L. (2001). Random Forests. Machine Learning, 5-32.
- Bustamente Hernandez, J. M. (2010). Estudio de encauzamiento y defensas ribereñas en el río Chancay-Lambayeque sector centro poblado Rinconazo Tumán. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.
- Cárdenas Garro, J. A. (2019). Clasificación de aceptación de campañas para una entidad financiera, usando random forest con datos balanceados y datos no balanceados. Universidad Ricardo Palma.
- Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres - CENEPRED. (2017). Informe de Evaluación de riesgo originado por inundación pluvial en los centros poblados de Paypay, Guzmán, Valencia y Callanca del distrito de Monsefú, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque.
- Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres - CENEPRED. (2017). Informe de evaluación del riesgo originado por lluvias intensas en los centros poblados de Reque, Las Delicias y Miraflores, distrito de Reque, provincia Chiclayo, departamento de Lambayeque.
- Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres. (2014). Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales. Lima.
- Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres. (2017). Informe de Evaluación de riesgo por lluvias intensas en el centro poblado de San Juan, distrito de Chongoyape, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres - Cenapred. (2004). Inundaciones. Ciudad de México.
- Chanca Poma, K., & Inga Ramos, Y. (2018). Influencia de la inundación en el riesgo de desastre del distrito de Moya de la provincia y departamento de Huancavelica 2017. Universidad Nacional de Huancavelica.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2014). Manual para la evaluación de desastres. Santiago de Chile: Naciones Unidas.
- Comisión Multisectorial Encargada del Estudio Nacional del Fenómeno " El Niño " - ENFEN . (2017). El Niño Costero 2017. Callao.

- Cutler, A., Cutler, D. R., & Stevens, J. R. (2012). Random Forests. *Ensemble Machine Learning*, 157-175.
- Danumah, J. H., Odai, S. N., Saley, B. M., Szarzynski, J., Thiel, M., Kwaku, A., . . . Akpa, L. Y. (2016). Flood risk assessment and mapping in Abidjan district using multi-criteria analysis (AHP) model and geoinformation techniques, (Cote d'ivoire). *Geoenvironmental Disasters*.
- Das, S. (2019). Geospatial mapping of flood susceptibility and hydro-geomorphic response to the floods in Ulhas basin, India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*.
- Davis, J., & Goadrich, M. (2006). The Relationship Between Precision-Recall and ROC Curves. 23rd international conference on Machine learning, (págs. 233-240). Pittsburgh.
- Deuker, K. J., & Kjerne, D. (1989). Multipurpose Cadastre Terms and Definitions. *Proceedings of the American Society for Photography and Remote Sensing and American Congress on Surveying and Mapping*. Falls Church.
- Echogdali, F. Z., Boutaleb, S., Elmouden, A., & Ouchchen, M. (2018). Assessing Flood Hazard at River Basin Scale: Comparison between HECRAS-WMS and Flood Hazard Index (FHI) Methods Applied to El Maleh Basin, Morocco. *Journal of Water Resource and Protection*, 957-977.
- ESRI (s.f.) Métodos de clasificación de datos. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/help/mapping/layer-properties/data-classification-methods.htm>
- Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 861-874.
- García Solo de Zaldivar, M. (2018). *Análisis y Predicción en Instagram*. Universidad Complutense de Madrid.
- Gobierno Regional de Lambayeque (2012a) Memoria Descriptiva del Mapa Fisiográfico del departamento de Lambayeque.
- Gobierno Regional de Lambayeque (2012b) Estudio de Suelos con fines de la Zonificación Ecológica y Económica del departamento de Lambayeque.
- Gobierno Regional de Lambayeque (2012c) Clasificación de la vegetación para el estudio de Zonificación Ecológica y Económica del departamento de Lambayeque.
- Gobierno Regional de Lambayeque (2012d) Memoria Descriptiva del mapa de Cobertura y Uso Actual de las Tierras

- Gobierno Regional de Lambayeque (2013) Estudio Geológico del departamento de Lambayeque.
- Gobierno Regional de Lambayeque (2019) Plan Estratégico Regional de Turismo de Lambayeque 2025.
- Gomariz Castillo, F. J. (2015). Estimación de Variables y Parámetros Hidrológicos y Análisis de su Influencia sobre la Modelización Hidrológica: Aplicación a los Modelos Témez y Swat. Universidad de Murcia.
- Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. Springer.
- Hernández Sampieri, R., C., F. C., & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la Investigación. México D.F. : McGRAW-HILL.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2006). Metodología de la investigación. Mexico D.F. : McGraw- Hill.
- Hijmans, R. J., Etten, J. v., Cheng, J., Bevan, A., Bivand, R., Busetto, L., (2020). Geographic Data Analysis and Modelling. CRAN.
- Ho, T. K. (1995). Random Decision Forests. 3rd International Conference on Document Analysis and Recognition, (págs. 278-282). Washington D. C.
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET. (2006). Estudio geoambiental de la cuenca del Río Chancay-Lambayeque. Serie C. Geodinámica e Ingeniería Geológica N° 33, 139.
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET. (2017). Evaluación geológica de las zonas afectadas por El Niño Costero 2017 en las regiones Lambayeque - Cajamarca.
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2010). Terminología de Defensa Civil. Lima – Perú. 5ta Ed. Rapimagen S.A.
- Jasso López, G. (2016). Identificación de ironía en textos cortos. Tesis para obtener el grado de ingeniero en computación. Universidad Nacional Autónoma de México
- Lario, J., & Bardají, T. (2016). Introducción a los Riesgos Geológicos. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Lee, S., Kim, J.-C., Jung, H.-S., Lee, M. J., & Lee, S. (2017). Spatial prediction of flood susceptibility using random-forest and boosted-tree models in Seoul metropolitan city, Korea. Geomatics, Natural Hazards and Risk.

- Liaw, A., & Wiener, M. (2002). Classification and Regression by randomForest. *R News*, 18 - 21.
- Liaw, A., & Wiener, M. (2018). randomForest: Breiman and Cutler's Random Forests for Classification and Regression. (R package)
- Liuzzo, L., Sammartano, V., & Freni, G. (2019). Comparison between Different Distributed Methods for Flood Susceptibility Mapping. *Water Resources Management*, 33(9), 3155–3173.
- Lo, C. P., & Yeung, A. K. (2007). Concepts and Techniques of Geographic Information Systems. (2da Ed). Nueva Delhi: Prentice-Hall.
- López, P. L. (2004). Población, muestra y muestreo. *Punto cero*, 9(08), 69 - 74.
- Mahmoud, S. H., & Gan, T. Y. (2018). Multi-criteria approach to develop flood susceptibility maps in arid regions of Middle East. *Journal of Cleaner Production*, 196, 216-229.
- Mendoza Solis, M. (2017). Evaluación del riesgo por inundación en la Quebrada Romero, del distrito de Cajamarca, periodo 2011- 2016. Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Ambiental y Prevención de Riesgos. Universidad Privada Antonio Guillermo Urrelo.
- Meyer-Baese, A., & Schmid, V. (2014). Pattern Recognition and Signal Analysis in Medical Imaging. (2da Ed.). Elsevier.
- Montenegro Gambini, J., & Arteta Laymito, J. (2019). Multiparametric AHP-based flood hazard zonation approach in Northwestern Peru at basin scale. E-proceedings of the 38th IAHR World Congress. Panamá.
- Moreno, J. J. (2002). El proceso analítico jerárquico (AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones. *Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA*, 1, 28-77.
- Nielson, D. (2014). Geographic Information Systems (GIS): Techniques, applications and technologies. New York: Nova Science Publishers, Inc.
- Junta de Castilla y León (2009). Sistemas de Localización e Información Geográfica.
- Oficina de Naciones Unidas para la Reducción de Riesgo de Desastres - UNDRR. (31 de marzo de 2004). Terminología: Términos principales relativos a la reducción del riesgo de desastres. Recuperado de: <https://www.eird.org/esp/terminologia-esp.htm>

- P. Malone, B., Minasny, B., & McBratney, A. B. (2017). *Using R for Digital Soil Mapping*. Basel, Switzerland: Springer International Publishing
- Patrikaki, O., Kazakis, N., Kougias, I., Patsialis, T., Theodossiou, N., & Voudouris, K. (2018). Assessing Flood Hazard at River Basin Scale with an Index-Based Approach: The Case of Mouriki, Greece. *Geosciences*, 8(2), 50.
- Pita González-Campos, V. (2017). Modelado mediante Random Forests de las emisiones de autobuses urbanos en función de los ciclos cinemáticos. Trabajo de fin de Grado de la carrera técnica de Ingeniería Industrial. Universidad Politécnica de Madrid.
- Rengifo, F., Medina, J., & Ferradas, P. (2010). Preparándonos ante El Niño y afrontando inundaciones en Lambayeque. *Practical Action*. Lima.
- Rodriguez-Galiano, V. F., Sanchez-Castillo, M., Dash, J., Atkinson, P. M., & Ojeda-Zujar, J. (2016). Modelling interannual variation in the spring and autumn land surface phenology of the European forest. *Biogeosciences*, 13, 305–3317.
- Rojas, O., Mardones, M., Arumí, J. L., & Aguayo, M. (2014). Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, recurrencia y efectos geográficos. *Revista de Geografía Norte Grande*, 57, 177-192.
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytical Hierarchical Process*. New York: J. Wiley.
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9-26.
- Saaty, T. L., & Islam, R. (2015). *Hierarchon Vol. II - A dictionary of AHP hierarchies*. Pittsburgh: RWS Publications.
- Samanta, R. K., Bhunia, G. S., Shit, P. K., & Pourghasemi, H. R. (2018). Flood susceptibility mapping using geospatial frequency ratio technique: a case study of Subarnarekha River Basin, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4(1), 395-408.
- Santangelo, N., A. S., Crescenzo, G. D., Foscar, G., Liuzza, V., Sciarrotta, S., & Scorpio, V. (2011). Flood susceptibility assessment in a highly urbanized alluvial fan: the case study of Sala Consilina (southern Italy). *Natural Hazards Earth System Sciences*, 11(10), 2765.
- Sanz, D. J. (2012). Inundaciones: Definición y riesgo: una visión geográfica. *Boletín de la Real Sociedad Geográfica*, 148, 95-126.

- Schumann, A. H. (2011). Flood Risk Assessment and Management: How to Specify Hydrological Loads, Their Consequences and Uncertainties. Springer Science & Business Media.
- Sing, T., Sander, O., Beerenwinkel, N., Lengauer, T., Sing, T., & Sander, O. (2015). Visualizing the Performance of Scoring Classifiers. Package RORC Version, 1
- Souissi, D., Zouhri, L., Hammami, S., Msaddek, M. H., Zghibi, A., & Dlala, M. (2019). GIS-based MCDM - AHP modeling for flood susceptibility mapping of arid areas, southeastern Tunisia. *Geocarto International*, 35(9), 991-1017.
- Swets, J. A. (1996). Signal Detection Theory and ROC Analysis in Psychology and Diagnostics: Collected Papers. New York: Psychology Press.
- Taalab, K., Cheng, T., & Zhang, Y. (2018). Mapping landslide susceptibility and types using Random. *Big Earth Data*, 2(2), 159-178.
- Tamayo y Tamayo, M. (2003). El proceso de la Investigación científica. México D.F.: Limusa.
- Taoufikallah, A. (2013). Selección del sistema de gestión de la producción mediante la metodología AHP: Aplicación a una empresa del sector aeronáutico. Tesis para obtener el grado de magister en Organización Industrial y Gestión de Empresas. Universidad de Sevilla.
- Tehrany, M. S., Jones, S., & Shabani, F. (2019). Identifying the essential flood conditioning factors for flood prone area mapping using machine learning techniques. *Catena*, 175, 174-192.
- Tejada, H. (2014). Estudio Hidrológico de Máximas Avenidas de la Subcuenca Juana Ríos - Cuenca Chancay Lambayeque. Tesis para obtener el título profesional de Ingeniería Agrícola. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.
- Tomlinson, R. (2007). Thinking about GIS: geographic information system planning for managers. California: Esri Press.
- Toskano, H. G. (2005). El proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma decisiones en la selección de proveedores. Tesis para obtener el título profesional de Licenciado en Investigación Operativa. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.
- Tran, P., Shaw, R., Chantry, G., & Norton, J. (2009). GIS and local knowledge in disaster management: a case study of flood risk mapping in Viet Nam. *Disasters*, 33(1), 152-169.

- Wang, Z., Lai, C., Chen, X., Yang, B., Zhao, S., & Bai, X. (2015). Flood hazard risk assessment model based on random forest. *Journal of Hydrology*, 527, 1130–1141.
- Xu, R. (2013). Improvements to random forest methodology. Tesis para obtener el grado de PhD de Estadística. Universidad Estatal de Iowa.
- Youssef, A. M., & Hegab, M. A. (2019). Flood-Hazard Assessment Modeling Using Multicriteria Analysis and GIS: A Case Study – Ras Gharib Area, Egypt. *Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences*, 229-257.
- Zanazzi, J. (2003) Anomalías y supervivencia en el método de toma de decisiones de Saaty en: Problemas del conocimiento de ingeniería y geología. Córdoba. Editorial Universitas.
- Zhao, G., Pang, B., Xu, Z., Yue, J., & Tu, T. (2018). Mapping flood susceptibility in mountainous areas on a national scale in China. *Science of the Total Environment*, 615, 1133–1142.

# Anexos

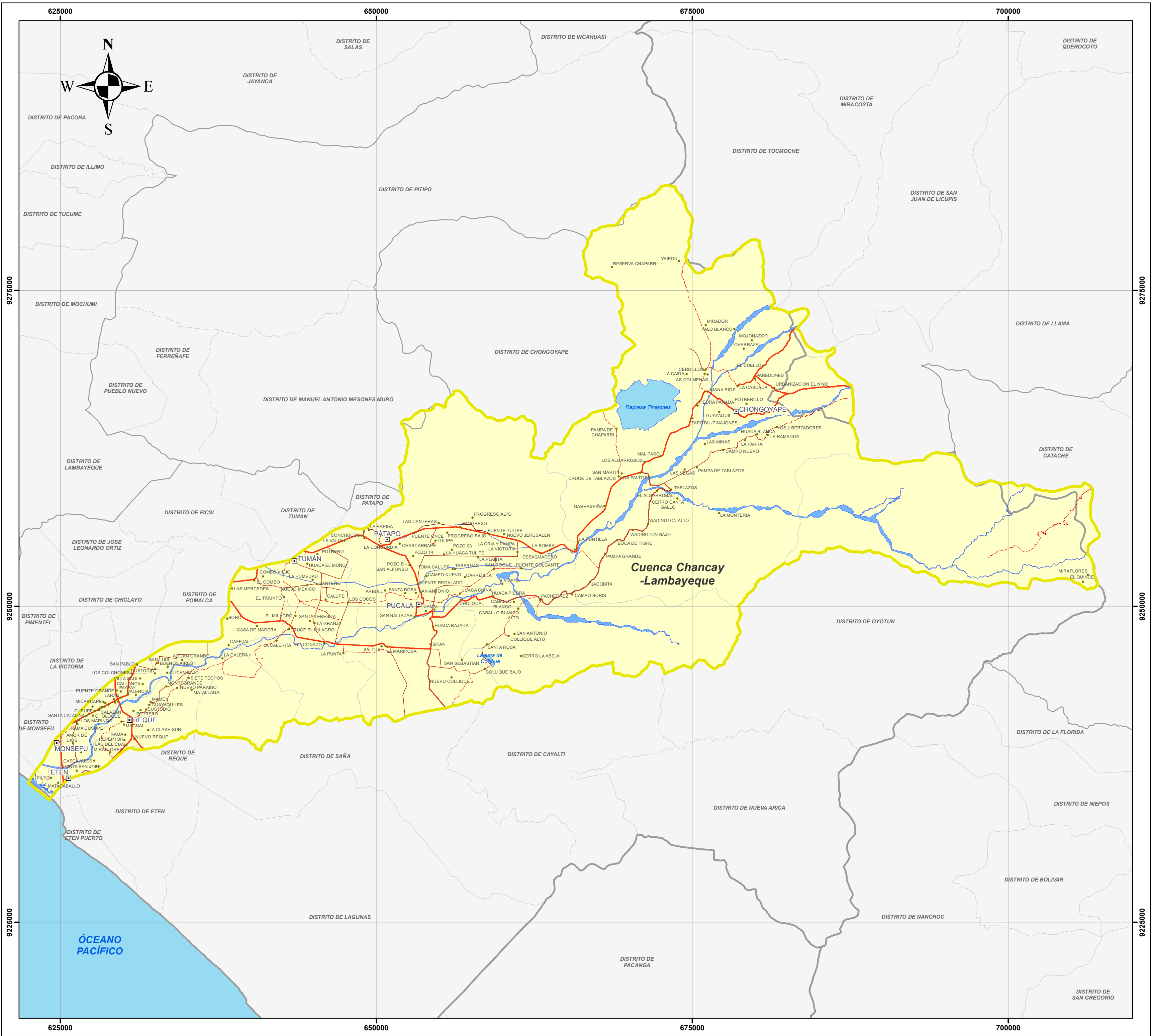
## **Anexo N.º 01**

Formato de encuesta

| <b>CENTRO POBLADO:</b>                                                                           |  |              |  |             |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--------------|--|-------------|--|
| <b>COORDENADAS</b>                                                                               |  | <b>E:</b>    |  |             |  |
|                                                                                                  |  | <b>N:</b>    |  |             |  |
| <b>CÓDIGO DE PERSONA</b>                                                                         |  | <b>FECHA</b> |  | <b>HORA</b> |  |
| <p><b>1. ¿Ha presenciado usted una inundación en su Centro Poblado?</b><br/> <b>¿Cuándo?</b></p> |  |              |  |             |  |
| <p><b>2. Indique usted más o menos hasta dónde ha llegado la inundación?</b></p>                 |  |              |  |             |  |
| <p><b>3. ¿Usted ha sufrido daños materiales a causa de la inundación?</b></p>                    |  |              |  |             |  |
| <p><b>4. ¿Antes de la inundación del 2017, ocurrió otra antes?</b></p>                           |  |              |  |             |  |
| <p><b>5. ¿Son frecuentes las lluvias en su centro poblado?</b></p>                               |  |              |  |             |  |
| <p><b>OBSERVACIONES:</b></p>                                                                     |  |              |  |             |  |

## **Anexo N.º 02**

Mapa de ubicación



UBICACIÓN GENERAL

**SIGNOS CONVENCIONALES**

**Capitales**  
□ Capital distrital

**Centros poblados**  
● Centro poblado

**Límites**  
— Límite distrital  
— Límite provincial  
--- Límite departamental

**Hidrografía**  
— Río  
— Represa

**Red Vial**  
— Asfaltado  
— Afirmado  
— Sin afirmar  
--- Trocha

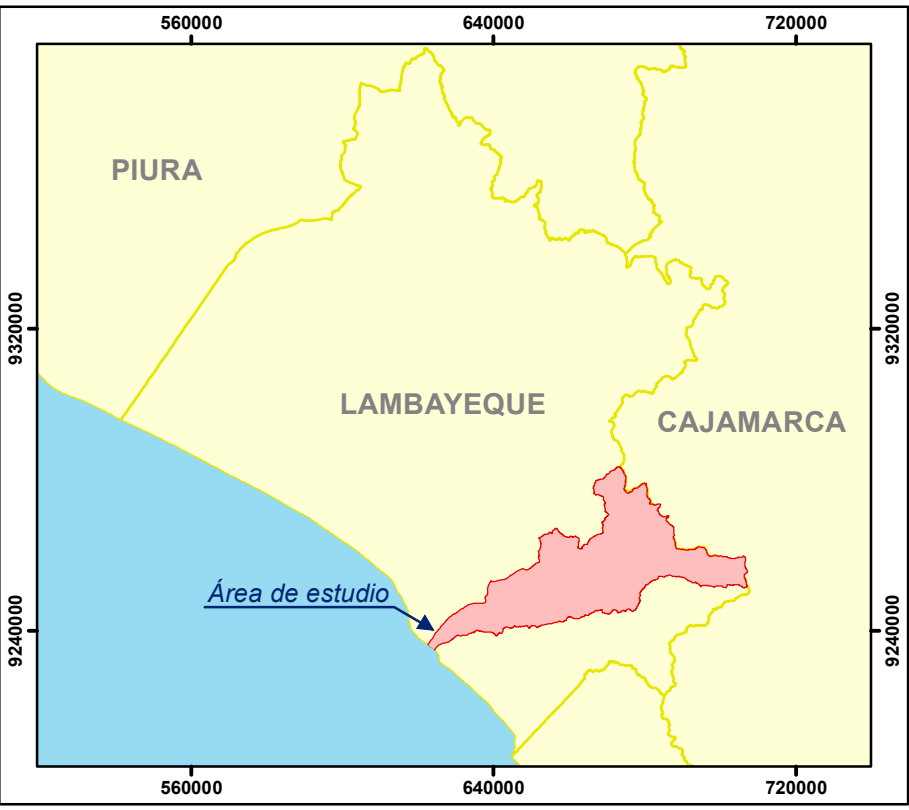
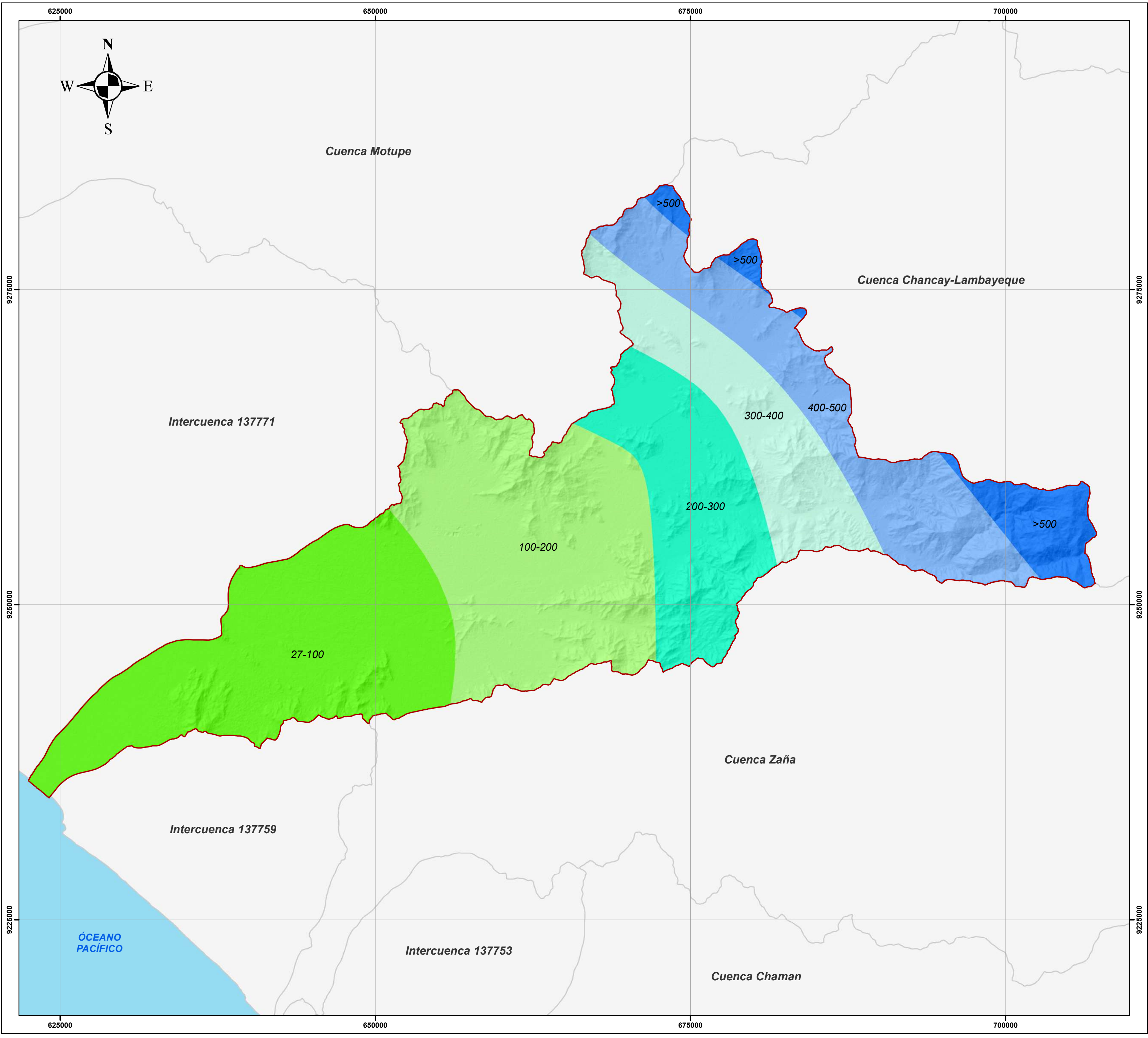
**Área de estudio**  
— Cuenca baja del río Chancay - Lambayeque



|                                                                                                                                                                                                                                                             |                                       |                                |             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|-------------|
|  <b>UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS</b><br>FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA<br>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA |                                       |                                |             |
| <i>Determinación de zonas susceptibles a inundaciones y análisis comparativo del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y Random Forest (RF).<br/>Caso estudio: Cuenca baja del río Chancay-Lambayeque</i>                                                    |                                       |                                |             |
| <b>MAPA DE UBICACIÓN</b>                                                                                                                                                                                                                                    |                                       |                                |             |
| <b>Elaborado:</b><br>Danny Anchelía<br>Ximena Mori                                                                                                                                                                                                          | <b>Proyección:</b><br>UTM Zona 17 Sur | <b>Escala:</b><br>1:200 000    | <b>MAPA</b> |
| <b>Fuente:</b><br>IGN, INEI, ANA,<br>GORE Lambayeque                                                                                                                                                                                                        | <b>DATUM:</b><br>WGS 84               | <b>Fecha:</b><br>Febrero, 2020 | <b>01</b>   |

## **Anexo N.º 03**

Mapa de precipitación



UBICACIÓN GENERAL

| SIGNOS CONVENCIONALES |                       |
|-----------------------|-----------------------|
|                       | Cuencas hidrográficas |
|                       | Área de estudio       |

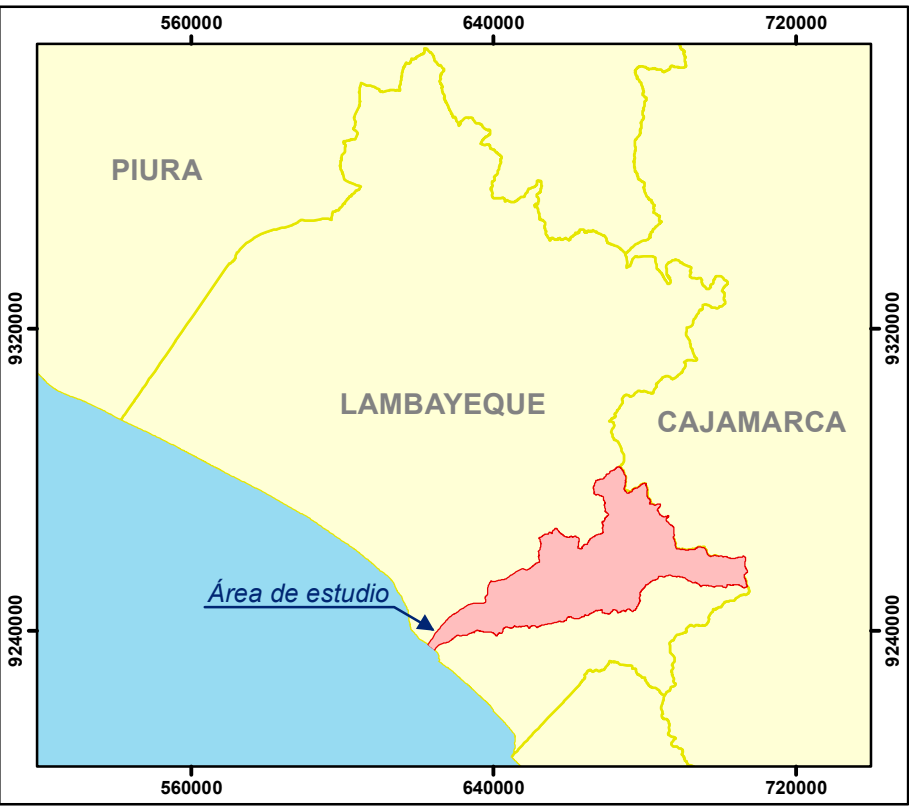
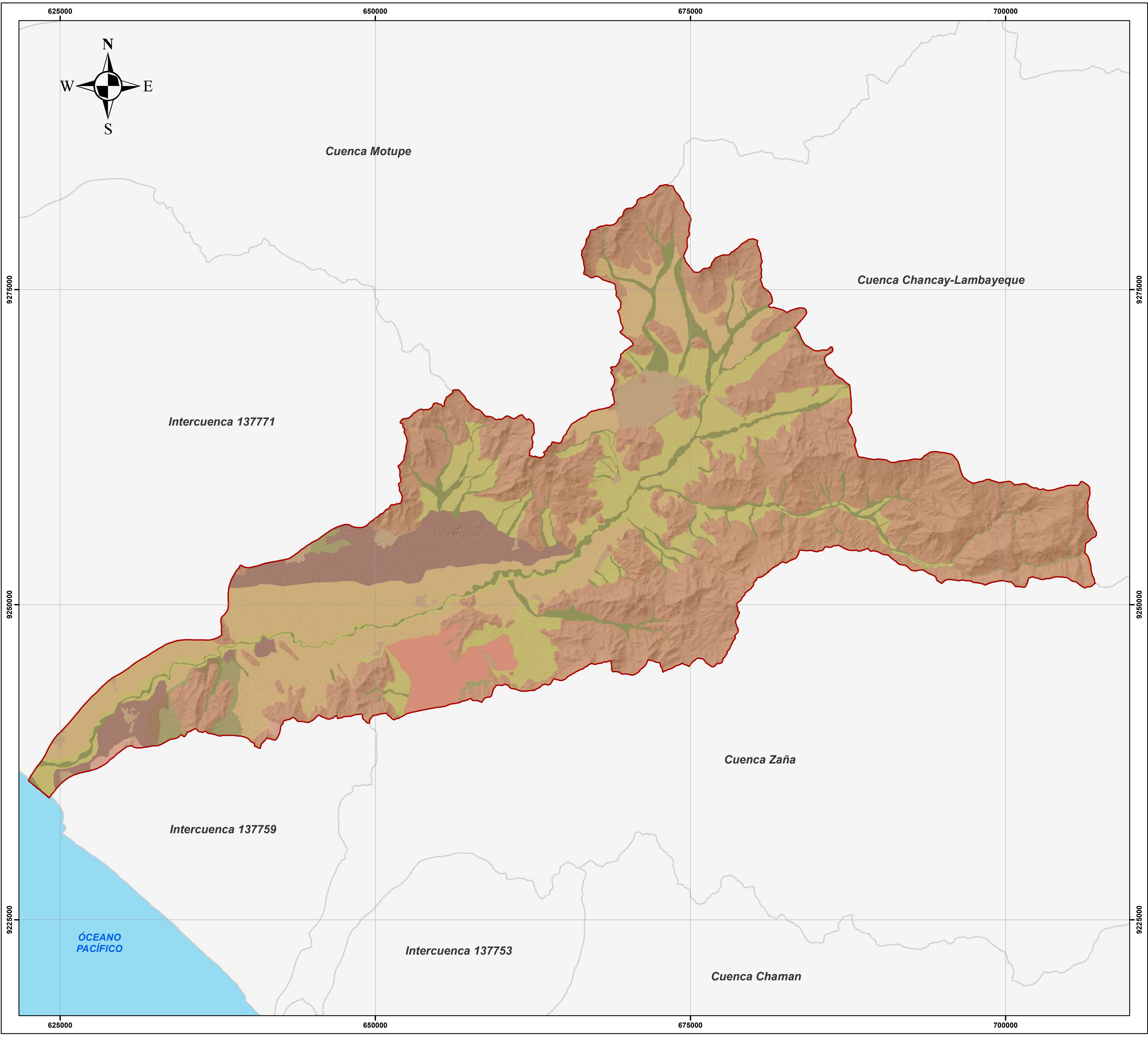
| PRECIPITACIÓN |              |
|---------------|--------------|
|               | 27 - 100 mm  |
|               | 100 - 200 mm |
|               | 200 - 300 mm |
|               | 300 - 400 mm |
|               | 400 - 500 mm |
|               | > 500 mm     |



|                                                                                                                                                                                                                                                             |                                       |                                |             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|-------------|
|  <b>UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS</b><br>FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA<br>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA |                                       |                                |             |
| <i>Determinación de zonas susceptibles a inundaciones y análisis comparativo del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y Random Forest (RF).<br/>Caso estudio: Cuenca baja del río Chancay-Lambayeque</i>                                                    |                                       |                                |             |
| <b>MAPA DE PRECIPITACIÓN</b>                                                                                                                                                                                                                                |                                       |                                |             |
| <b>Elaborado:</b><br>Danny Anchelía<br>Ximena Mori                                                                                                                                                                                                          | <b>Proyección:</b><br>UTM Zona 17 Sur | <b>Escala:</b><br>1:200 000    | <b>MAPA</b> |
| <b>Fuente:</b><br>IGN, INEI, ANA,<br>GORE Lambayeque                                                                                                                                                                                                        | <b>DATUM:</b><br>WGS 84               | <b>Fecha:</b><br>Febrero, 2020 | <b>02</b>   |

## **Anexo N.º 04**

Mapa de suelos



UBICACIÓN GENERAL

| SIGNOS CONVENCIONALES |                       |
|-----------------------|-----------------------|
|                       | Cuencas hidrográficas |
|                       | Área de estudio       |

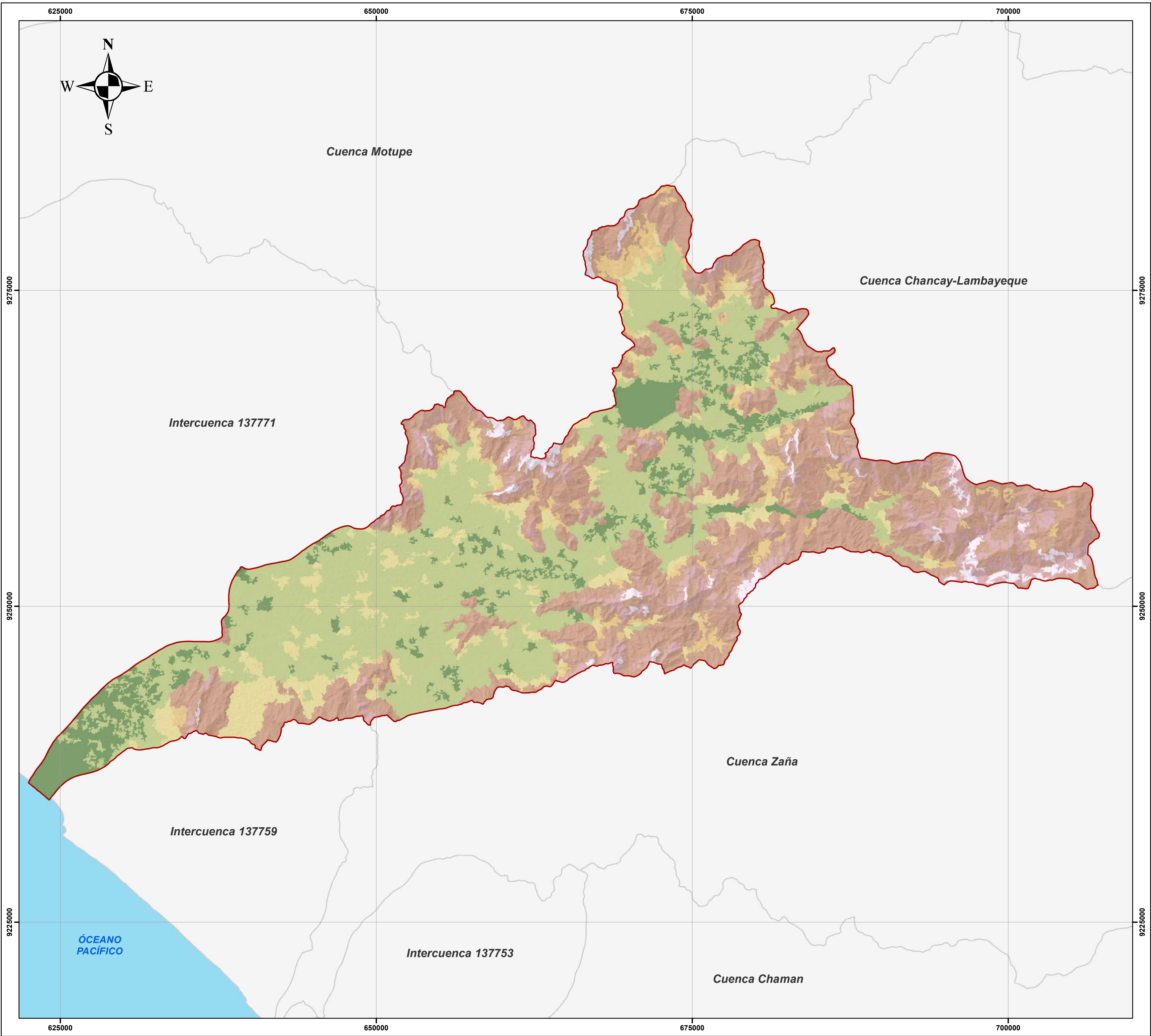
| SUELOS |                      |
|--------|----------------------|
|        | Arenasols            |
|        | Cambisols            |
|        | Fluvisols            |
|        | Gypsisols            |
|        | Regosols             |
|        | Solonetz             |
|        | Yermosols            |
|        | Misceláneo Antrópico |
|        | Misceláneo Cauce     |
|        | Misceláneo Litoral   |
|        | Misceláneo Roca      |



|                                                                                                                                                                                                                                                             |                                       |                                |             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|-------------|
|  <b>UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS</b><br>FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA<br>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA |                                       |                                |             |
| <i>Determinación de zonas susceptibles a inundaciones y análisis comparativo del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y Random Forest (RF).<br/>Caso estudio: Cuenca baja del río Chancay-Lambayeque</i>                                                    |                                       |                                |             |
| <b>MAPA DE SUELOS</b>                                                                                                                                                                                                                                       |                                       |                                |             |
| <b>Elaborado:</b><br>Danny Anchelía<br>Ximena Mori                                                                                                                                                                                                          | <b>Proyección:</b><br>UTM Zona 17 Sur | <b>Escala:</b><br>1:200 000    | <b>MAPA</b> |
| <b>Fuente:</b><br>IGN, INEI, ANA,<br>GORE Lambayeque                                                                                                                                                                                                        | <b>DATUM:</b><br>WGS 84               | <b>Fecha:</b><br>Febrero, 2020 | <b>03</b>   |

## **Anexo N.º 05**

Mapa de pendientes



UBICACIÓN GENERAL

| SIGNOS CONVENCIONALES |                       |
|-----------------------|-----------------------|
|                       | Cuencas hidrográficas |
|                       | Área de estudio       |

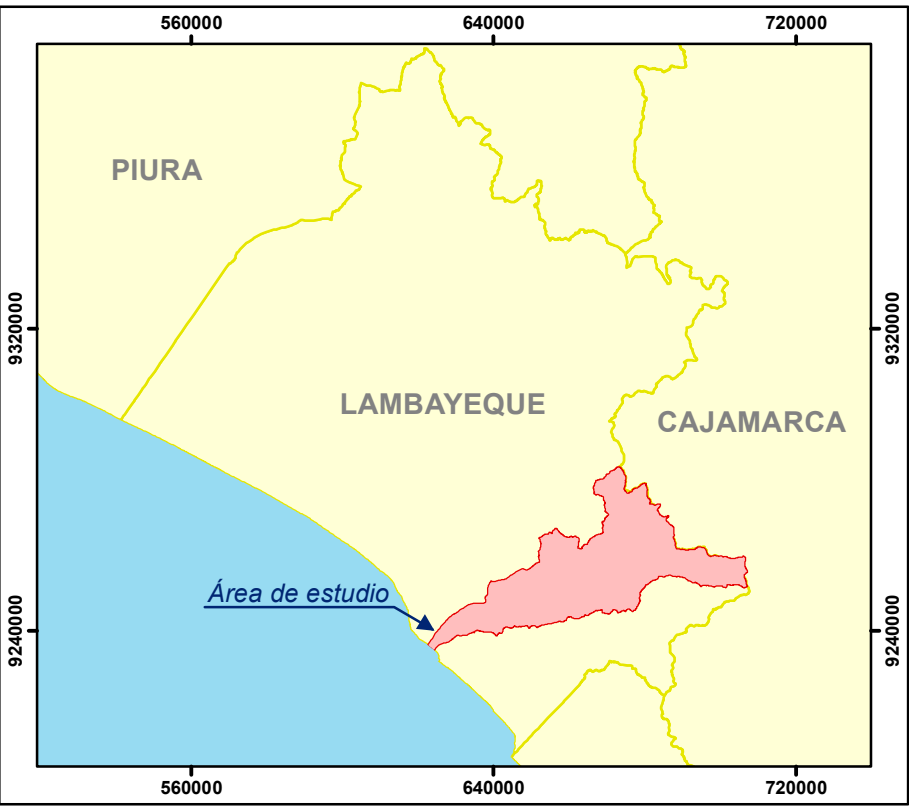
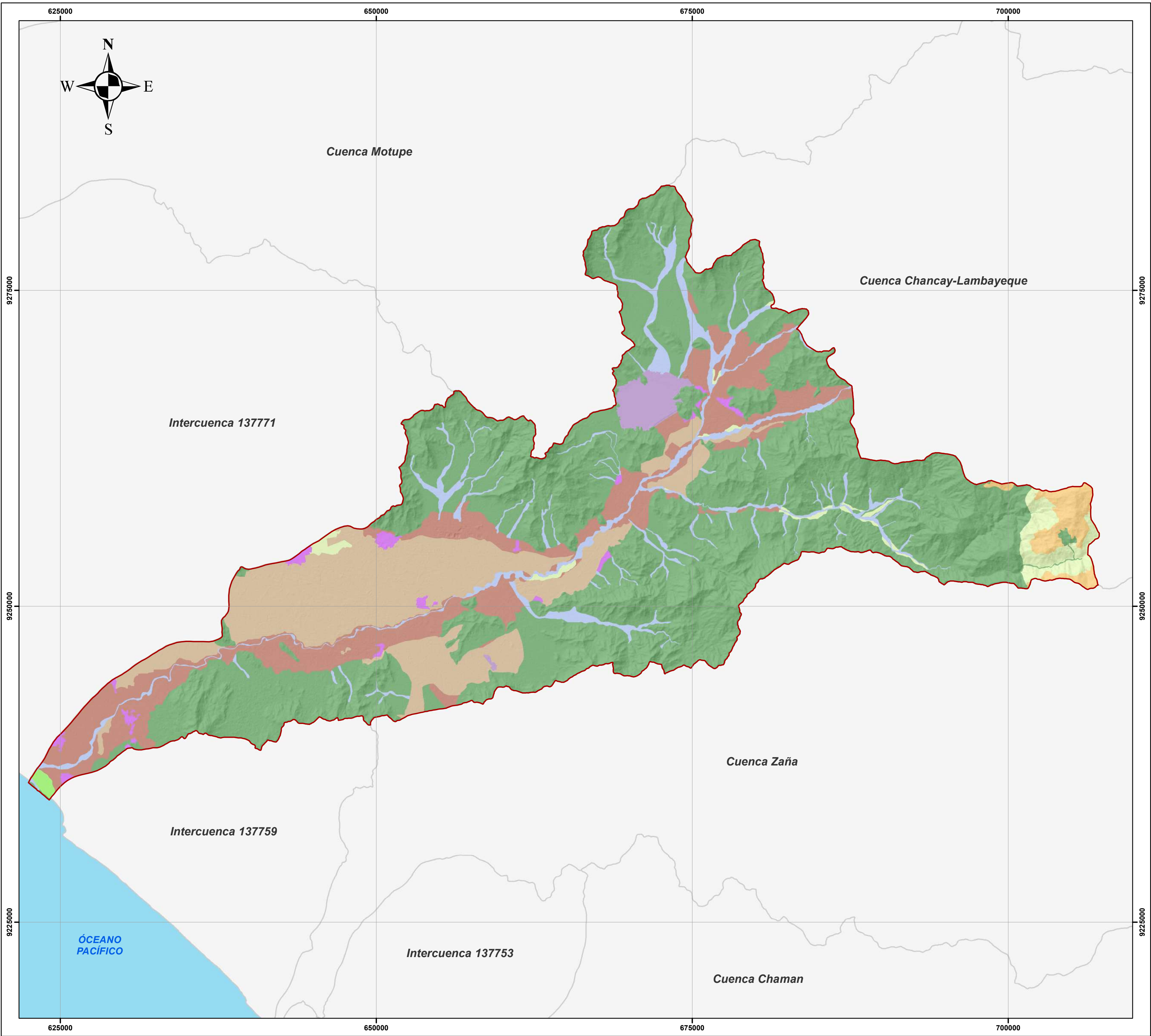
| PENDIENTE |         |
|-----------|---------|
|           | 0 - 4   |
|           | 4 - 8   |
|           | 8 - 15  |
|           | 15 - 25 |
|           | 25 - 50 |
|           | 50 - 75 |
|           | >75     |



|                                                                                                                                                                                                                                                             |                                       |                                |             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|-------------|
|  <b>UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS</b><br>FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA<br>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA |                                       |                                |             |
| <i>Determinación de zonas susceptibles a inundaciones y análisis comparativo del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y Random Forest (RF).<br/>Caso estudio: Cuenca baja del río Chancay-Lambayeque</i>                                                    |                                       |                                |             |
| <b>MAPA DE PENDIENTE</b>                                                                                                                                                                                                                                    |                                       |                                |             |
| <b>Elaborado:</b><br>Danny Anchelía<br>Ximena Mori                                                                                                                                                                                                          | <b>Proyección:</b><br>UTM Zona 17 Sur | <b>Escala:</b><br>1:200 000    | <b>MAPA</b> |
| <b>Fuente:</b><br>IGN, INEI, ANA,<br>GORE Lambayeque                                                                                                                                                                                                        | <b>DATUM:</b><br>WGS 84               | <b>Fecha:</b><br>Febrero, 2020 | <b>04</b>   |

## **Anexo N.º 06**

Mapa de uso actual de suelos



UBICACIÓN GENERAL

| SIGNOS CONVENCIONALES |                       |
|-----------------------|-----------------------|
|                       | Cuencas hidrográficas |
|                       | Área de estudio       |

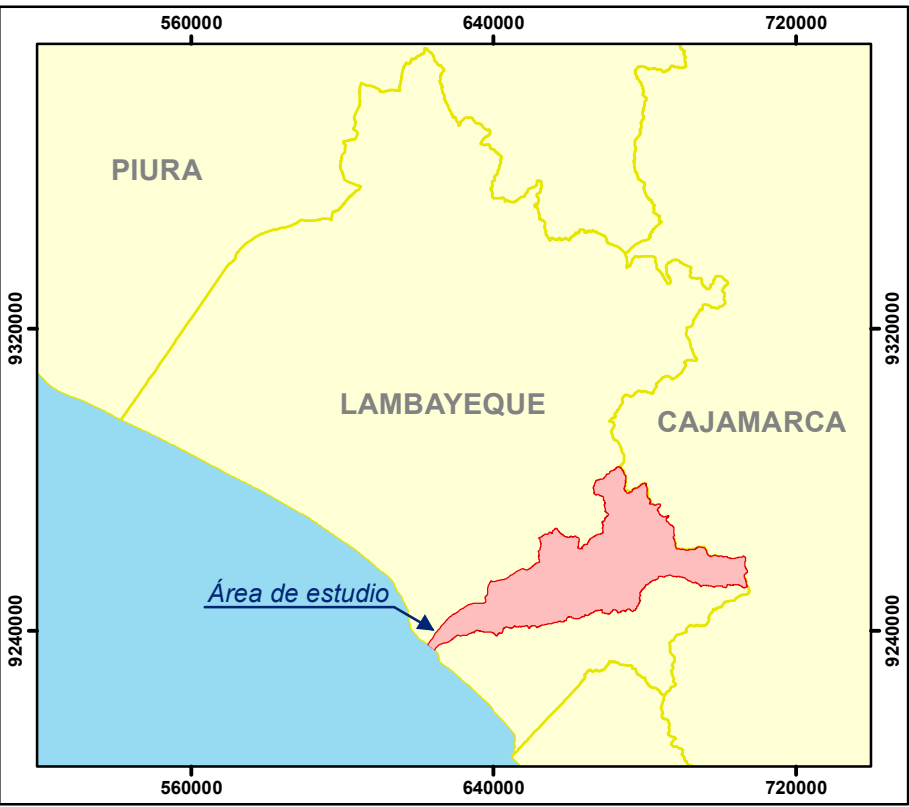
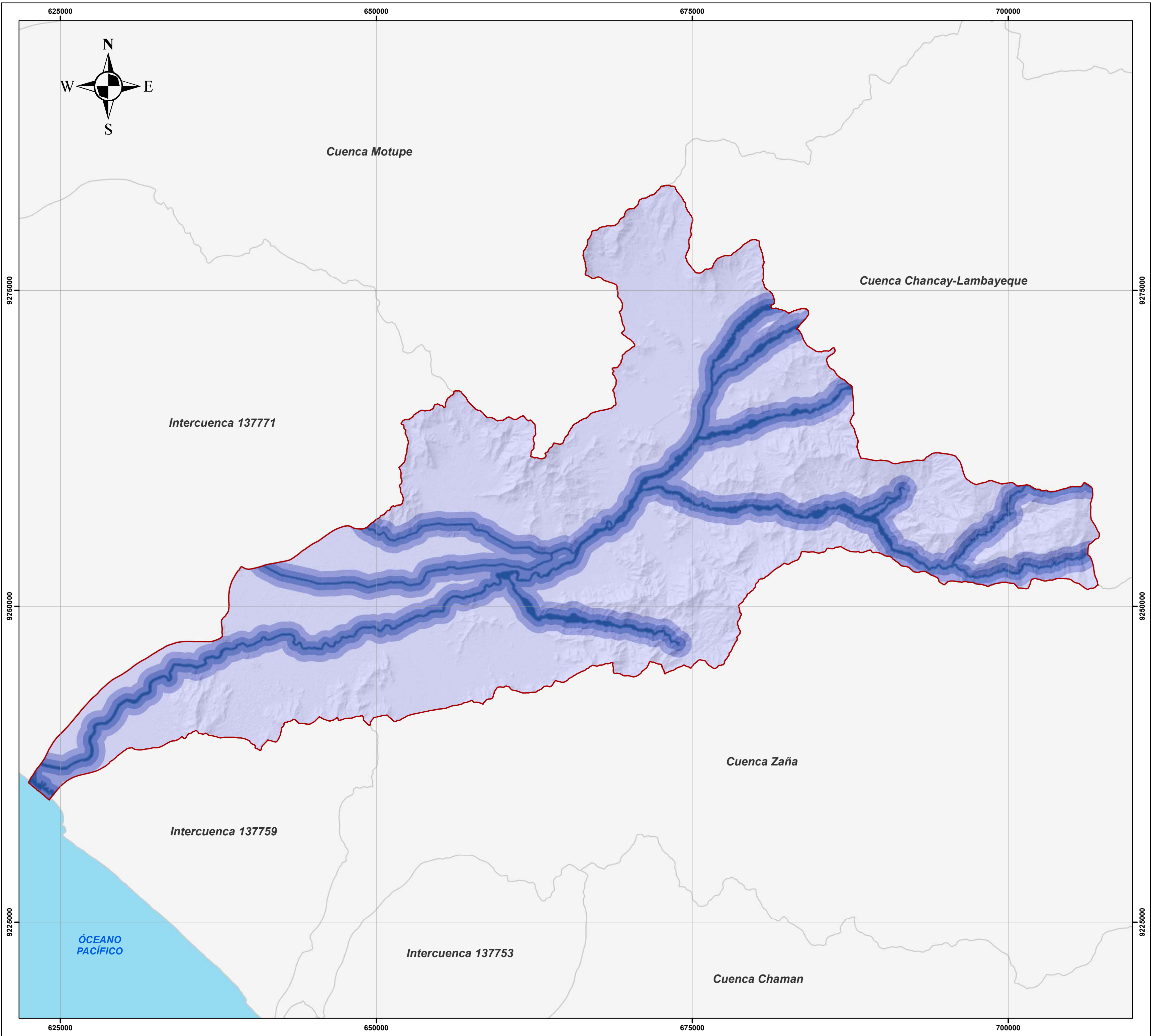
| USO ACTUAL DE SUELOS |                                            |
|----------------------|--------------------------------------------|
|                      | Áreas urbanizadas                          |
|                      | Áreas industriales e infraestructura       |
|                      | Cultivos transitorios                      |
|                      | Cultivos permanentes                       |
|                      | Áreas agrícolas heterogéneas               |
|                      | Bosques                                    |
|                      | Área con vegetación herbácea y/o arbustivo |
|                      | Áreas húmedas costeras                     |
|                      | Aguas continentales                        |



| <b>UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS</b><br>FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA<br>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA                                    |                                       |                                |             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|-------------|
| <i>Determinación de zonas susceptibles a inundaciones y análisis comparativo del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y Random Forest (RF).<br/>Caso estudio: Cuenca baja del río Chancay-Lambayeque</i> |                                       |                                |             |
| MAPA DE USO ACTUAL DE SUELOS                                                                                                                                                                             |                                       |                                |             |
| <b>Elaborado:</b><br>Danny Anchelía<br>Ximena Mori                                                                                                                                                       | <b>Proyección:</b><br>UTM Zona 17 Sur | <b>Escala:</b><br>1:200 000    | <b>MAPA</b> |
| <b>Fuente:</b><br>IGN, INEI, ANA,<br>GORE Lambayeque                                                                                                                                                     | <b>DATUM:</b><br>WGS 84               | <b>Fecha:</b><br>Febrero, 2020 | <b>05</b>   |

## **Anexo N.º 07**

Mapa de distancia al río



UBICACIÓN GENERAL

SIGNOS CONVENCIONALES

- Cuencas hidrográficas
- Área de estudio

DISTANCIA DE RÍOS

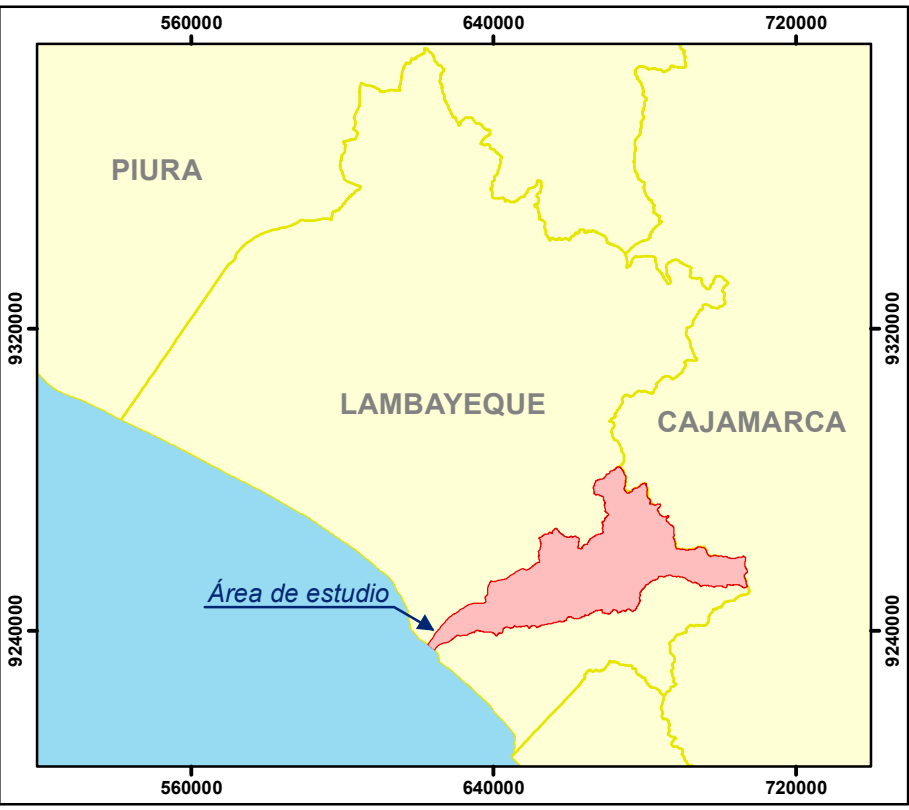
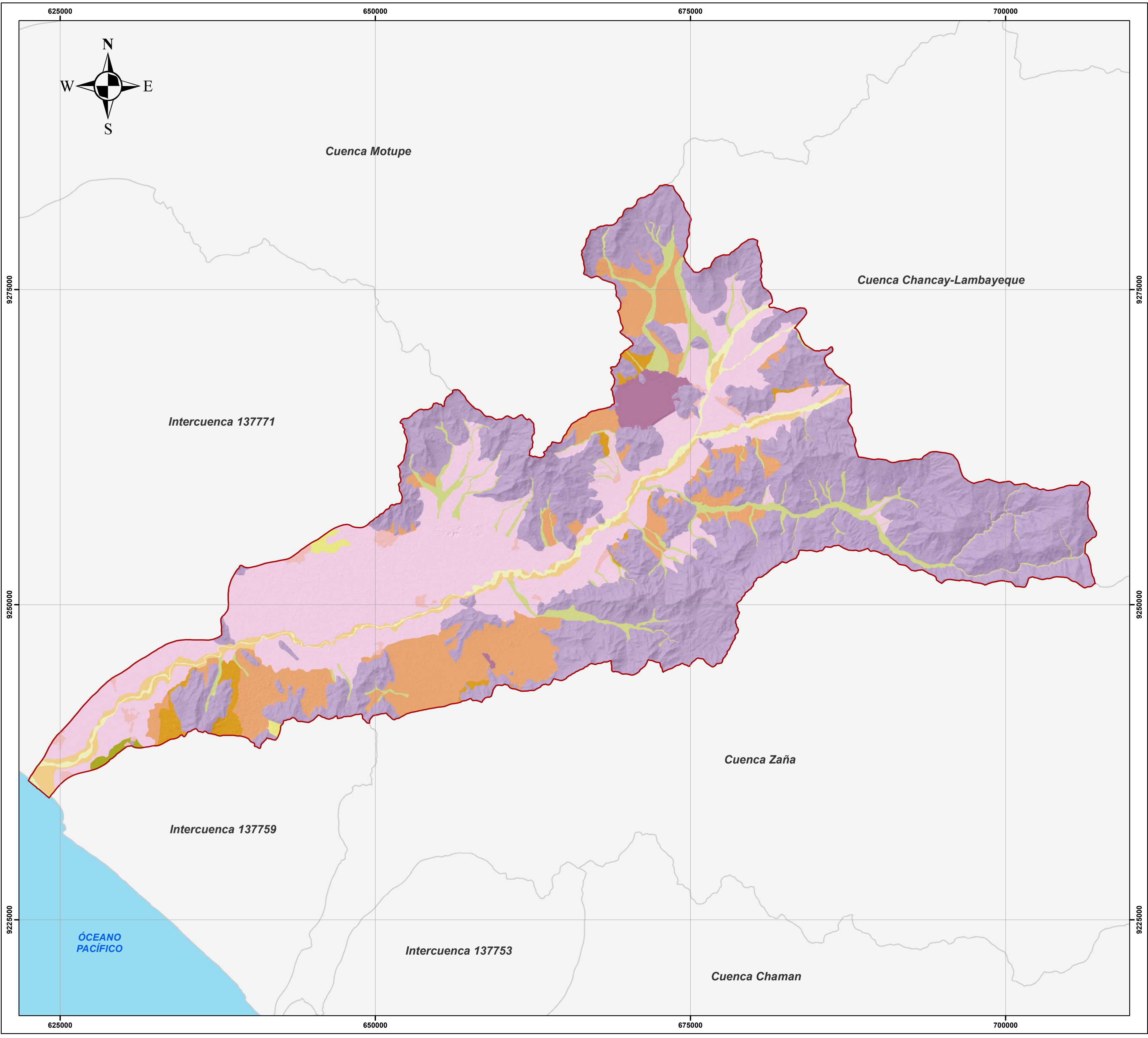
- < 20 metros
- 20 - 100 metros
- 100 - 500 metros
- 500 - 1000 metros
- > 1000 metros



|                                                                                                                                                                                                                                                             |                                       |                                |             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|-------------|
|  <b>UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS</b><br>FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA<br>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA |                                       |                                |             |
| <i>Determinación de zonas susceptibles a inundaciones y análisis comparativo del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y Random Forest (RF).<br/>Caso estudio: Cuenca baja del río Chancay-Lambayeque</i>                                                    |                                       |                                |             |
| <b>MAPA DE DISTANCIA DE RÍOS</b>                                                                                                                                                                                                                            |                                       |                                |             |
| <b>Elaborado:</b><br>Danny Anchelía<br>Ximena Mori                                                                                                                                                                                                          | <b>Proyección:</b><br>UTM Zona 17 Sur | <b>Escala:</b><br>1:200 000    | <b>MAPA</b> |
| <b>Fuente:</b><br>IGN, INEI, ANA,<br>GORE Lambayeque                                                                                                                                                                                                        | <b>DATUM:</b><br>WGS 84               | <b>Fecha:</b><br>Febrero, 2020 | <b>06</b>   |

## **Anexo N.º 08**

Mapa de geología



UBICACIÓN GENERAL

| SIGNOS CONVENCIONALES |                       |
|-----------------------|-----------------------|
|                       | Cuencas hidrográficas |
|                       | Área de estudio       |

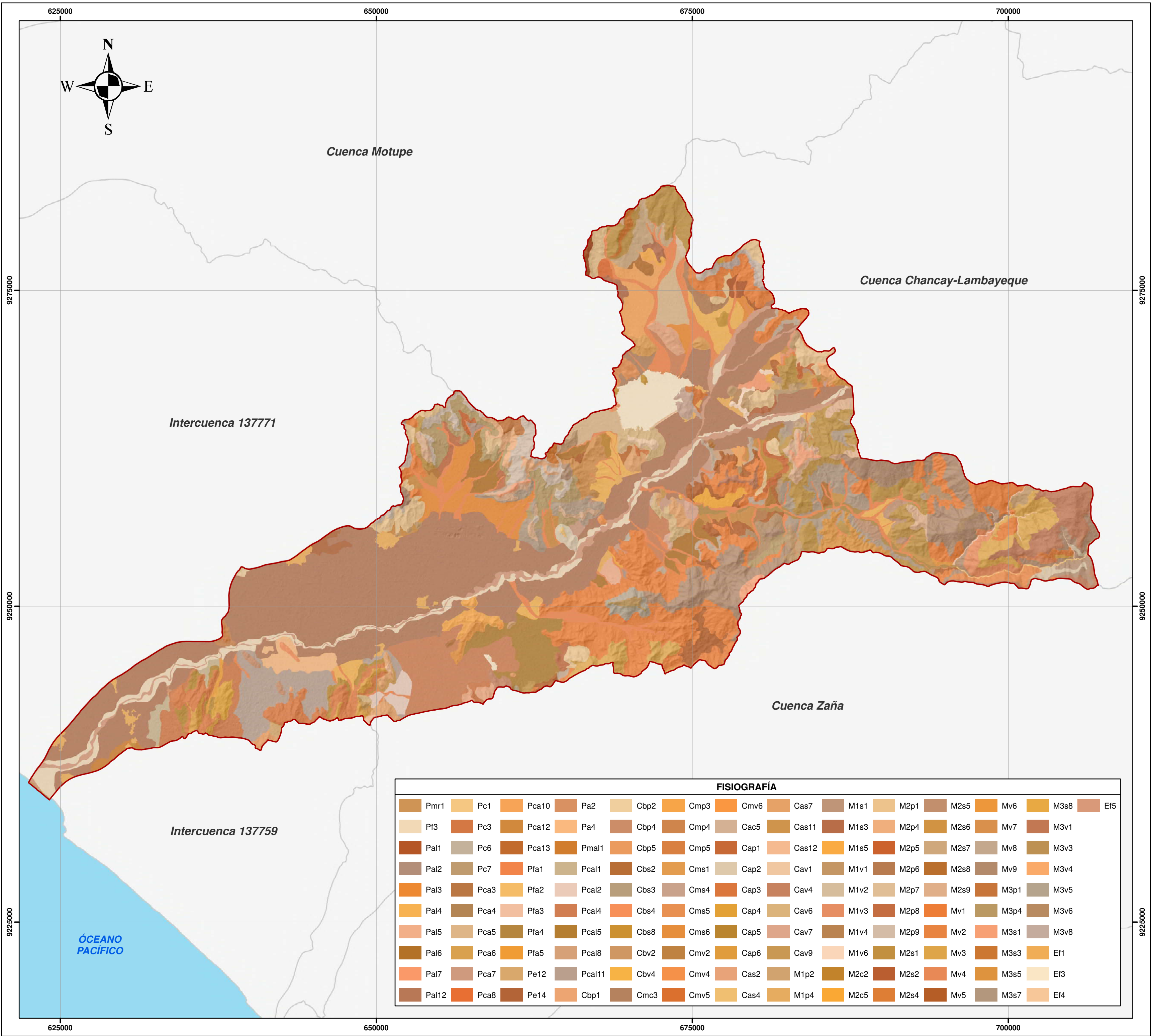
| GEOLOGÍA |                           |
|----------|---------------------------|
|          | Área urbana               |
|          | Depósito aluvial          |
|          | Depósito aluvial antiguo  |
|          | Depósito coluvial         |
|          | Depósito eólico reciente  |
|          | Depósito fluvial reciente |
|          | Depósito fluvio aluvial   |
|          | Depósito marino reciente  |
|          | Represa                   |
|          | Roca                      |
|          | Río                       |
|          | Tablazo Tarma             |



|  <b>UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS</b><br>FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA<br>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA |                                       |                                |             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|-------------|
| <i>Determinación de zonas susceptibles a inundaciones y análisis comparativo del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y Random Forest (RF).<br/>Caso estudio: Cuenca baja del río Chancay-Lambayeque</i>                                                    |                                       |                                |             |
| MAPA DE GEOLOGÍA                                                                                                                                                                                                                                            |                                       |                                |             |
| <b>Elaborado:</b><br>Danny Anchelía<br>Ximena Mori                                                                                                                                                                                                          | <b>Proyección:</b><br>UTM Zona 17 Sur | <b>Escala:</b><br>1:200 000    | <b>MAPA</b> |
| <b>Fuente:</b><br>IGN, INEI, ANA,<br>GORE Lambayeque                                                                                                                                                                                                        | <b>DATUM:</b><br>WGS 84               | <b>Fecha:</b><br>Febrero, 2020 | <b>07</b>   |

## **Anexo N.º 09**

Mapa fisiográfico



| SIGNOS CONVENCIONALES |                       |
|-----------------------|-----------------------|
|                       | Cuencas hidrográficas |
|                       | Área de estudio       |





**UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS**  
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA**

*Determinación de zonas susceptibles a inundaciones y análisis comparativo del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y Random Forest (RF).  
Caso estudio: Cuenca baja del río Chancay-Lambayeque*

**MAPA FISIOGRÁFICO**

|                                                      |                                       |                                |             |
|------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|-------------|
| <b>Elaborado:</b><br>Danny Anchelía<br>Ximena Mori   | <b>Proyección:</b><br>UTM Zona 17 Sur | <b>Escala:</b><br>1:200 000    | <b>MAPA</b> |
| <b>Fuente:</b><br>IGN, INEI, ANA,<br>GORE Lambayeque | <b>DATUM:</b><br>WGS 84               | <b>Fecha:</b><br>Febrero, 2020 | <b>08</b>   |