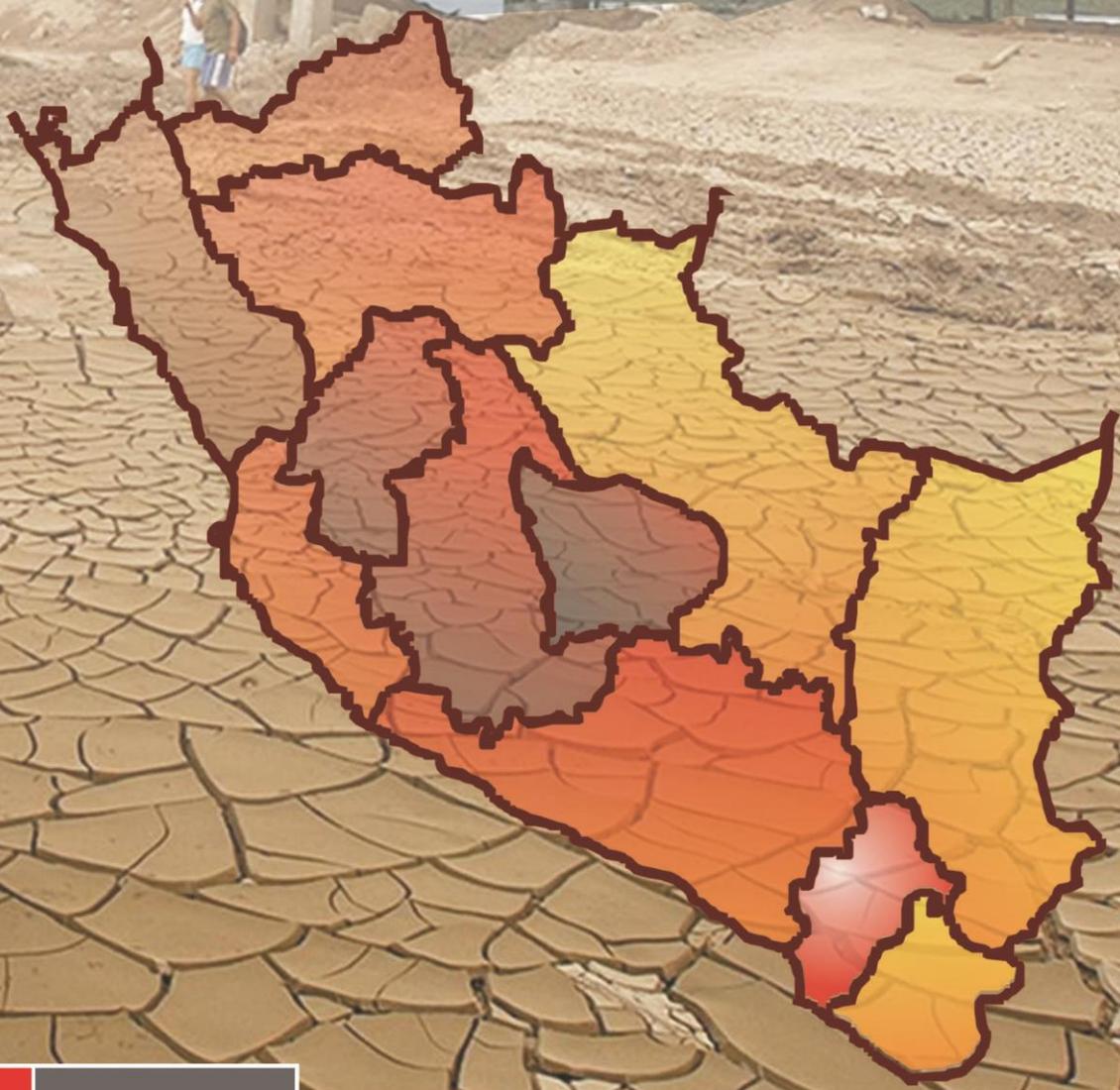


ANÁLISIS DEL RIESGO DE SEQUÍAS EN EL SUR DEL PERÚ





DIRECTORIO

Ing. Amelia Díaz Pabló
Presidenta Ejecutiva del SENAMHI

Ing. Oscar G. Felipe Obando
Director de la Dirección de Hidrología del SENAMHI

Mg. Sc. Julia Y. Acuña Azarte
*Subdirectora de Estudios e Investigaciones Hidrológicas del
SENAMHI*

REVISOR DEL ESTUDIO

Mg. Sc. Julia Y. Acuña Azarte
*Subdirectora de Estudios e Investigaciones Hidrológicas del
SENAMHI*

RESPONSABLE DEL ESTUDIO

Ing. Fiorella Vega Jácome
Especialista en Hidrología del SENAMHI

Lima-Perú
Noviembre - 2016

ÍNDICE

ÍNDICE	i
LISTA DE TABLAS	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
ANEXOS	iv
1. INTRODUCCIÓN	2
2. EL MARCO TEÓRICO	3
2.1 Sequía	3
2.1.1 Sequía meteorológica	3
2.1.2 Sequía hidrológica.....	3
2.1.3 Sequía agrícola	3
2.1.4 Sequía subterránea	3
2.2 Índice Estandarizado de Precipitación	3
2.3 Características de las Sequías.....	5
2.4 Riesgo de Sequías	6
2.4.1 Peligro de Sequías	7
2.4.2 Vulnerabilidad de Sequías.....	7
3. MARCO METODOLÓGICO.....	7
3.1 Zona de Estudio	8
3.2 Datos Utilizados	10
3.3 Estimación del Riesgo de Sequías	10
3.4 Estimación del Peligro de Sequías	10
3.4.1 Análisis de Cópulas	13
3.4.2 Tipos de Cópulas	13
3.4.3 Cópulas Arquimedianas.....	14
3.4.4 Selección de la Cópula de mejor ajuste.....	16
3.4.5 Distribuciones Marginales	16
3.5 Estimación de la Vulnerabilidad de Sequías	17
3.5.1 Factores de Vulnerabilidad.....	18
3.5.2 Sistema de ponderación propuesto para la integración de los factores de vulnerabilidad	21
3.5.3 Cálculo de la Vulnerabilidad	22
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES	23
4.1 Peligro de Sequías.....	23
4.2 Vulnerabilidad de Sequías.....	26
4.3 Riesgo de Sequías.....	28
5. CONCLUSIONES	30
6. REFERENCIAS BILIOGRÁFICAS.....	31

LISTA DE TABLAS

Tabla 3- 1 Sistema de pesos y tasas para la formulación del DHI	12
Tabla 3- 2 Sistema de pesos y tasas para la formulación del DHI	12
Tabla 3- 3 Pesos asignados a las subclases de los factores de vulnerabilidad considerados.....	21
Tabla 3- 4 Distritos bajo los diferentes niveles de vulnerabilidad.....	22
Tabla 4-1 Distritos bajo los diferentes niveles de vulnerabilidad	26
Tabla 4-2 Distritos bajo los diferentes niveles de Riesgo	30

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Distribución normal estandarizada para el SPI. La humedad es expresada por valores positivos mientras que la sequía por valores negativos.....	5
Figura 2-2 características de las sequías basadas en el SPI.....	6
Figura 4-1 Peligro de Sequías estimado en base a la probabilidad bivariada de la severidad y duración de las sequías	23
Figura 4-2 Distribución espacial de las cópulas de mejor ajuste para la estimación del Peligro de sequía	24
Figura 4-3 Peligro de Sequías promedio a nivel distrital	25
Figura 4-4: Factores de vulnerabilidad ponderados	27
Figura 4-5 Vulnerabilidad a las sequías a nivel distrital	28
Figura 4-6 Riesgo de sequías a nivel distrital para el sur del Perú	29

ANEXOS

Anexo 1: MAPA DE FACTORES FÍSICOS Y AMBIENTALES CONSIDERADOS

Mapa 1: Elevación digital del terreno	34
Mapa 2: Pendiente en grados	35
Mapa 3: Uso de Suelos	36
Mapa 4: Tipo de Suelos	37
Mapa 5: Inventario de presas de agua en el Perú.....	38
Mapa 6: Distancia a ríos principales.....	39
Mapa 7: Índice de Desarrollo Humano por distrito	40
Mapa 8: Población al año 2009	41

Anexo 2: MAPAS DE RIESGO POR DEPARTAMENTO

Mapa 9: Riesgo de Sequías en Lima	43
Mapa 10: Riesgo de Sequías en Lima	44
Mapa 11: Riesgo de Sequías en Ica	45
Mapa 12: Riesgo de Sequías en Huancavelica	46
Mapa 13: Riesgo de Sequías en Ayacucho	47
Mapa 14: Riesgo de Sequías en Apurímac	48
Mapa 15: Riesgo de Sequías en Cusco	49
Mapa 16: Riesgo de Sequías en Cusco	50
Mapa 17: Riesgo de Sequías en Arequipa	51
Mapa 18: Riesgo de Sequías en Moquegua	52
Mapa 19: Riesgo de Sequías en Tacna	53

RESUMEN

La sequía es uno de los mayores desastres naturales en el Perú, que ocasiona enormes pérdidas económicas, principalmente en el sector agrícola; sin embargo, es un tema poco estudiado en nuestro ámbito desde un enfoque de investigación aplicada. Asimismo, es conocido que el fenómeno de El Niño (ENSO) tiene gran influencia en las sequías de la zona sur del Perú, lo cual sumado a una agricultura de secano con escasa tecnificación, hacen de esta una zona muy sensible a las sequías.

En este contexto, el presente estudio evalúa el riesgo de sequías en el sur del Perú, estimado en base al peligro y la vulnerabilidad de sequías. Para este propósito se utilizó la base de datos de precipitación grillada del SENAMHI, PISCO V1.1 (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations) e información espacializada de factores físicos, ambientales y socioeconómicos.

Para determinar el peligro de sequías se definió el Índice de Peligro de Sequías (DHI), el cual se estimó en base al análisis bivariado de la duración y la severidad de las sequías, estimadas con la base PISCO y para determinar la vulnerabilidad, se realizó la ponderación de los factores de vulnerabilidad relacionados la elevación, pendiente, uso de suelo, textura de suelo, disponibilidad de presas de agua, distancia a ríos, densidad poblacional e Índice de Desarrollo Humano (IDH).

Como resultado se obtuvieron mapas de peligro, vulnerabilidad y riesgo para la región sur del Perú, el permitió definir los distritos con mayor riesgo de sequías en los 11 departamentos (Lima, Apurímac, Ayacucho, Arequipa, Cusco, Huancavelica, Ica, Junín, Moquegua, Puno y Tacna) en estudio; se identificaron 24 distritos con riesgo de **sequías muy alto** y 210 con riesgo de **sequías alto**.

1. INTRODUCCIÓN

La sequía es uno de los desastres naturales más costosos y más extendidos (Bryant 2005), afectando gran variedad de sectores económicos (principalmente agricultura) (Hunt et al. 2014; Farhangfar et al. 2015), los ecosistemas y bosques; reduciendo por ende los medios de vida de la humanidad (Barlow et al. 2006). Las sequías son particularmente importantes en regiones donde las actividades económicas son altamente dependientes de los recursos hídricos (Vicente-Serrano et al. 2015).

A nivel mundial el promedio anual de sequías reportadas se ha incrementado más de tres veces desde los años 1970 (Carvajal-Velez 2008), asimismo, se prevé que el cambio climático incrementaría el ciclo hídrico, con mayor evapotranspiración y menor precipitación, lo que según algunos autores derivaría en un incremento en la frecuencia y duración de eventos de sequía (Leng et al. 2015); por lo que, numerosos estudios han resaltado la necesidad de planes de prevención y mitigación de sequías (Harding et al. 1995). Asimismo, estudios recientes han resaltado los efectos ambientales de las sequías en Sudamérica, donde aún en regiones húmedas como la Amazonía, las sequías severas están desencadenando incendios forestales (Brando et al. 2014), reducción de la producción de biomasa (Malhi et al. 2009) y mortalidad de especies forestales (Phillips et al. 2009).

La sequía puede ser clasificada en: meteorológica, hidrológica, agrícola y socioeconómica (Mishra and Singh 2010); sin embargo, la principal causa de un sequía es el déficit de precipitación sobre un área extensa y por periodo de tiempo considerable, a lo cual se le denomina sequía meteorológica. Este déficit de agua se propaga a través del ciclo hidrológico y da lugar a las otras clases de sequía (Tallaksen and Lanen 2004); por lo que, el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI), basado en las precipitaciones, resulta un buen indicador para evaluar las sequías por su buena relación con los impactos hidrológicos, agrícolas y ecológicos (Vicente-Serrano et al. 2012).

Los eventos de sequía tienen múltiples características, la cuales pueden ser definidas en base al SPI: duración, intensidad, severidad e interarriual (Mckee et al. 1993; Shiau 2006; Santos et al. 2011; Xu et al. 2014; Masud et al. 2015). Los cambios en cada una de estas características pueden generar impactos en el manejo de los recursos hídricos y la agricultura; en general, las sequías intensas aún con pequeñas o medianas duraciones pueden tener fuertes impactos en la agricultura, mientras sequías de mediana intensidad con largas duraciones pueden tener serios efectos en la provisión de agua (Ge et al. 2016); por ello la importancia de estudiar la distribución espacio temporal de las sequías y conocer sus características.

En este contexto, el presente trabajo plantea la realización de un análisis del riesgo de sequías para el sur del Perú, por ser ésta la región más afectada por las sequías a nivel nacional. En esta evaluación se consideraron las características de las sequías meteorológicas (Peligro de sequías), así como aspectos físicos, ambientales y sociales propios de la zona de estudio (Vulnerabilidad a las sequías).

2. EL MARCO TEÓRICO

Sequía

Tallaksen y Van Lanen (2004), definieron la sequía como la ocurrencia de disponibilidad de agua por debajo del promedio natural de manera sostenida y a escala regional. Las sequías están generalmente asociadas con un periodo continuo de precipitaciones escasas, baja humedad del suelo o disponibilidad de agua, en relación a los niveles normales en una determinada localidad y a los cuales la comunidad afectada está acostumbrada. A pesar de que la sequía es un componente natural del clima, en las regiones climáticas áridas y semiáridas, también puede ocurrir en áreas que normalmente reciben adecuada precipitación (Li and Makarau 1994). La definición basada en la desviación de las condiciones normales o de estados de referencia implica que las sequías pueden ocurrir en cualquier región hidroclimatológica y en cualquier parte del año con la misma probabilidad. Para propósitos prácticos, la sequía puede ser clasificada en: meteorológica, hidrológica, agrícola y subterránea (Wilhite y Glantz, 1985).

2.1.1 Sequía meteorológica

La principal causa de una sequía es el déficit de precipitación sobre un área extensa y por periodo de tiempo considerable, a lo cual se le denomina sequía meteorológica; este déficit es usualmente expresado como un valor relativo respecto a las condiciones climáticas normales. El déficit de agua se propaga a través del ciclo hidrológico y da lugar a los diferentes tipos de sequía. (Tallaksen y Van Lanen, 2004).

2.1.2 Sequía hidrológica

El déficit de precipitación en un periodo prolongado resultará en una deficiencia de escorrentía, aguas subterráneas o de los niveles de reservorios, lo cual es conocido como sequía hidrológica, la cual persistirá por un periodo de tiempo determinado, después de que la sequía meteorológica haya terminado.

2.1.3 Sequía agrícola

La deficiencia de agua en el suelo combinado con altas tasas de evaporación podrían causar el desarrollo de una sequía. El término sequía agrícola es usado cuando la humedad del suelo es insuficiente para mantener los cultivos (Tallaksen and Lanen, 2004). Debido a que la cantidad de agua que necesita cada cultivo es distinta, no es posible establecer umbrales de sequía agrícola válidos ni tan siquiera para una única área geográfica (Valiente, 2001).

2.1.4 Sequía subterránea

La sequía subterránea, es una clase distinta de sequía, no una subclase de la meteorológica, hidrológica o agrícola. Cuando los sistemas de aguas subterráneas son afectados por las sequías, decrecen primero las recargas y luego los niveles y descargas de aguas subterráneas (Van Lanen and Peters, 2000). La sequía subterránea se da como consecuencia de una recarga insuficiente de acuíferos. El nivel del acuífero es considerado como el indicador más apropiado de este tipo de sequía.

Índice Estandarizado de Precipitación

El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), por sus siglas en inglés, fue creado por McKee et al. (1993) y es un índice de probabilidad que nos da una representación de los periodos secos y húmedos anormales; cuantificando el déficit de precipitación en distintas escalas de tiempo. Se basa en el uso de series de tiempo de precipitación mensual y su correspondiente ajuste a la función de distribución de probabilidad Gamma, que posteriormente es transformada en la función normal. Producto del ajuste y la transformación, cada dato de SPI calculado representa el número de desviaciones estándar que un dato está alejado de la media muestral.

La Organización Meteorológica Mundial (OMS), recomienda que todos los servicios meteorológicos e hidrológicos deberían utilizar el SPI para el monitoreo de las sequías a nivel nacional.

Sin embargo, es necesario tener en cuenta que el SPI está basado solamente en la precipitación y provee una medida de la provisión de agua, el índice es muy útil como una medida de los déficits de precipitación o sequías meteorológicas pero su limitación radica en que no considera la evapotranspiración. (Trenberth et al., 2014)

Una de las fortalezas notables del SPI es la distribución de probabilidad normalizada (Ver Fig. 2), de manera que tanto la sequía como la humedad pueden ser comparados a través de diferentes regiones (Qin et al. 2015). El valor numérico del SPI hace referencia a la desviación estándar de la precipitación medida de una función de distribución de probabilidad dada.

Suponiendo que x es precipitación mensual acumulada en la escala de tiempo de la investigación (1 mes, 3 meses, 6 meses, 12 meses, etc.), la cual se ajusta a una función de densidad de probabilidad $g(x)$ como sigue:

$$g(x) = \frac{x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)}, x > 0 \quad ; \quad \Gamma(x) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx$$

Dónde x es la precipitación acumulada, $\Gamma(x)$ es la función gamma, α y β son los parámetros de forma y escala respectivamente, los cuales pueden ser estimados por el método de máxima verosimilitud (Guttman 1999) como sigue:

$$\alpha = \frac{1 + \sqrt{1 + 4A/3}}{4A}, \beta = \frac{x}{\alpha} \quad A = \ln(\bar{x}) + \frac{\sum \ln(x)}{n}$$

Dónde n es la longitud de la serie de tiempo (meses). Luego la probabilidad acumulada de precipitación x en la escala de tiempo dada es expresada como:

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx \quad (1)$$

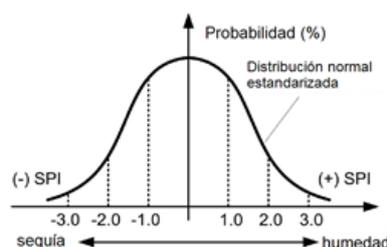


Figura 2-1 Distribución normal estandarizada para el SPI. La humedad es expresada por valores positivos mientras que la sequía por valores negativos

Si $t=x/\beta$, la ecuación (1) se transforma en una función gamma incompleta:

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (2)$$

La ecuación (2) no considera la situación extrema donde la precipitación mensual acumulada $x=0$. Como resultado, la ecuación (2) es modificada como $H(x)$:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x)$$

Donde q es la probabilidad de $x=0$, es decir, la frecuencia de ocurrencia de $x=0$ en todas las series observadas. Cuando son transformadas en la función de distribución estandarizada normal, el SPI se expresa como:

$$SPI = \begin{cases} -\left(t - \frac{c_0 + c_1 + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right), & t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{H(x)^2}\right)}, & 0 < H(x) \leq 0.5 \\ t - \frac{c_0 + c_1 + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}, & t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1 - H(x))^2}\right)}, & 0.5 < H(x) \leq 1 \end{cases}$$

Donde las constantes equivalen a: $c_0 = 2.515517$, $c_1 = 0.802853$, $c_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$ y $d_3 = 0.001308$.

El índice SPI permite determinar la intensidad del evento de sequía y los periodos de retorno del mismo (Mishra and Singh 2011), además de las demás características de las sequías definidas para el presente estudio.

Características de las sequías

Para definir los eventos secos se utilizó un nivel de umbral fijo, que no varía en espacio ni tiempo y se aplicó a las series de SPI de todas las estaciones. El umbral definido fue de 20% de la probabilidad acumulada ($SPI < -0.84$), basado en el ajuste a una distribución normal estándar, por lo que se registró un evento de sequía cuando el SPI estaba debajo del umbral, como se muestra en la Fig. 3. Basado en este umbral se caracterizó cada evento de sequía en términos de su duración, severidad e intensidad. La duración se definió como el periodo consecutivo e ininterrumpido de tiempo con valores de SPI por debajo del umbral (meses), la severidad se definió como la suma de los déficits de un evento de sequía y la intensidad se definió como el valor más bajo del SPI durante un evento de sequía.

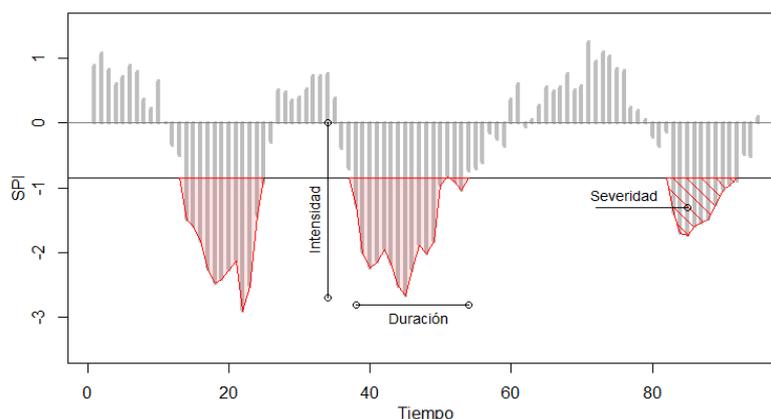


Figura 2-2 características de las sequías basadas en el SPI

Riesgo de sequías

El riesgo es la probabilidad de consecuencias perjudiciales o pérdidas esperadas como resultado de interacciones entre amenazas y condiciones vulnerables. Por lo tanto, un enfoque conceptual para la evaluación del riesgo se puede descomponer en una combinación de la amenaza y la vulnerabilidad. Similar a otros riesgos de desastres naturales, el riesgo de sequía depende de una combinación de la naturaleza física de la sequía y el grado en que una población o actividad es vulnerable a los efectos de la sequía (Shahid y Behrawan 2008). La evaluación del riesgo de sequía es una tarea difícil, porque la sequía es un fenómeno muy complejo y poco comprendido, que carece de una definición universal y los criterios de inicio (Wilhite 2000). La sequía no sólo se ve afectada por los factores naturales tales como la meteorología y la hidrología, sino también por estructuras de plantación de los cultivos y capacidades de resistencia a la sequía (Huo et al., 2003). Por lo general se estima en términos de sequía peligrosidad, vulnerabilidad, la exposición y la sequía, la resistividad. Por lo tanto, para estudiar el riesgo de sequía, es esencial para estudiar la frecuencia, severidad y extensión espacial de la sequía, así como la capacidad infraestructural y socioeconómica de la región para anticipar y hacer frente a la sequía. Los siguientes pasos se pueden utilizar para identificar la evaluación del riesgo de sequía:

- Identificar el peligro de la sequía con respecto a su extensión espacial, la frecuencia y la severidad.
- Identificar y cuantificar vulnerabilidad a la sequía, por ejemplo, las personas, la economía y la estructura expuesta al peligro de sequía.
- Calcular el riesgo de sequía a partir del peligro de sequía y vulnerabilidad.

La evaluación del riesgo de sequía en un área en particular desempeña un papel importante en la gestión de los recursos hídricos (Bordi et al., 2006). Desde el tradicional "crisis de la sequía la gestión de desastres" (Wilhite y Glantz 1985) a la moderna "gestión del riesgo de desastres sequía", que es la tendencia internacional de investigación de desastres sequía (AMS 1997). Riesgo de sequía, sin definición universal, se evalúa por lo general en términos de su impacto en las actividades humanas, sistemas económicas, sociales y ambientales. El propósito de la evaluación del riesgo de sequía es identificar las acciones apropiadas que se pueden tomar para reducir la pérdida de la posibilidad de daños. Con base en los resultados de la evaluación del riesgo de sequía, los tomadores de decisiones pueden visualizar el peligro y apreciar la pérdida de los productores agrícolas, administradores de

recursos naturales, y otros (Zhang et al., 2011a, b). La mayoría de los métodos de evaluación del riesgo de sequía momento, centrarse en la peligrosidad sequía y vulnerabilidad.

2.1.5 Peligro de Sequías

La sequía también se relaciona con el momento (es decir, la estación principal de ocurrencia, los retrasos en el inicio de la estación de lluvias, la ocurrencia de lluvias en relación con las principales etapas de crecimiento) y la efectividad de las lluvias (es decir, eventos). Así, cada año de sequía es único en sus características climáticas e impactos.

El peligro es el potencial para un incidente importante. Para elaborar, el término se refiere a la probabilidad de ocurrencia, dentro de un período de tiempo especificado en un área dada, de un fenómeno natural potencialmente dañino. Cada peligro plantea un nivel de riesgo que varía espacialmente y temporalmente y que ocurre con distintos grados de intensidad y severidad. La sequía, desde una perspectiva meteorológica, es un evento natural, y poco se puede hacer para reducir la frecuencia o gravedad del evento. Un componente crítico de la gestión de la sequía es la caracterización del riesgo asociado con el peligro.

2.1.6 Vulnerabilidad de Sequías

La evaluación de la vulnerabilidad de la sequía proporciona un marco para la identificación de las causas sociales, económicas y ambientales de impactos de la sequía. Es uno de los principales aspectos de la planificación para la sequía, mitigación y reducción de la brecha entre la evaluación del impacto y la formulación de políticas por dirigir la atención de políticas a la causa subyacente de la vulnerabilidad en lugar de los efectos negativos derivados de los eventos desencadenantes, como las sequías. Con un mapa de vulnerabilidad a la sequía, los tomadores de decisiones pueden visualizar el riesgo de peligros y transmitir información de la vulnerabilidad a otros sectores para asegurar que van a actuar de una manera oportuna y eficaz para hacer frente a las pérdidas causadas por la sequía.

La vulnerabilidad a la sequía es dinámico y está influenciada por una multitud de factores, incluyendo aumentos y cambios regionales en la población, la urbanización, la tecnología, las políticas gubernamentales, el uso del suelo y otras prácticas de manejo de recursos naturales, los procesos de desertificación, las tendencias de uso del agua, y el aumento de la conciencia ambiental (Abdel-aziz, et al. 2012). Para determinar vulnerabilidad a la sequía, la tarea más importante y más difícil es seleccionar los factores y determinar la ponderación de esos factores, que es comúnmente subjetiva y puede variar entre regiones.

En este sentido, la evaluación de la vulnerabilidad dependerá fuertemente de los factores elegidos para su estimación, por lo que se debe considerar el uso de los factores razonablemente más influyentes en el nivel de vulnerabilidad a la sequía, teniendo en cuenta que el análisis de la vulnerabilidad implica evaluar la exposición, susceptibilidad y resiliencia ante una amenaza.

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Zona de Estudio

La zona de estudio está representado por la región sur del Perú (Fig. 3-1). El Perú, país localizado geográficamente en la fracción central y occidental de América del Sur, se extiende de 0° 02' N a 18° 21' S de latitud y de 81° 19' W a 68° 39' W de longitud, con un rango de elevaciones de 0 msnm a 6 768 msnm (Nevado Huascarán) y tiene una superficie total de 1 285 000 km².

El Perú está dividido en 3 vertientes hidrográficas: Pacífico (VP), Atlántico (VA) y Lago Titicaca (VT); las cuales poseen características físicas y climáticas diferentes entre sí. Los climas en el Perú van desde lo costero árido y cálido, pasando por los valles interandinos de tipo templado, frígido y polar hasta los de tipo cálido y lluvioso de la selva, esto debido a que el Perú es uno de los países con mayor variedad de climas en el mundo pues posee 27 de los 32 climas existentes (SENAMHI 2002), lo cual es influenciado por tres factores básicos: la situación del país en la zona intertropical, las modificaciones altitudinales que introduce la cordillera de los Andes y la corriente peruana o de Humboldt, cuyas aguas recorren las costas del país.

El promedio de temperaturas del Perú varía de una vertiente a otra, así, en la vertiente del Pacífico, la temperatura fluctúa entre menos de 6 °C y 22 °C, alcanzando un promedio multianual de 16.6 °C (PHI-UNESCO 2006); en la vertiente del Atlántico fluctúa entre menos de 11.1 °C y 24.1 °C, alcanzando un promedio multianual de 15.2 °C para la región correspondiente a los Andes y 25.7 °C para la región del bosque lluvioso (Lavado Casimiro et al. 2013) y en la vertiente del Lago Titicaca fluctúa entre menos de 6 °C y 14 °C, alcanzando un promedio multianual de 8.9 °C (PHI-UNESCO 2006).

El régimen de precipitaciones por vertientes en el Perú fue caracterizado por PHI-UNESCO (2006), en la vertiente del Pacífico las precipitaciones fluctúan entre 0 mm y 750 mm, alcanzando un promedio multianual de 274.3 mm; en la vertiente del Atlántico fluctúan entre 0 mm y 5 500 mm, alcanzando un promedio multianual de 2 060.8 mm, mientras que en la vertiente del Lago Titicaca fluctúan entre 0 mm y 1 500 mm, alcanzando un promedio multianual de 813.5 mm.

La zona de estudio abarca los departamentos de Lima, Apurímac, Ayacucho, Arequipa, Cusco, Huancavelica, Ica, Junín, Moquegua, Puno y Tacna. Esta región se consideró de importancia para el estudio de la sequía debido a la mayor recurrencia de eventos de sequía en esta zona durante los eventos del ENSO (En Niño Oscilación del Sur) y a la fuerte dependencia de las precipitaciones para la agricultura de subsistencia en esta región.

Debido a que la aridez es una característica permanente del clima y está restringida a áreas con bajas precipitaciones (Wilhite 1992), se definió una máscara para la zona árida en nuestra zona de estudio, representadas por la zona costera del Perú.

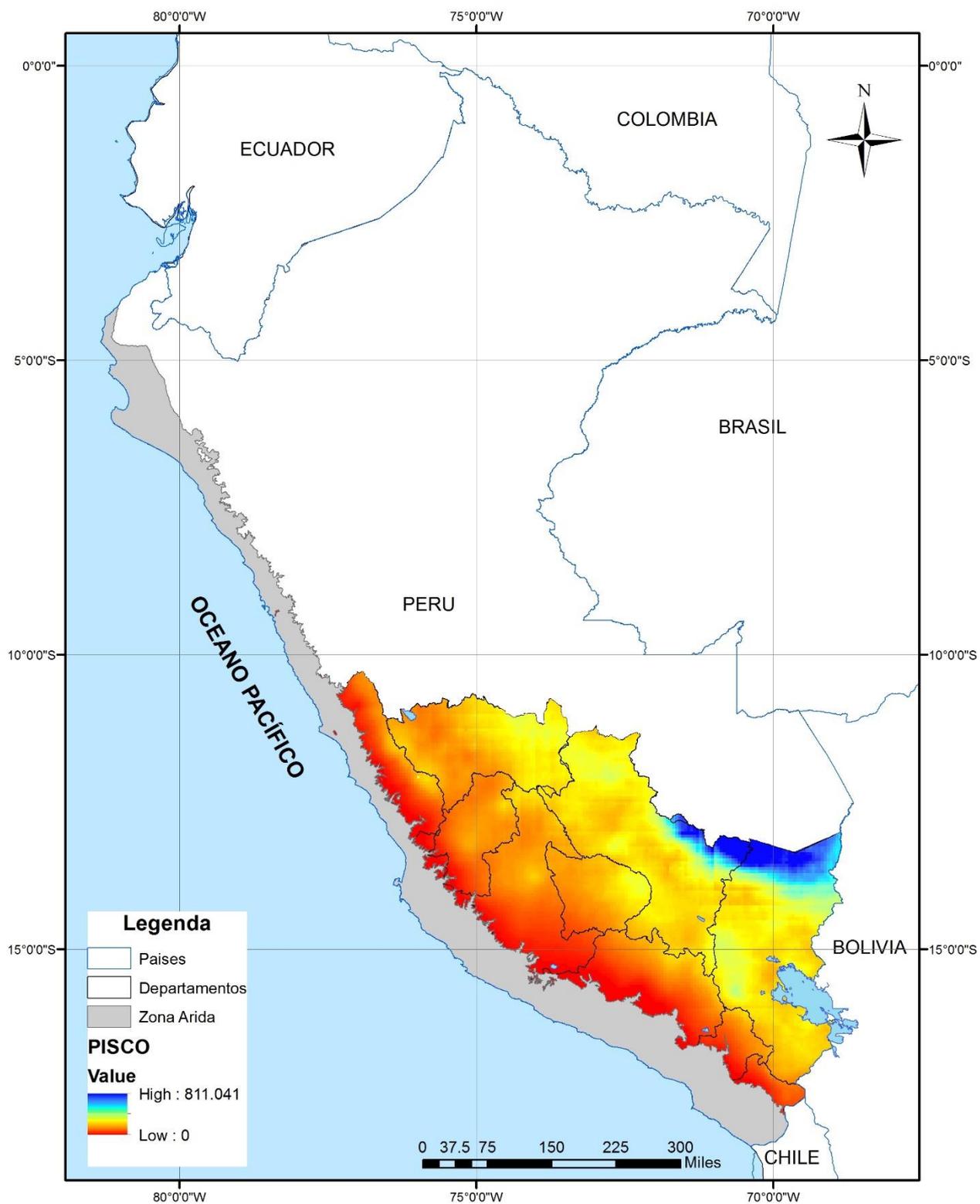


Figura 3-1 Zona de estudio. Se muestran los límites departamentales y la zona árida en color gris.

3.2 Datos utilizados

Los datos de precipitación mensual utilizados en el presente estudio corresponden a los datos grillados del Producto PISCO (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations), los cuales combinan información de estaciones del SENAMHI con datos de sensoramiento remoto de precipitaciones (CHIRP) que tienen como período de datos desde Enero de 1981 hasta Enero del 2016 (ver referencia sobre el producto PISCO de precipitación en http://ons.snirh.gob.pe/Peru/maproom/Monitoring/Meteorological/PISCO_reporte.pdf).

3.3 Estimación del riesgo de sequías

En este estudio, la evaluación del riesgo de sequía se lleva a cabo combinando las evaluaciones de riesgo y vulnerabilidad. En este sentido, el índice de riesgo de sequía (DRI) se calcula como:

$$DRI = DHI \times DVI \quad (8)$$

Donde DHI y DVI son índices agregados de peligro de sequía y vulnerabilidad. Si DVI o DHI es 0, no habrá ningún riesgo asociado con ese evento de sequía. El mayor valor de DVI o DHI resultará en un mayor riesgo de la sequía.

3.4 Estimación del peligro de sequías

La estimación del peligro o amenaza de sequías se basa en el análisis de la probabilidad de sequía en una determinada ubicación lo cual para este caso en específico se calculó mediante el método de Cópulas, el cual se basa en el análisis de distribución de frecuencias bivariado.

En este estudio se utilizaron las curvas de Severidad-Duración-Frecuencia para estimar la probabilidad bivariada de ocurrencia de sequías, las cuales se obtuvieron mediante la aplicación de las cópulas. Los pasos implicados en derivar las curvas S-D-F se resumen a continuación:

1. Ajustar la severidad y la duración a una distribución adecuada. Los estadísticos de bondad de ajuste estándar pueden ser elegidos para decidir sobre la mejor distribución marginal apropiado para la severidad y la duración, respectivamente.
2. Construir una distribución conjunta y condicional de la severidad de la sequía y la duración utilizando una cópula apropiada de la familia de cópula Arquimedianas. Se utilizó el estadístico AIC (Akaike Information Criterion) como criterio para la elección de la cópula de mejor ajuste.
3. La relación entre la severidad de la sequía, la duración y la frecuencia en términos del intervalo de recurrencia de episodios de sequía puede ser representado por el intervalo de recurrencia condicional que se da de la siguiente manera:

$$T_{SID}(s|d) = \frac{1}{\gamma(1 - F_{SID}(s|d))}$$

Donde s y d denotar la severidad de la sequía y la duración, respectivamente; $F_{S|D}(s|d)$ es la CDF condicional de S dada $D = d$; $TS | D(s|d)$ es el intervalo de recurrencia condicional de S dada $D = d$; y γ es la tasa de llegada de eventos de sequía que deben estar ajustada con los datos observados. La CDF condicional se da como:

$$F_{S|D}(s|d) = \frac{\partial F_{S,D}(s, d)}{\partial F_D(d)}$$

Donde $F_D(d)$ es la CDF de la duración de la sequía, y $F_{S,D}(s, d)$ es la CDF conjunta de la gravedad de la sequía y la duración, que se deducirá a partir de la cópula.

La probabilidad conjunta, p , entonces fue estandarizada mediante la adopción de una normal inversa, obteniendo de este modo la probabilidad conjunta estandarizada (SJP) de ocurrencia:

$$SJP = \psi^{-1}(p)$$

Donde ψ es la función de distribución normal estándar.

4. Un sistema de ponderación basado en la función de distribución acumulativa de SJP se da en la Tabla 3, y la clasificación seguida por SJP será la misma que todos los otros índices estándar de sequía. Basado en esto, la clasificación "suave" (M) tendrá un valor de SJP que oscila entre 0 y -0,99 y se le da un peso de 1; La categoría "moderada" (MO), que oscila entre -1 y -1,49, recibió un peso de 2; La categoría "severa" (S) que oscila entre -1,5 y -1,99 fue ponderada como 3; Y la categoría "extrema" (E) que oscila entre -2 y fue ponderada como 4.
5. Después de fijar los pesos para varias categorías, cada categoría ponderada se dividió más en cuatro clasificaciones que van de 1 a 4. Esto se hizo utilizando Jenks natural ruptura de optimización que dividió las probabilidades reales de ocurrencia calculado para todas las cuadrículas que se encuentran dentro de la misma región de planificación identificados Por Rajsekhar et al. [2012] en cuatro calificaciones. El cálculo de un Índice de Peligro de Sequía (DHI) se realizó en base a la función de distribución acumulativa de SJP.
6. El DHI se calculó entonces combinando los pesos y las calificaciones de varias categorías, y se da como:

$$DHI = (M_r \times M_w) + (MO_r \times MO_w) + (S_r \times S_w) + (E_r \times E_w)$$

Donde M_r , MO_r , S_r y E_r representan las tasas de las categorías M, MO, S y E, respectivamente, y M_w , MO_w , S_w y E_w representan los pesos asignados para las categorías M, MO, S y E. Los valores de DHI fueron entonces re-escalados a un rango de 0-1 y clasificados uniformemente en cuatro grupos según se da en la Tabla 3-1.

Tabla 3- 1 Sistema de pesos y tasas para la formulación del DHI

Valor SJP	Clasificación	Pesos Asignados	Sub-clasificación de SJP	Tasas
-0.99 a 0.99	Casi normal	1	< -0.653	4
			-0.652 a -0.258	3
			-0.257 a 0.585	2
			>0.583	1
-1.0 a -1.49	Moderado	2	< - 1.480	4
			-1.470 a -1.166	3
			-1.326 a -1.166	2
			> -1.165	1
-1.5 a -1.99	Severo	3	< -1.733	4
			-1.732 a -1.644	3
			-1.643 a -1.583	2
			>-1.582	1
-2.0 o menos	Extremo	4	< -10.171	4
			-10.170 a -6.256	3
			-6.255 a -2.645	2
			>-2.644	1

Tabla 3- 2 Sistema de pesos y tasas para la formulación del DHI

Valor de DHI	Clasificación
0 a 0.25	Bajo
0.25 a 0.50	Moderado
0.50 a 0.75	Alto
0.75 a 1.00	Muy alto

3.4.1 Análisis de Cópulas

Las Cópulas son funciones que vinculan distribuciones de probabilidad univariadas para formar funciones de distribución multivariadas. La construcción de estas distribuciones se reduce al estudio de la relación entre variables aleatorias correlacionadas dadas las distribuciones marginales.

En ingeniería, las cópulas se usan en el control de procesos multivariados y en el modelado hidrológico. Investigaciones recientes se han centrado en una clase de cópulas llamada cópulas Arquimedianas, la cual agrupa varias familias de modelos cópula, con propiedades analíticas más sencillas. Muchas distribuciones bivariadas conocidas pertenecen a la clase de cópulas Arquimedianas. Estas cópulas son analíticamente sencillas y sus elementos tienen propiedades estocásticas que los hacen atractivos para el tratamiento estadístico de los datos. Además, las cópulas Arquimedianas pueden describir una gran diversidad de estructuras de dependencia.

3.4.2 Tipos de Cópulas

Existen muchos tipos de funciones cópula y es difícil encontrar en la literatura una clasificación clara de todas ellas dado que existen muy diversos criterios para hacerlo: en función de la dependencia o no de parámetros, de su soporte (continuo o discreto), del tipo de relación que reflejan (cópulas elípticas, cópulas de valor extremo, etc). Por ello, en vez de presentar un esquema general que permita ubicar cada cópula de acuerdo a una jerarquía concreta, enumeraremos algunos de estos criterios y citaremos algunos ejemplos asociados a las clases que resultan de su aplicación.

Tipos de cópulas en función del conocimiento explícito de su forma

Las cópulas se pueden clasificar también en función de que su expresión responda o no a una ecuación paramétrica, pudiendo distinguir entre:

1. **Cópulas paramétricas** Todas las cópulas que responden a una misma ecuación paramétrica definen una familia de cópulas. En ella, el parámetro (uniparamétricas) o parámetros (multiparamétricas) cuantifican de algún modo la relación de dependencia entre las variables que asocian.
2. **Cópulas no paramétricas** De igual manera existen familias de cópulas no paramétricas que son aquellas en cuya definición no participa ningún parámetro sino que, por su estructura empírica, se ajustan de forma local a los datos.

Dentro de uno y otro grupo, gozan de popularidad la clase de las cópulas arquimedianas caracterizada por la facilidad con que pueden ser construidas y por la gran variedad de estructuras de dependencia que permiten reproducir. A continuación se describirá algunos tipos de cópulas en función de la relación de dependencia.

3.4.3 Cópulas Arquimedianas

Existe una gran diversidad de familias que pertenecen a la clase arquimediana y gracias a esta variedad permiten, a diferencia de las elípticas (simétricas) y de las de valor extremo (muy orientadas a dependencias en las colas), recoger muchos tipos de estructuras de dependencia adicionales. Otra ventaja de este tipo de cópulas es la facilidad con la que pueden ser construidas.

Se han creado muchos tipos de cópulas que forman parte de la familia de cópulas Arquimedianas entre los que se encuentran las cópulas de Frank, Clayton y Gumbel entre otras.

Cópula de Frank

La función de distribución para la cópula de Frank está dada por:

$$C_a(u, v) = -\frac{1}{a} \ln \left(1 + \frac{(e^{-au} - 1)(e^{-av} - 1)}{e^{-a} - 1} \right)$$

Y la función de densidad:

$$C(u, v) = -ag_1 \left(\frac{1 + g_{u+v}}{(g_u g_v + g_1^2)} \right)$$

Para evaluar el grado de asociación entre las marginales en el modelo generado por la cópula de Frank, el coeficiente de correlación de Kendall correspondiente está dada por:

$$\tau(a) = 1 - \frac{4}{a} + \frac{4}{a^2} \int_0^a \frac{t}{e^t - 1} dt$$

La integral en esta expresión no tiene solución analítica, sin embargo, es posible usar métodos numéricos, que pueden dar buenas aproximaciones. La τ de Kendall de la cópula de Frank toma valores en el rango completo de concordancia.

Simulación de una cópula de Frank Para simular la cópula de Frank podemos utilizar el algoritmo siguiente:

Simulamos dos variables aleatorias uniformes v_1 y v_2 ;

$$u_2 = C^{-1}(v_2, u_1; \alpha) = -\frac{1}{\alpha} \ln \left(1 + \frac{v_2(e^{-\alpha} - 1)}{v_2 + (1 - v_2)e^{\alpha u_1}} \right)$$

Cópula de Gumbel

La función de distribución para la cópula de Gumbel es:

$$C_a(u, v) = \exp \left(- \left[(-\ln u)^a + (-\ln v)^a \right]^{\frac{1}{a}} \right)$$

La función de densidad:

$$c(u, v) = C(u, v)u^{-1}v^{-1} \left[(-\ln u)^a + (-\ln v)^a \right]^{-2+\frac{2}{a}} \left[\ln \cdot u \ln v \right]^{a-1} \left[1 + (a+1) \left[(-\ln u)^a + (\ln v)^a \right]^{-\frac{1}{a}} \right]$$

El coeficiente de correlación de Kendall, en función de su parámetro **a**, se define como:

$$\tau_a = 1 - \frac{1}{a}$$

Simulación de la cópula de Gumbel Para simular la cópula logística de Gumbel utilizamos el método de distribuciones.

Copula de Clayton

La función de distribución para la cópula de Clayton es:

$$C_a(u, v) = \left(u^{-\frac{1}{a}} + v^{-\frac{1}{a}} - 1 \right)^a$$

La función derivada de la cópula respecto de la componente **u** es:

$$C_1 = \left(\frac{\partial C_a(u, v)}{\partial u} \right) = u^{-1+\frac{1}{a}} \left[u^{-\frac{1}{a}} + v^{-\frac{1}{a}} - 1 \right]^{a-1}$$

y la densidad:

$$C(u, v) = \left(1 + \frac{1}{a} \right) (u \cdot v)^{-1-\frac{1}{a}} \left[u^{-\frac{1}{a}} + v^{-\frac{1}{a}} - 1 \right]^{a-2}$$

El coeficiente de correlación de Kendall, en función de su parámetro **a**, se define como:

$$\tau(a) = \frac{1}{2a + 1}$$

Cópula de Galambos

Galambos (1975) definió la siguiente cópula:

$$C(u_1, u_2) = u_1 u_2 \exp \left\{ \left[(1 - u_1)^{-\theta} + (1 - u_2)^{-\theta} \right]^{-1/\theta} \right\}$$

3.4.4 Selección de la Cópula de mejor ajuste

En un primer paso, se determinaron varios tipos de cópulas como candidatas a reflejar un tipo de relación entre las variables de estudio: Cópula de Frank, Cópula de Gumbel, Cópula de Clayton y Cópula de Galambos. Dentro de cada una de ellas, se selecciona aquel miembro (normalmente dado por el valor de uno o varios parámetros) que mejor refleja una relación concreta (la observada en los datos). Finalmente debe decidirse por aquel representante que, en función de ciertos criterios, mejores resultados le proporcione.

Podemos resumir que las etapas que encontraremos en el proceso de selección de cópulas y que a continuación pasaremos a detallar son las siguientes:

1. Determinación de las distribuciones marginales asociadas a cada una de las variables en función de las muestras de datos disponibles.
2. Propuesta de un conjunto inicial de cópulas candidatas que, por sus características, se perfilan como adecuadas para reflejar la relación existente entre las variables. Esta propuesta se hará de acuerdo al conocimiento que se tenga sobre la forma de dicha relación.
3. Elección de la cópula de entre todas las que representan a las candidatas.

3.4.5 Distribuciones Marginales

El análisis univariante conlleva la especificación de funciones de distribución asociadas a cada una de las variables. Así, para el presente estudio se consideraron dos distribuciones marginales:

Distribución Exponencial

Algunas secuencias de eventos hidrológicos, como la ocurrencia de precipitación, pueden considerarse como procesos de Poisson, en los cuales los eventos ocurren instantánea e independientemente en el tiempo, o a lo largo de una línea. El tiempo entre tales eventos, o tiempo de interarribo, está descrito por una distribución exponencial cuyo parámetro λ es la tasa media de ocurrencia de los eventos. En la distribución exponencial es fácil estimar λ a partir de la función observada (Chow et al., 1994).

El tiempo de ocurrencia de fenómenos como la precipitación, pueden considerarse como procesos de Poisson ya que los eventos ocurren instantánea e independientemente en un horizonte de tiempo, a lo largo de la línea. El tiempo entre dichos eventos lo describe la distribución exponencial.

La función de densidad de probabilidad se muestra en la ecuación:

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

Donde, x representa la variable y λ es el parámetro de la distribución.

Distribución Gamma

El tiempo que toma la ocurrencia de un número β de eventos en un proceso de Poisson está descrito por la distribución Gamma, la cual es la distribución de una suma de β variables aleatorias, independientes e idénticas, distribuidas exponencialmente. La función gamma tiene una forma que varía suavemente y es muy útil para la descripción de variables hidrológicas asimétricas sin el uso de la transformación log (Chow et al., 1994).

Su función de densidad de probabilidad está dada por:

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

Donde, x representa la variable, μ es la media de la muestra y σ^2 es la varianza.

La función de distribución de probabilidad para la distribución normal es:

$$F(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} * \int_{\delta}^x \left(\frac{x-\delta}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\frac{x-\delta}{\alpha}} dx$$

Donde α , β y δ , son los parámetros. Además $\Gamma(\beta)$ es la función matemática gamma.

3.5 Estimación de la vulnerabilidad de sequías

Las áreas que tienen mayor exposición y la baja capacidad de afrontamiento tendrían el mayor riesgo ante un episodio de sequía dada y viceversa. El concepto de vulnerabilidad a la sequía fue originalmente descrita en la metodología " DRÁSTICO " para la evaluación de la contaminación de las aguas subterráneas (Aller et al. 1987), para el mapeo de la seguridad alimentaria (Eastman et al., 1997) y para el mapeo de la sequía (Thiruvengadachari y Gopalkrishna 1993). Wilhelmi y Wilhite (2002) y Wilhelmi et al. (2002) describieron vulnerabilidad a la sequía para el estado de Nebraska en EE.UU. utilizando los factores biofísicos y sociales en el dominio espacial. El impacto de la sequía en la agricultura, la disponibilidad de agua y las actividades sociales y económicas regionales dependen de varios factores fisiográficos, ambientales y sociales (Wilhelmi et al., 2002).

La vulnerabilidad relativa a la sequía de un área depende, pues, de múltiples factores tales como las características topográficas, el suelo, el uso del suelo, el desarrollo de los recursos hídricos (soportes de riego), en la conservación del agua in situ, los usos de las aguas subterráneas y la demanda regional de agua para las actividades domésticas, industriales y agrícolas, etc.

Iglesias et al. (2009) presentó las directrices para el desarrollo de planes de gestión de sequía utilizando el enfoque basado en el riesgo para mitigar el impacto de la sequía en diferentes vulnerabilidades. Pandey et al. (2010) sugirieron un índice para la evaluación integrada de la vulnerabilidad a la sequía mediante factores físicos y climáticos. Utilizaron la misma gama de pesos para diversos factores, teniendo en cuenta todos los factores igualmente significativos. Sin embargo, es imprescindible tener en cuenta que varios factores afectan a los procesos hidrológicos de manera diferente, y por lo tanto, su efecto sobre el grado de vulnerabilidad a la sequía serían diferentes. Por lo tanto, es importante tener en cuenta la significación de un factor de acuerdo a su nivel de influencia en la evaluación de la vulnerabilidad relativa a las sequías.

Así, en el presente estudio, un sistema de ponderación diferencial ha sido ideado para la evaluación de la vulnerabilidad relativa a las sequías en las escalas espaciales y temporales utilizando factores fisiográficos, sociales, climáticos e hidrológicos que consideran significación de la influencia de diferentes factores causales. Los factores fisiográficos son características estáticas de la cuenca, que incluyen el uso del suelo, tipo de suelo, la pendiente, distancia de alcance río y zonas de elevación. La

densidad de población es el factor semi-estático, que puede aumentar con el crecimiento económico e industrial de un área. En el esquema propuesto, se han propuesto diferentes rangos de pesos para diferentes sub-categorías de factores en función de su influencia relativa en la vulnerabilidad a la sequía.

3.5.1 Factores de Vulnerabilidad

Textura de Suelo

Para determinar la textura de suelos de la zona de estudio se utilizó información grillada de la granulometría del suelo: arcilla, limo y arena. Esta información fue procesada mediante el uso del triángulo textural (Figura 3-2), para lo cual se utilizó el software SAGAGIS, en el cual se procesaron los rasters de arcilla, limo y arena, para obtener la clase textural de cada pixel.

La información de textura de suelos se obtuvo del ISRIC (International Soil Reference and Information Centre). Estos datos se produjeron utilizando un sistema de cartografía automatizado, denominado colectivamente "SoilGrids", que es una implementación de la geoestadística basada en modelos en el entorno Open Source computación estadística en R. Los mapas SoilGrids1km están disponibles para su descarga a través del siguiente link: <http://soilgrids.org>.

Una vez obtenido el raster de textura de suelos, se procedió a ponderarlo en base a los pesos de vulnerabilidad mostrados en la Tabla 4-10 y con este resultado se estimaron los promedios distritales de vulnerabilidad debido a la clase textural del suelo y se volvieron a ponderar los valores resultantes, considerando rangos iguales, con valores de: 2, 4, 6, 8 y 10.

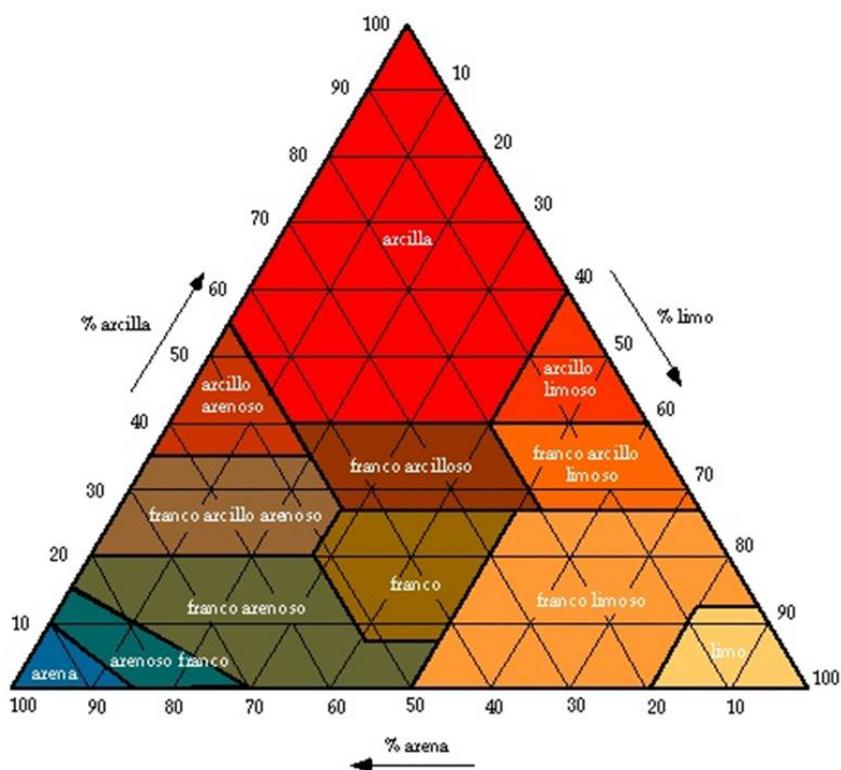


Figura 3-2 Triángulo textural de suelos

Uso de suelos

La información en formato ráster del uso de suelos para el Perú se obtuvo del Global Land Cover, con una resolución espacial de 30m, información que es derivada de los datos de satélite Landsat 7 ETM.

El sistema de clasificación de los diferentes usos de suelos que contiene la información del Global Land Cover incluye 10 tipos de cobertura de tierra, como son: tierra cultivada, bosque, pastizales, matorrales, humedales, cuerpos de agua, tundra, superficies artificiales, bareland, nieve permanente y hielo. El esquema de clasificación es el siguiente:

- 1) Tierra Cultivada. Tierras utilizadas para la agricultura, horticultura y jardines, incluyendo arrozales, tierras de cultivo irrigadas y secas, vegetación y huertos de frutas, etc.
- 2) Bosque. Tierras cubiertas de árboles, con cobertura vegetal superior al 30%, incluidos bosques caducifolios y coníferos, y bosques escasos con cobertura del 10 al 30%, etc.
- 3) Pastizales. Tierras cubiertas por pasto natural con cobertura superior al 10%, etc.
- 4) Matorral. Tierras cubiertas de arbustos con una cobertura superior al 30%, incluidos arbustos de hojas caducas y perennes, y estepa desierta con cobertura superior al 10%, etc.
- 5) Los cuerpos de agua. Cuerpos de agua en el área de la tierra, incluyendo río, lago, embalse, estanque de peces, etc.
- 6) Humedales. Tierras cubiertas de plantas de humedales y cuerpos de agua, incluyendo pantanos interiores, pantanos de lago, humedales de llanuras inundables de río, humedales de bosques / arbustos, turberas, manglares y marismas, etc.
- 7) Tundra. Tierras cubiertas de líquenes, musgos, hierbas perennes resistentes y arbustos en las regiones polares, incluyendo tundra arbórea, tundra herbácea, tundra húmeda y tundra estéril, etc.
- 8) Superficies artificiales. Tierras modificadas por actividades humanas, incluyendo todo tipo de vivienda, área industrial y minera, instalaciones de transporte, zonas verdes urbanas interiores y cuerpos de agua, etc.
- 9) Bareland. Tierras con cobertura vegetal inferior al 10%, incluyendo desiertos, campos arenosos, Gobi, rocas desnudas, salinas y tierras alcalinas, etc.
- 10) Nieve y hielo permanentes. Tierras cubiertas de nieve permanente, glaciar y cubierta de hielo.

Zonas de Elevación

Las zonas de elevación se clasificaron en base a un modelo digital de elevación (DEM) en formato ráster de 90 m de resolución espacial, el cual se clasificó en base a los pesos mostrados en la Tabla 4-10. Luego se estimaron los promedios distritales y se volvieron a reclasificar los valores, considerando rangos iguales, a: 1, 2, 3, 4 y 5. El resultado de la ponderación a nivel distrital se muestra en la sección de Anexo del presente estudio.

Pendiente

La pendiente se estimó en base al mismo DEM (Modelo Digital de Evaluación) utilizado en el presente estudio y se realizó la ponderación de los niveles de vulnerabilidad en base a los valores mostrados en la Tabla 4-10. De manera similar, a los mapas temáticos anteriores, se estimaron los promedios distritales y se volvieron a reclasificar considerando valores del 1 al 5. El resultado de la ponderación a nivel distrital se muestra en la sección de Anexo del presente estudio.

Distancia a ríos

La distancia a los ríos como cursos de agua es un factor importante bajo la premisa de que las zonas más cercanas a los cursos de agua tienen un mayor acceso al recurso hídrico, en comparación con las zonas que se encuentran más alejadas. En este sentido, se delimitaron las zonas con una distancia al río de 1Km, 3Km o más de 3Km, ponderándolas en base a los valores mostrados en la Tabla 4-10. Se estimaron los promedios distritales y se volvieron a clasificar considerando valores de 1 al 5. El resultado de la ponderación a nivel distrital se muestra en la sección de Anexo del presente estudio.

Presencia de Presas

La presencia de presas en una zona y el número de las mismas es un factor que influye en la vulnerabilidad ante eventos de sequías puesto que las presas ayudan a almacenar agua durante la temporada lluviosa, y durante la temporada seca vierten el agua almacenada a los cursos de agua de las cuencas, lo que ayuda a paliar las fuertes deficiencias que se pueden presentar durante la temporada seca.

Se utilizó la información en formato shapefile del inventario de presas a nivel nacional realizado por la Autoridad Nacional del Agua del Perú – ANA, del cual se extrajeron las presas de relaves ya que estas no aportan a reducir la

Densidad Poblacional

La densidad poblacional es un factor social que influye en la vulnerabilidad ante eventos de sequías, puesto que, cuanto mayor densidad poblacional se tenga en un distrito mayor será la vulnerabilidad del mismo ante un evento de sequía. En el presente estudio se utilizó la información de densidad poblacional a nivel distrital obtenida del Instituto Nacional de Estadística e informática.

Índice de Desarrollo Humano (IDH)

El índice de Desarrollo Humano es un indicador creado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) con el fin de determinar el nivel de desarrollo que tienen los países del mundo. El IDH fue ideado con el objetivo de conocer, no sólo los ingresos económicos de las personas en un país, sino también para evaluar si el país aporta a sus ciudadanos un ambiente donde puedan desarrollar mejor o peor su proyecto y condiciones de vida. Para esto, el IDH tiene en cuenta tres variables:

- Esperanza de vida al nacer. Analiza el promedio de edad de las personas fallecidas en un año.
- Educación. Recoge el nivel de alfabetización adulta y el nivel de estudios alcanzado (primaria, secundaria, estudios superiores).
- PIB per Cápita (a paridad de poder adquisitivo). Considera el producto interno bruto per cápita y evalúa el acceso a los recursos económicos necesarios para que las personas puedan tener un nivel de vida decente.

El índice IDH aporta valores entre 0 y 1, siendo 0 la calificación más baja y 1 la más alta. Los valores de DHI para la zona de estudio fueron divididos en cuatro clases y se ponderaron en base a los valores de la Tabla 4-10.

3.5.2 Sistema de ponderación propuesto para la integración de los factores de vulnerabilidad

Se utilizó el sistema de pesaje diferencial considerando la importancia relativa de varios factores sobre la vulnerabilidad a la sequía como se muestra en la Tabla 3-3. La selección de los pesos para diversos factores se basa en la suposición de grado relativo de influencia de un factor sobre la vulnerabilidad general a la sequía.

Tabla 3- 3 Pesos asignados a las subclases de los factores de vulnerabilidad considerados

N°	FACTOR	CLASIFICACIÓN DE VULNERABILIDAD A LA SEQUÍA	PESO ASIGNADO
1	Elevación	Zonas de baja elevación (m)	
		<400	1
		400 – 1000	2
		1000 - 2300	3
		Zonas de elevación media (m)	
		2300 - 3500	4
		3500 – 4000	5
		Zonas de gran elevación (m)	
		4000 - 4800	6
		>4800	7
2	Pendiente	0 -2	1
		2 – 5	2
		5 - 8	3
		8 – 12	4
		> 12	5
3	Uso de Suelos	Cuerpos de Agua	-1
		Desierto	0
		Matorral	2
		Pastizales	4
		Bosques	6
		Humedales y glaciares	8
		Area Urbana	10
		Agrícola	12
4	Textura de Suelo	Arcilla,	1
		Franco	2
		Franco limoso	3
		Limo	4
		Arenoso	5
5	Presas	0	5
		1-2	3
		>2	1
6	Distancia a rios (Km)	1.0 Km	1
		2.0 Km	2
		>3.0 Km	3

7	Densidad Poblacional/km ²	0 – 2	1
		2-4	2
		4-6	3
		6-8	4
		>8	5
8	Índice de Desarrollo Humano -IDH	0.62 – 0.68	1
		0.57 – 0.62	2
		0.52 – 0.57	3
		0.46 – 0.52	4

3.5.3 Cálculo de la Vulnerabilidad

Para la estimación de la vulnerabilidad en base a los factores ponderados en función a su nivel de vulnerabilidad se utilizó el Índice de Vulnerabilidad de Sequías Integrado (IDVI por sus siglas en inglés). Por lo que, la vulnerabilidad se puede obtener cuantitativamente en función de la ecuación:

$$IDVI = \frac{\sum_{i=1}^n w_i}{\sum_{i=1}^n w_{imax}} \quad (2)$$

Donde, **w_i** es el peso asignado a cada distrito respecto al factor **i**, dependiendo de la clasificación del factor en consideración, **w_{imax}** es el máximo peso asignado al factor **i** en cada clasificación y **n** es el número de factores considerados.

Los valores estimados de IDVI fueron re-escalados de 0 a 1 y se determinaron los niveles de vulnerabilidad en base a la Tabla 3-4.

Tabla 3- 4 Distritos bajo los diferentes niveles de vulnerabilidad

Valores de IDVI	Nivel de Vulnerabilidad
<=0	No Vulnerable
>0 a <=0.2	Poco Vulnerable
>0.2 a <= 0.4	Moderadamente Vulnerable
>0.4 a <=0.63	Severamente Vulnerable
>0.63	Criticamente Vulnerable

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Peligro de Sequías

Como resultado del cálculo y ponderación del DHI se obtuvo el mapa del peligro de sequías para la región sur del Perú, el cual se muestra en la Figura 4-1. En color rojo se pueden apreciar las áreas de mayor peligro de sequías debido a la mayor probabilidad de ocurrencia de sequías de mayor severidad y duración, en comparación con otras áreas.

Considerando una ponderación del riesgo de 0 a 1, podemos apreciar que el departamento de Puno es el que presenta una mayor área afectada con alto peligro de sequías, seguido de los departamentos de Cusco y Arequipa. Asimismo, las áreas en color verde nos muestran las zonas con menor riesgo de sequías, las cuales están distribuidas principalmente al noreste de la zona de estudio.

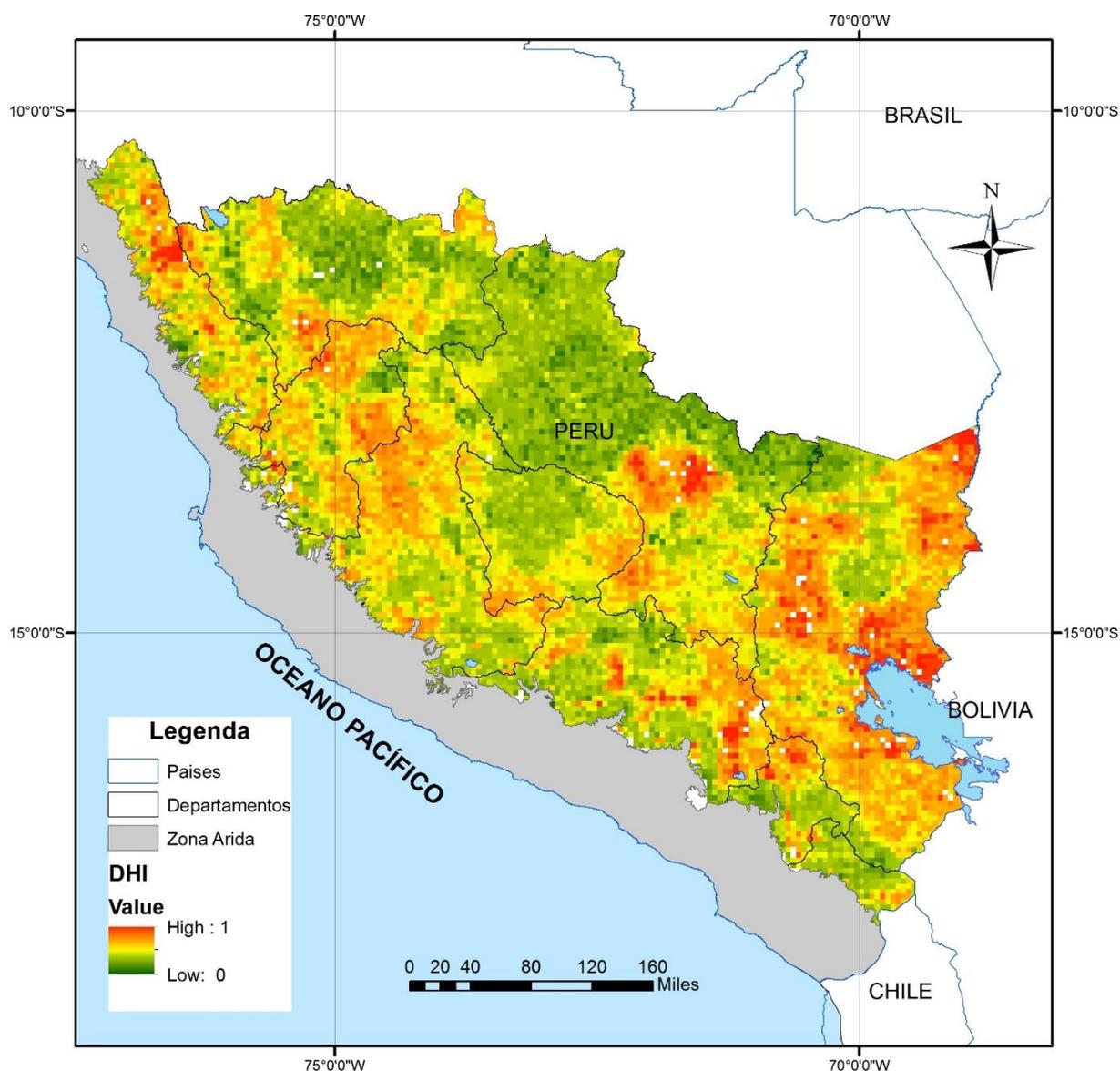


Figura 4- 1 Peligro de Sequías estimado en base a la probabilidad bivariada de la severidad y duración de las sequías

Los valores de peligro de sequías estimados en base al DHI, mostrados en la Figura 4-2, fueron estimados en base a la cópula de mejor ajuste para las características de severidad y duración de las sequías. En este sentido, la Figura 4-2 muestra las distribución espacial del tipo de cópula elegido; dónde se puede apreciar que la Cópula de Clayton es la que predomina en la mayor parte de la zona de estudio, seguida de la Cópula Frank, la cual es la que mejor se ajusta a las condiciones de las sequías en la zona alto andina a la altura de los departamentos de Ayacucho, Arequipa, Moquegua y Apurímac. Además, se aprecia la presencia de la Cópula Gumbel en algunas zonas puntuales, con mayor incidencia en el departamento de Cusco. Finalmente, la cópula Galambos es la que menos se ajusta a las condiciones de la zona de estudio, con algunas zonas puntuales como al norte del departamento de Puno.

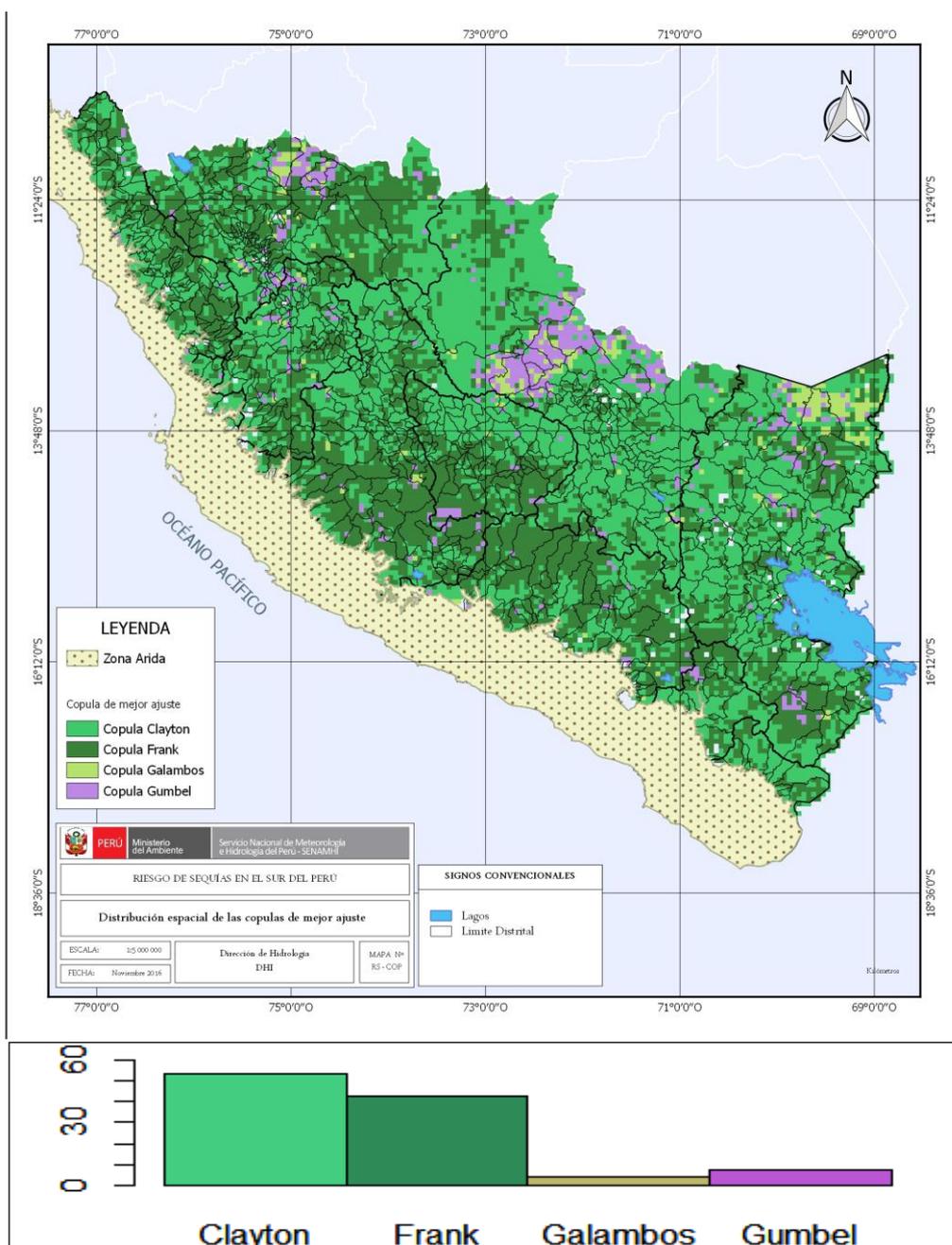


Figura 4- 2 Distribución espacial de las cópulas de mejor ajuste para la estimación del Peligro de sequía

En base al DHI, mostrado en la Figura 4-3, se obtuvo el promedio del peligro de sequías por distrito y se definieron cuatro niveles de peligro: Peligro bajo, peligro moderado, peligro alto y peligro muy alto. En la Figura 4-3, se puede apreciar los distritos con mayor peligro de sequías en color rojo, esto debido a la mayor probabilidad de ocurrencia de eventos de sequías de duración y severidad considerable. Se aprecia que el departamento de Puno es el que presenta el mayor número de distritos con peligro muy alto respecto a la ocurrencia de sequías, seguido del departamento de Cusco, Huancavelica y Lima. Por otro lado, los distritos con el peligro más bajo de ocurrencia de sequías son los localizados al noroeste del departamento de Cusco, en la zona central del departamento de Pasco y la zona central norte del departamento de Apurímac.

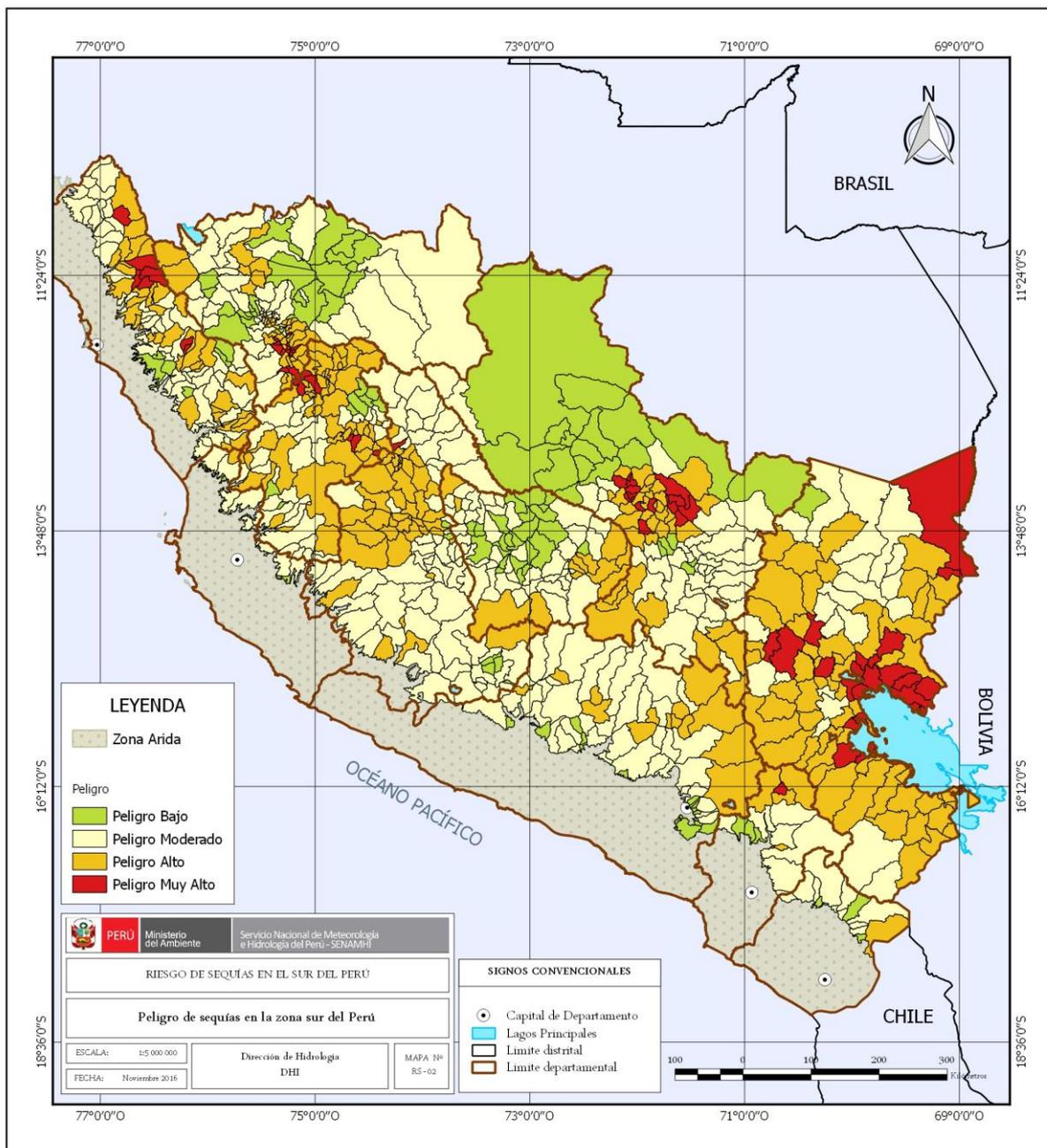


Figura 4- 3 Peligro de Sequías promedio a nivel distrital

4.2 Vulnerabilidad de Sequías

El resultado de la ponderación de los 8 factores de vulnerabilidad considerados en el presente estudio se muestra en la Figura 4-4. Los factores que tuvieron los mayores valores de ponderación y por tanto mayor peso durante la integración de factores fueron la textura suelo y el uso del suelo.

Las zonas de mayor elevación se consideraron como zonas más vulnerables que las zonas de menor elevación; asimismo, las zonas con mayor pendiente fueron consideradas más vulnerables que las de menor pendiente. Los usos de suelo agrícola son los considerados más vulnerables; las texturas de suelos con mayor contenido de arenas son los más vulnerables por su baja capacidad de retener agua en el suelo, mientras que los suelos con mayor contenido de arcilla son menos vulnerables. La presencia de presas de agua en un distrito puede reducir la vulnerabilidad ante eventos de sequías, por lo que los distritos que no cuentan con presas serían más vulnerables que los distritos que cuentan con más de una presa de agua. Los distritos con mayor acceso a cursos de agua como los ríos son menos vulnerables ante eventos de sequías, siendo las zonas a una distancia menor a 1km las que podrían tener mayor acceso al recurso hídrico del mismo ante un evento de sequía. Por otro lado, los factores socioeconómicos también tienen incidencia en la respuesta ante eventos de sequías, en este sentido, los distritos con mayor densidad poblacional se consideran más vulnerables ante eventos de sequías que los distritos con menor densidad, debido a que mayor cantidad de población podría ser afectada. Finalmente, el índice IDH resume otros factores como la educación y el nivel económico de la población asentada en cada distrito; por lo que los distritos con menor IDH son los que serían más vulnerables ante eventos de sequía puesto que la resiliencia sería menor en estos distritos.

La integración de los factores antes mencionados nos dio como resultado el mapa de vulnerabilidad de sequías mostrado en la Figura 4-5. Dónde se puede apreciar las zonas de mayor vulnerabilidad a las sequías en color rojo, esto debido a las condiciones físicas o socioeconómicas de los distritos, que los hacen más vulnerables ante eventos de sequías. Las zonas de vulnerabilidad muy alta se presentan predominantemente en los distritos correspondientes a los departamentos de Arequipa y Tacna, además de algunos distritos del departamento de Puno, Huancavelica y Cusco. Además se aprecia un buen porcentaje (42.7% de todos los distritos) con un nivel de vulnerabilidad alta, mientras que, los distritos con vulnerabilidad baja representan sólo el 5.8% del total de distritos en nuestra zona de estudio, como se detalla en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1 Distritos bajo los diferentes niveles de vulnerabilidad

Valores de IDVI	Nivel de Vulnerabilidad	Número de Distritos
≤ 0	No Vulnerable	0 (0%)
>0 a ≤ 0.2	Vulnerabilidad Baja	50 (5.8%)
>0.2 a ≤ 0.4	Vulnerabilidad Moderada	389 (45.7%)
>0.4 a ≤ 0.63	Vulnerabilidad Alta	363 (42.7%)
>0.63	Vulnerabilidad Muy alta	48 (5.6%)

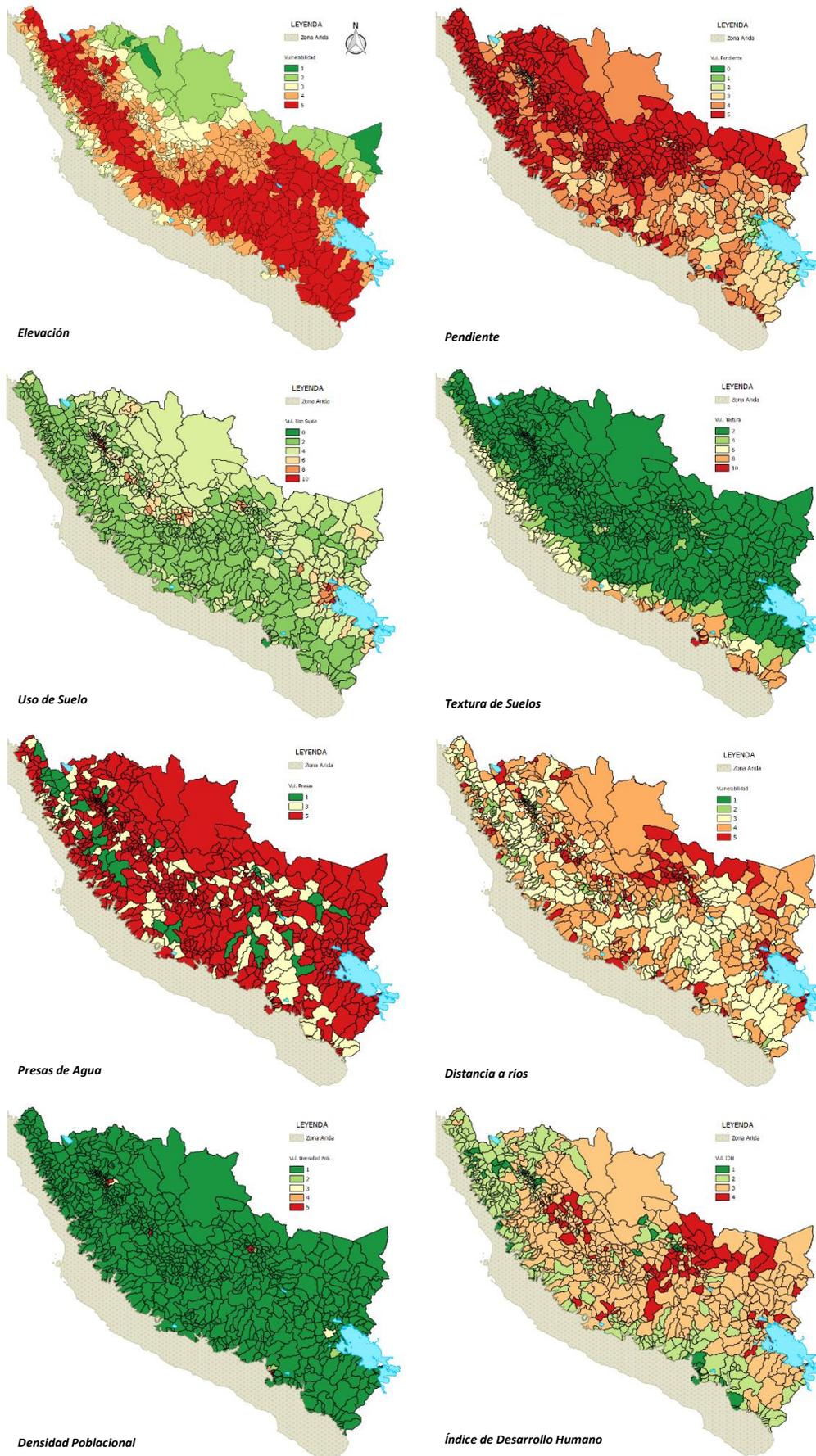


Figura 4- 4 Factores de vulnerabilidad ponderados

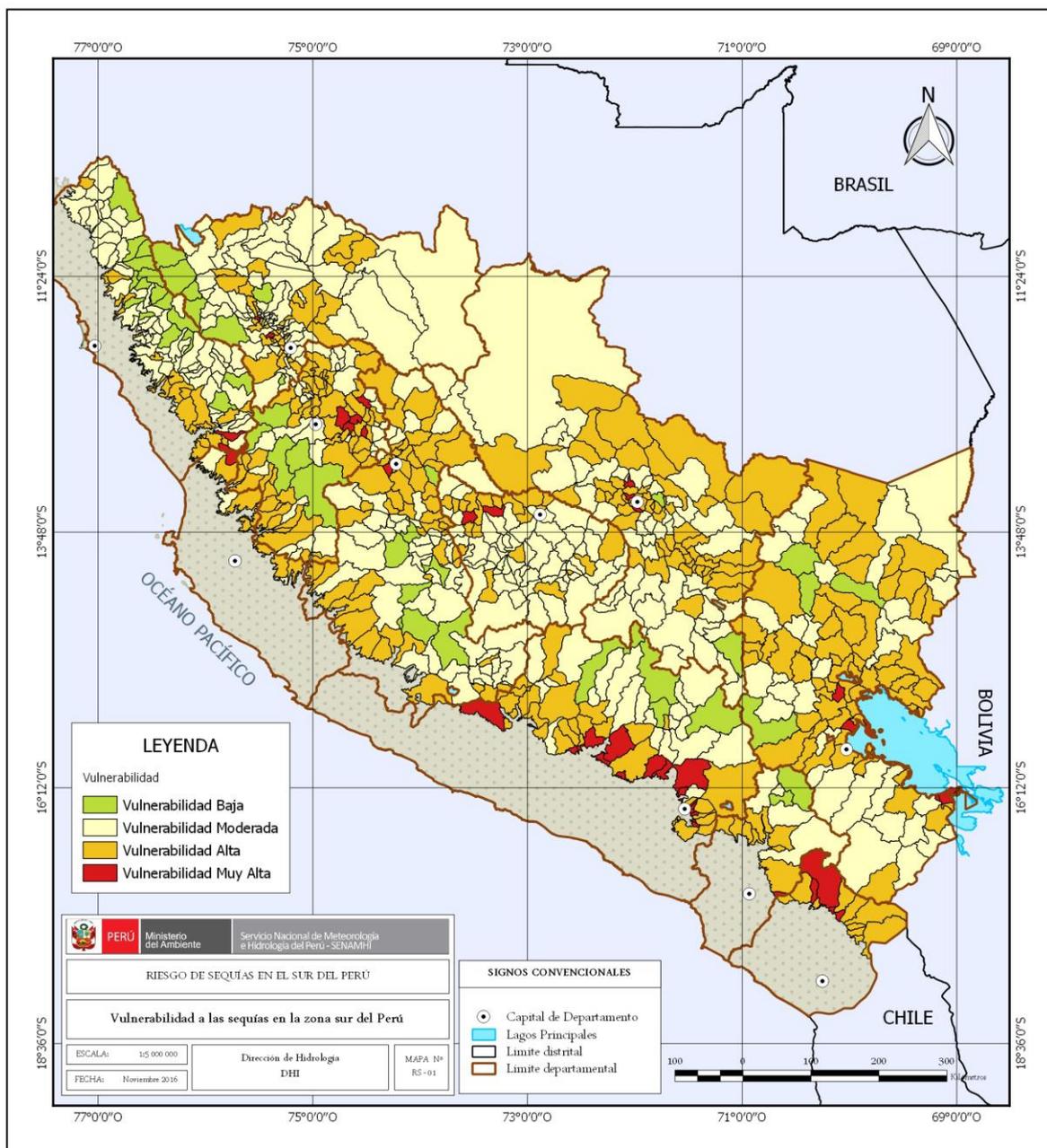


Figura 4- 5 Vulnerabilidad a las sequías a nivel distrital

4.3 Riesgo de sequías

Como resultado final del estudio, se obtuvo el mapa de riesgo de sequías a nivel distrital para la zona de estudio, como resultado del producto de los mapas de peligro y vulnerabilidad, el cual se muestra en la Figura 4-6. Los distritos con mayor riesgo de sequías se muestran en color rojo y están localizados principalmente en el departamento de Puno, Cusco, Junín y Huancavelica; asimismo, resalta el gran número de distritos con un nivel de riesgo alto, los cuales están localizados en gran parte del departamento de Puno, además de los departamentos de Cusco, Ayacucho, Huancavelica, Arequipa y Lima, principalmente. Por otro lado, las zonas con bajo riesgo de sequías, representadas en color verde en la Figura 4-6, se distribuyen principalmente en la zona nor-oeste del departamento de Cusco, al

norte del departamento de Apurímac, en la zona central y norte del departamento de Junín, al sur del departamento de Ayacucho y al norte del departamento de Arequipa, principalmente. Mayor detalle del riesgo de sequías por departamento se muestra en los mapas del Anexo 2 del presente estudio.

Asimismo, el número de distritos por nivel de riesgo se resume en la Tabla 4-2 del presente estudio, donde se encontró un 2.8% del total de distritos analizados con un nivel de riesgo muy alto, seguido de un 24.7% de distritos con un nivel de riesgo alto, además de un 49.7% de distritos con un nivel de riesgo moderado, finalizando con un 22.7% de distritos con bajo riesgo ante eventos de sequía.

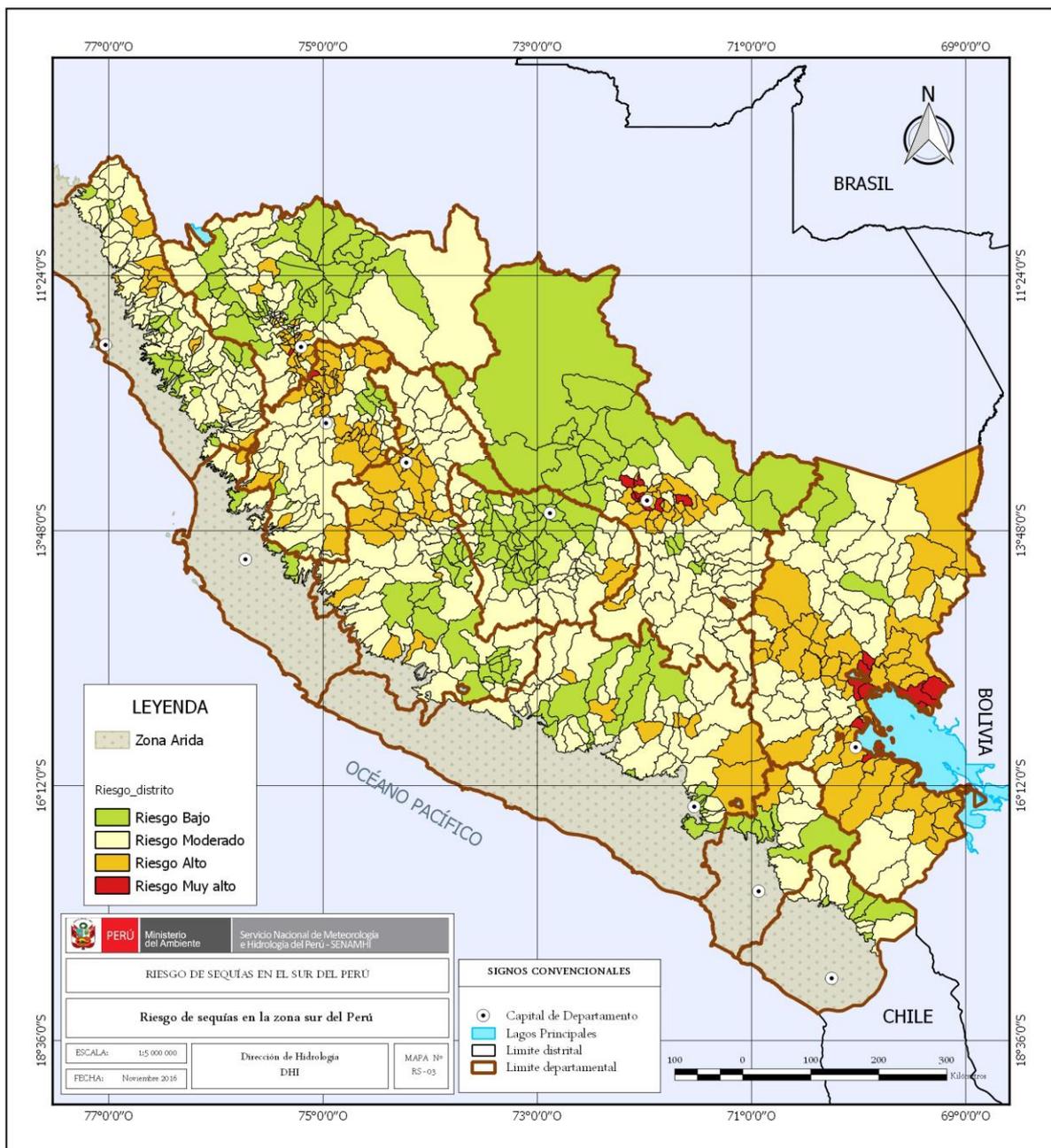


Figura 4- 6 Riesgo de sequías a nivel distrital para el sur del Perú

Tabla 4-1 Distritos bajo los diferentes niveles de riesgo

Valores de IDVI	Nivel de Riesgo	Número de Distritos
>0 a <=0.25	Riesgo Bajo	193 (22.7%)
>0.25 a <= 0.50	Riesgo Moderado	423(49.7%)
>0.50 a <=0.75	Riesgo Alto	210 (24.7%)
>0.75	Riesgo Muy Alto	24 (2.8%)

5. CONCLUSIONES

Se analizó el riesgo de sequías a nivel distrital para la zona sur del país en base a la estimación del peligro y la vulnerabilidad a las sequías. Como resultado se obtuvieron los mapas de peligro, vulnerabilidad y riesgo a nivel distrital, en los cuales es posible evaluar el peligro debido principalmente a factores meteorológicos, la vulnerabilidad basado en los factores físicos y socioambientales y finalmente el riesgo ante eventos de sequías como producto de los dos primeros.

El mapa de peligro definió 72 distritos con peligro muy alto de sequías, seguido de 299 distritos con nivel de peligro alto, los cuales fueron definidos en base a la probabilidad de sequías de duración y severidad característica de la serie de precipitación de 1981 al 2016.

El mapa de vulnerabilidad definió 48 distritos con vulnerabilidad muy alta y 363 distritos con vulnerabilidad alta, definidos en base a las características físicas y socioeconómicas de cada distrito.

Por tanto, se concluye que el riesgo en 24 distritos fueron catalogados con un nivel de riesgo muy alto, así como los 210 distritos con un nivel de riesgo alto, los cuales deben ser de especial interés ante la ocurrencia de eventos de sequías en la zona sur del país, si se desea realizar acciones de mitigación de posibles impactos.

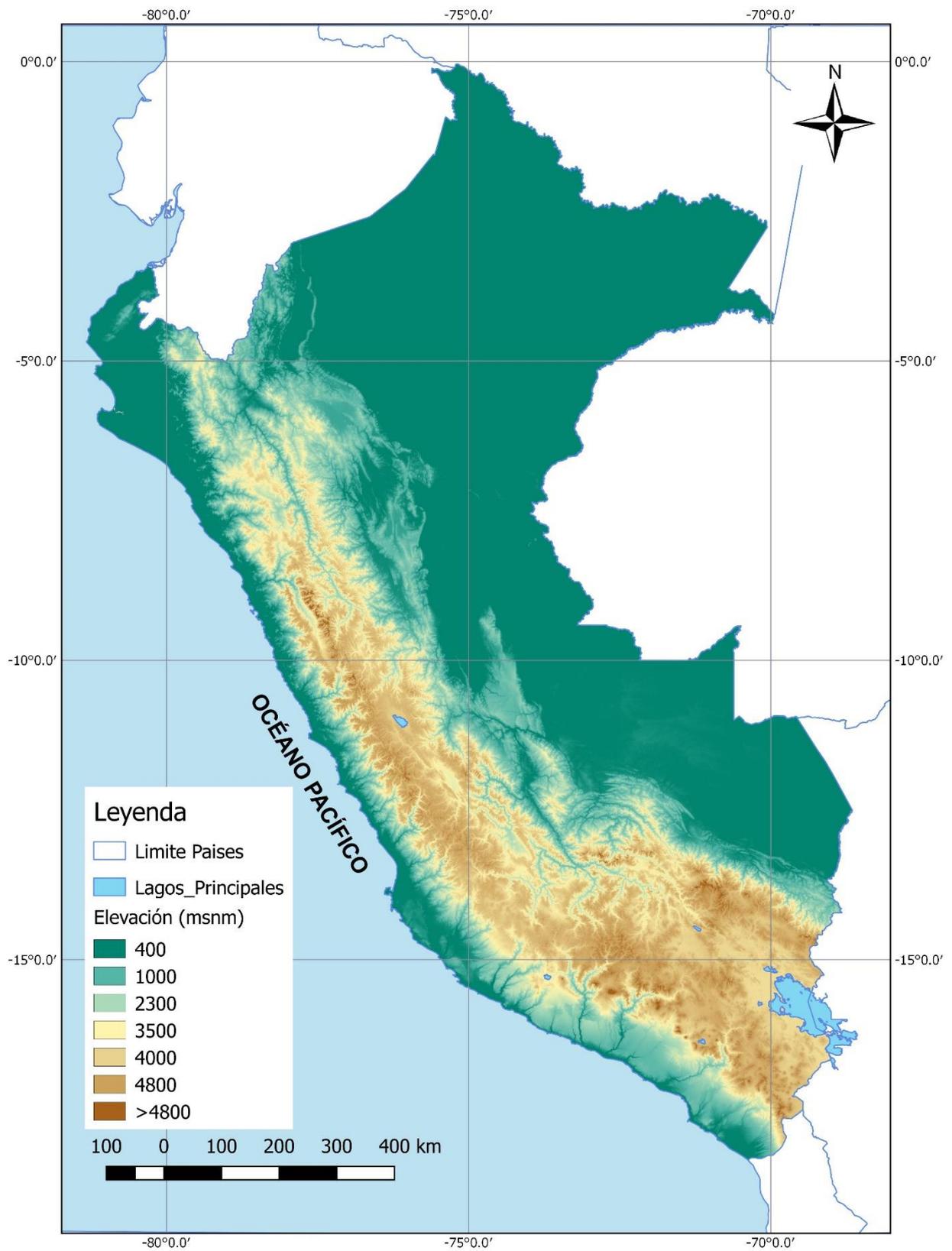
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barlow M, Cullen H, Lyon B, Wilhelmi O (2006) Drought Disaster in Asia Mathew. In: Natural Disaster Hotspots Case Studies. p 204
- Brando PM, Balch JK, Nepstad DC, et al (2014) Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions. *Proc Natl Acad Sci U S A* 111:6347–52. doi: 10.1073/pnas.1305499111
- Bryant E (2005) Natural Hazards.
- Carvajal-Velez L (2008) Human Development Report 2007 / 2008 Impacts of Climate Change on Human Development.
- Farhangfar S, Bannayan M, Khazaei HR, Baygi MM (2015) Vulnerability assessment of wheat and maize production affected by drought and climate change. *Int J Disaster Risk Reduct* 13:37–51. doi: 10.1016/j.ijdrr.2015.03.006
- Ge Y, Apurv T, Cai X (2016) Spatial and Temporal Patterns of Drought in the Continental U.S. during the Past Century. *Geophys Res Lett*. doi: 10.1002/2016GL069660
- Guttman NB (1999) Accepting the Standardized Precipitation Index: a Calculation Algorithm1. *JAWRA J Am Water Resour Assoc* 35:311–322. doi: 10.1111/j.1752-1688.1999.tb03592.x
- Harding BL, Sangoyomi TB, Payton EA (1995) Impacts of a severe sustained drought on colorado river water resources.
- Hunt ED, Svoboda M, Wardlow B, et al (2014) Monitoring the effects of rapid onset of drought on non-irrigated maize with agronomic data and climate-based drought indices. *Agric For Meteorol* 191:1–11. doi: 10.1016/j.agrformet.2014.02.001
- Lavado Casimiro WS, Labat D, Ronchail J, et al (2013) Trends in rainfall and temperature in the Peruvian Amazon-Andes basin over the last 40years (1965-2007). *Hydrol Process* 27:2944–2957. doi: 10.1002/hyp.9418
- Leng G, Tang Q, Rayburg S (2015) Climate change impacts on meteorological, agricultural and hydrological droughts in China. *Glob Planet Change* 126:23–34. doi: 10.1016/j.gloplacha.2015.01.003
- Malhi Y, Aragão LEOC, Galbraith D, et al (2009) Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest. *Proc Natl Acad Sci U S A* 106:20610–5. doi: 10.1073/pnas.0804619106
- Masud MB, Khaliq MN, Wheeler HS (2015) Analysis of meteorological droughts for the Saskatchewan River Basin using univariate and bivariate approaches. *J Hydrol* 522:452–466. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.12.058
- Mckee TB, Doesken NJ, Kleist J (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. *AMS 8th Conf Appl Climatol* 179–184. doi: citeulike-article-id:10490403
- Mishra AK, Singh VP (2010) A review of drought concepts. *J Hydrol* 391:202–216. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.07.012

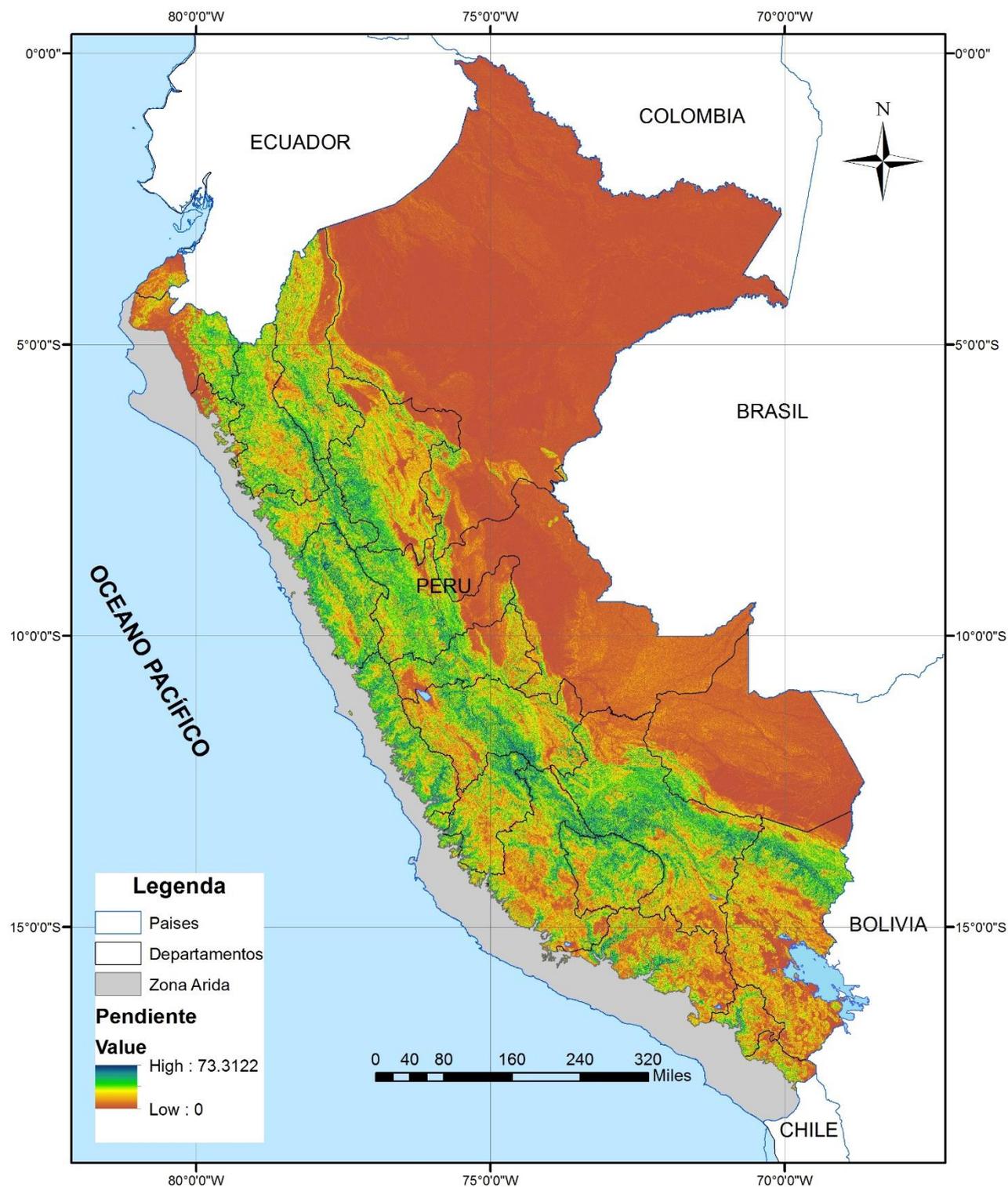
- Mishra AK, Singh VP (2011) Drought modeling - A review. *J Hydrol* 403:157–175. doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.03.049
- Phillips O, Aragao L, Lewis S, et al (2009) Drought sensitivity of the Amazon carbon sink. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* 6:42004. doi: 10.1088/1755-1307/6/4/042004
- PHI-UNESCO (2006) Balance hídrico superficial del Perú a nivel multianual.
- Qin Y, Yang D, Lei H, et al (2015) Comparative analysis of drought based on precipitation and soil moisture indices in Haihe basin of North China during the period of 1960 – 2010. 526:55–67.
- Santos JF, Portela MM, Pulido-Calvo I (2011) Regional Frequency Analysis of Droughts in Portugal. *Water Resour Manag* 25:3537–3558. doi: 10.1007/s11269-011-9869-z
- SENAMHI (2002) Clasificación Climática del Perú. Lima, Perú
- Shiau JT (2006) Fitting drought duration and severity with two-dimensional copulas. *Water Resour Manag* 20:795–815. doi: 10.1007/s11269-005-9008-9
- Tallaksen L, Lanen HAJ van (2004) Hydrological drought. Processes and estimation methods for streamflow and groundwater. Elsevier, 73, ,
- Vicente-Serrano SM, Beguer??a S, Lorenzo-Lacruz J, et al (2012) Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications. *Earth Interact.* doi: 10.1175/2012EI000434.1
- Vicente-Serrano SM, Chura O, L??pez-Moreno JI, et al (2015) Spatio-temporal variability of droughts in Bolivia: 1955-2012. *Int J Climatol* 35:3024–3040. doi: 10.1002/joc.4190
- Xu K, Yang D, Yang H, et al (2014) Spatio-temporal variation of drought in China during 1961–2012: A climatic perspective. *J Hydrol* 526:253–264. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.09.047

ANEXO

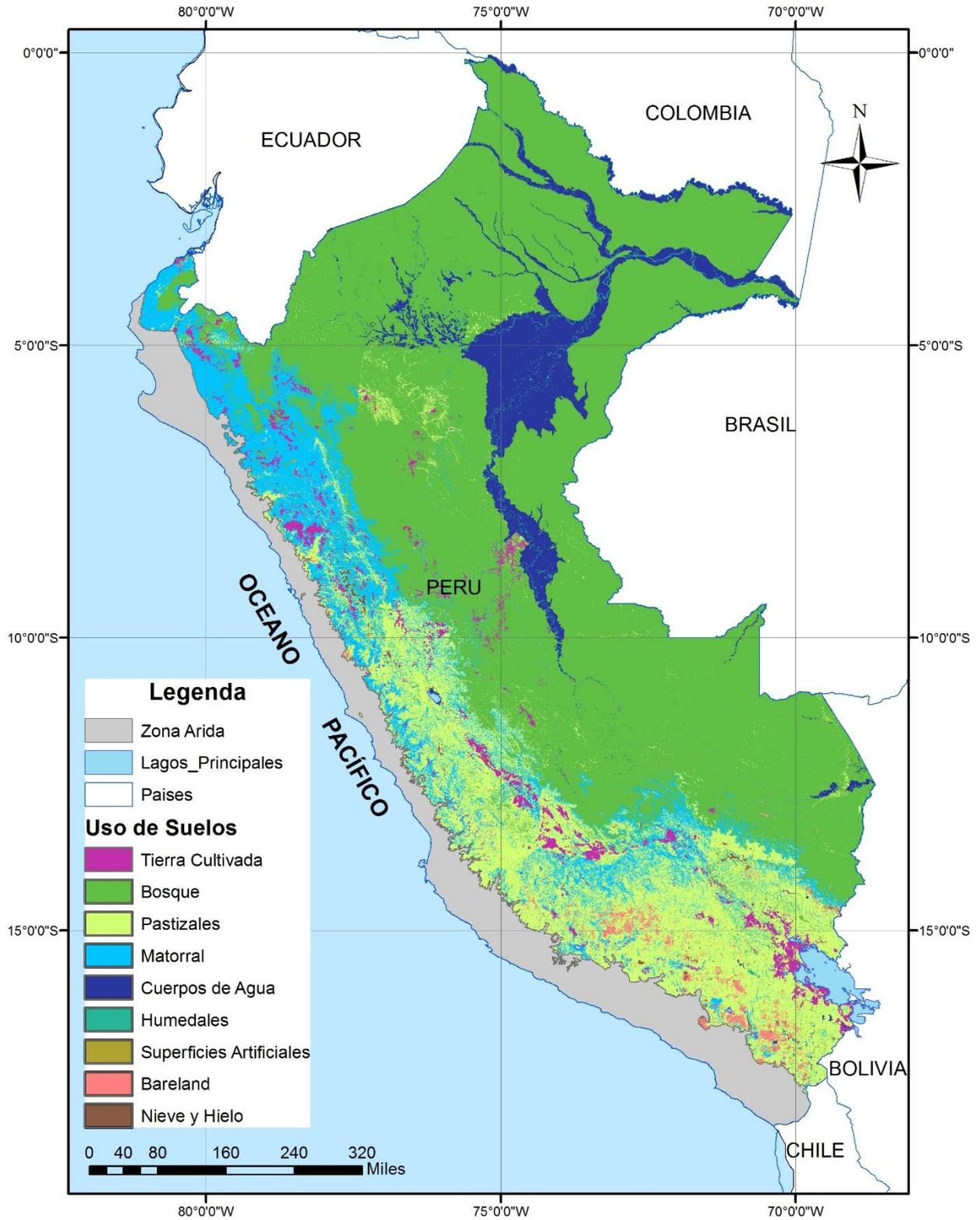
ANEXO 1 : MAPAS FACTORES FISICOS Y AMBIENTALES CONSIDERADOS



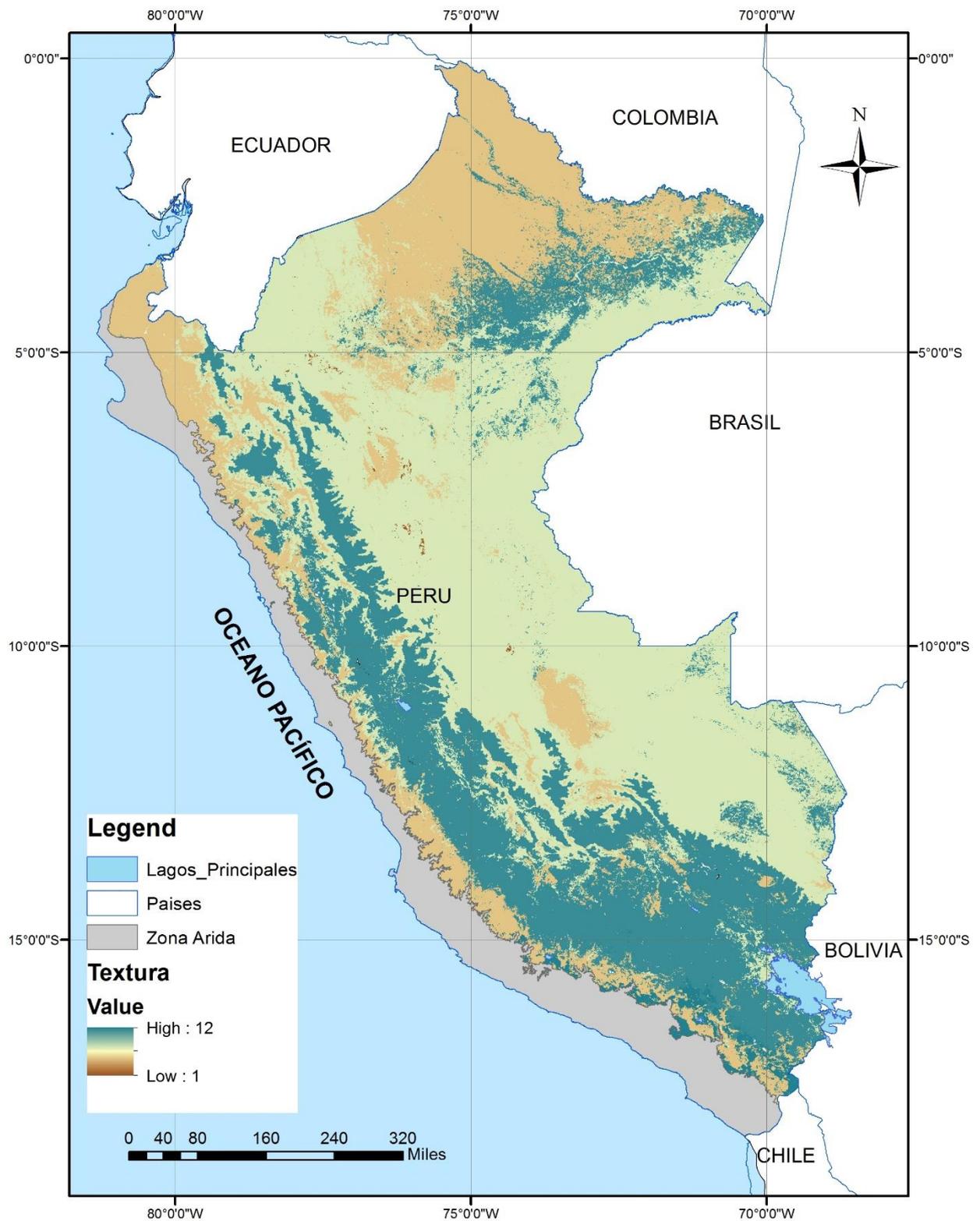
Mapa 1: Modelo de elevación del terreno



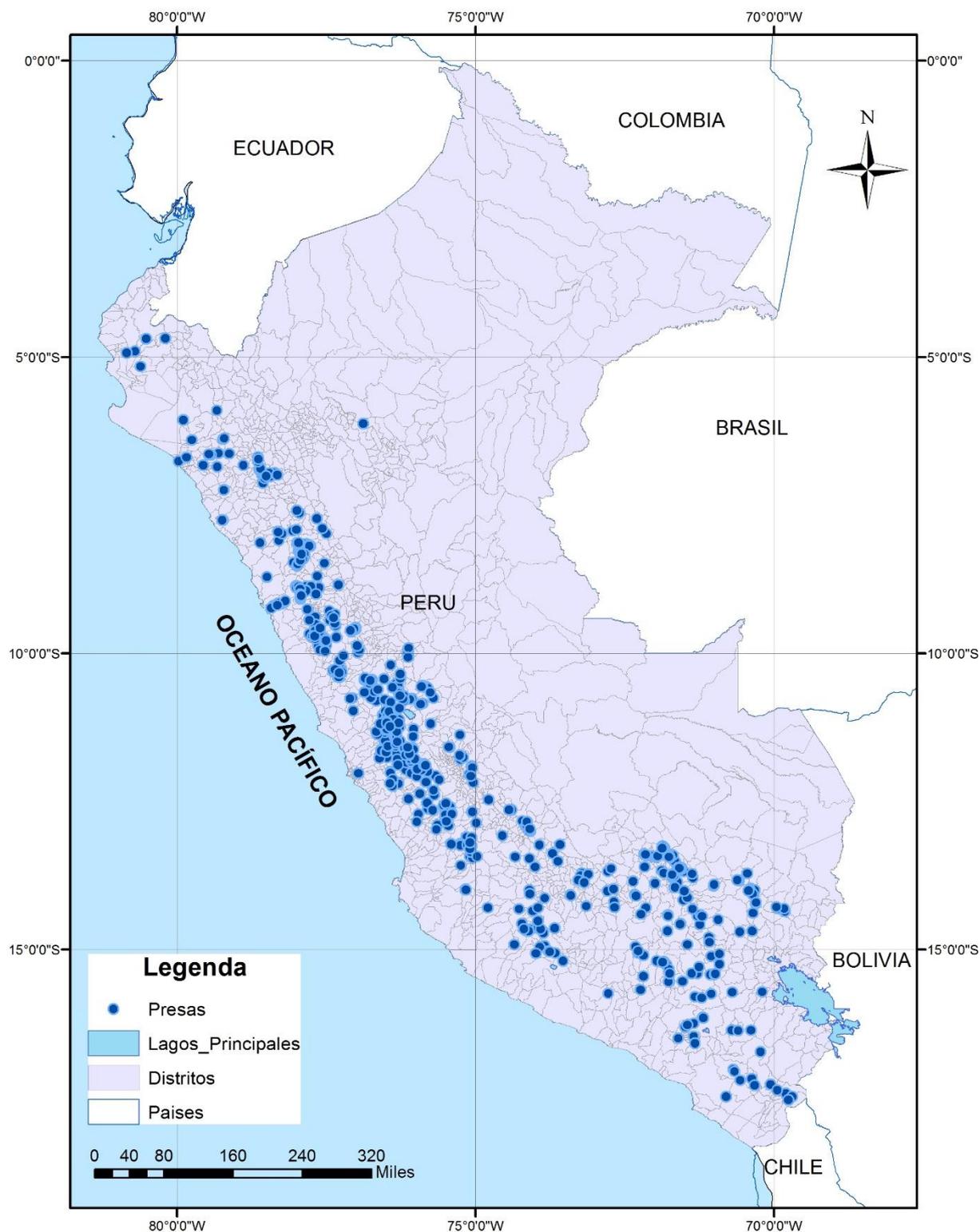
Mapa 2: Pendientes en grados



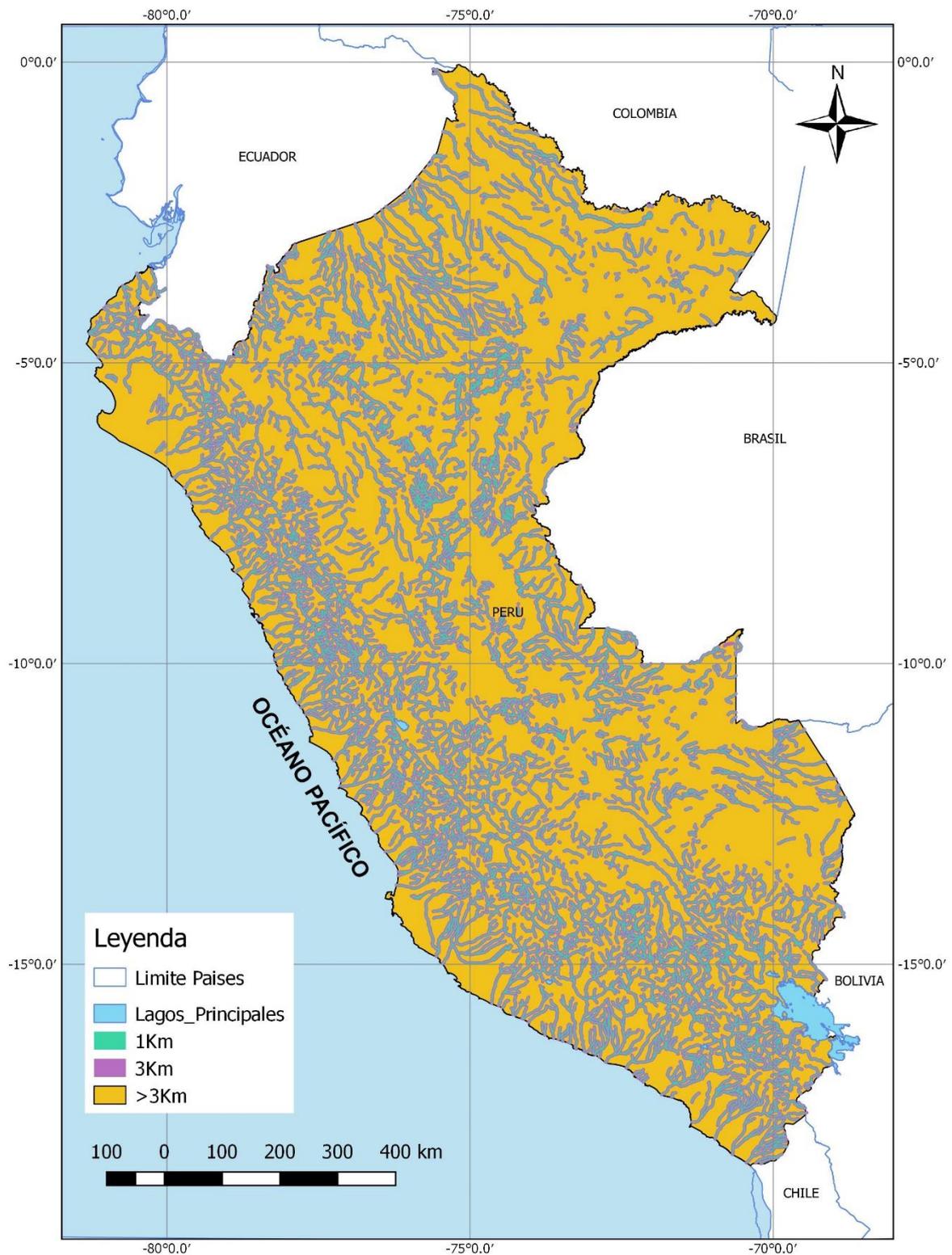
Mapa 3: Uso de Suelos



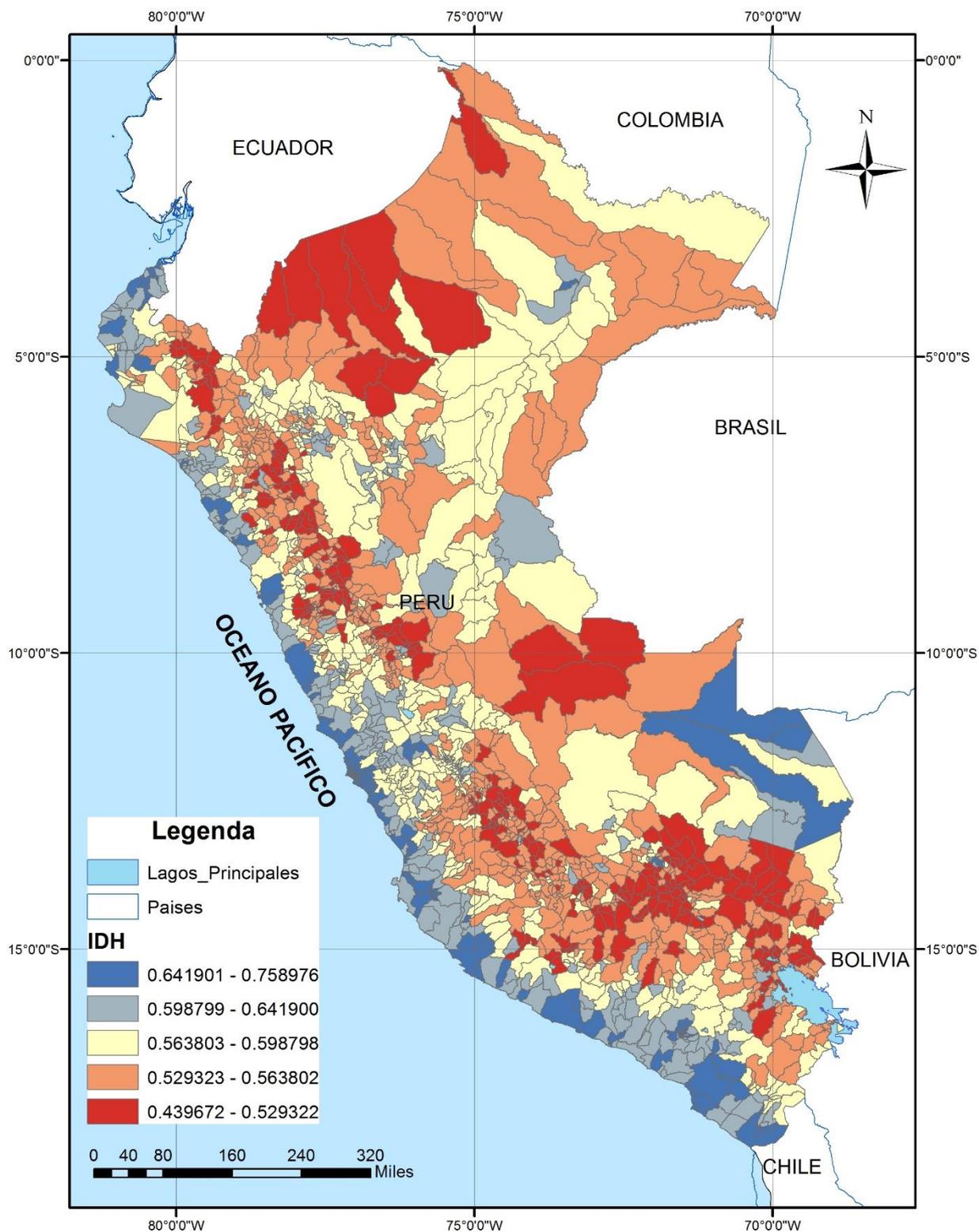
Mapa 4: Tipo de Suelos



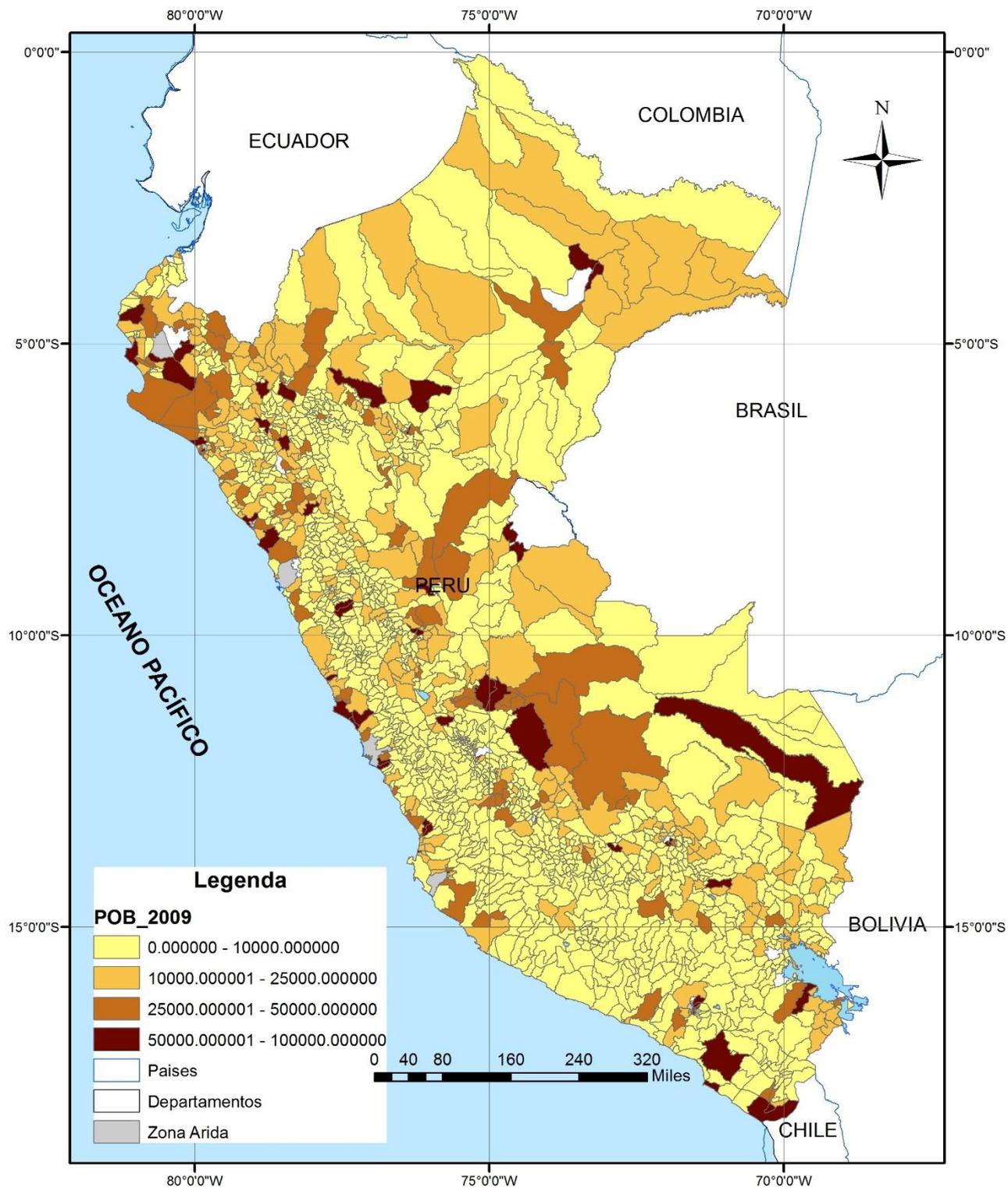
Mapa 5: Inventario de presas de agua en el Perú



Mapa 6: Distancia a ríos principales



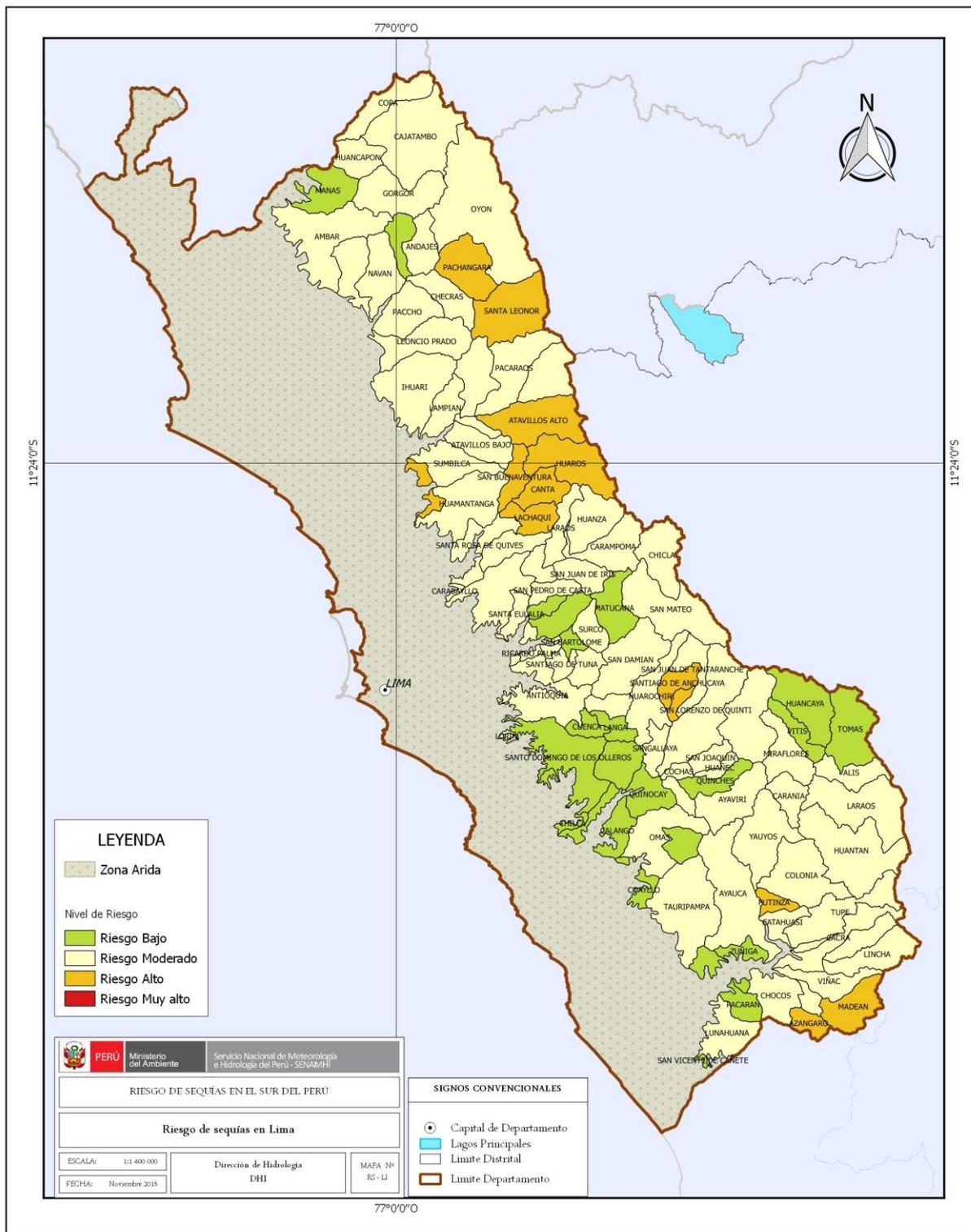
Mapa 7: Índice de Desarrollo Humano por distrito



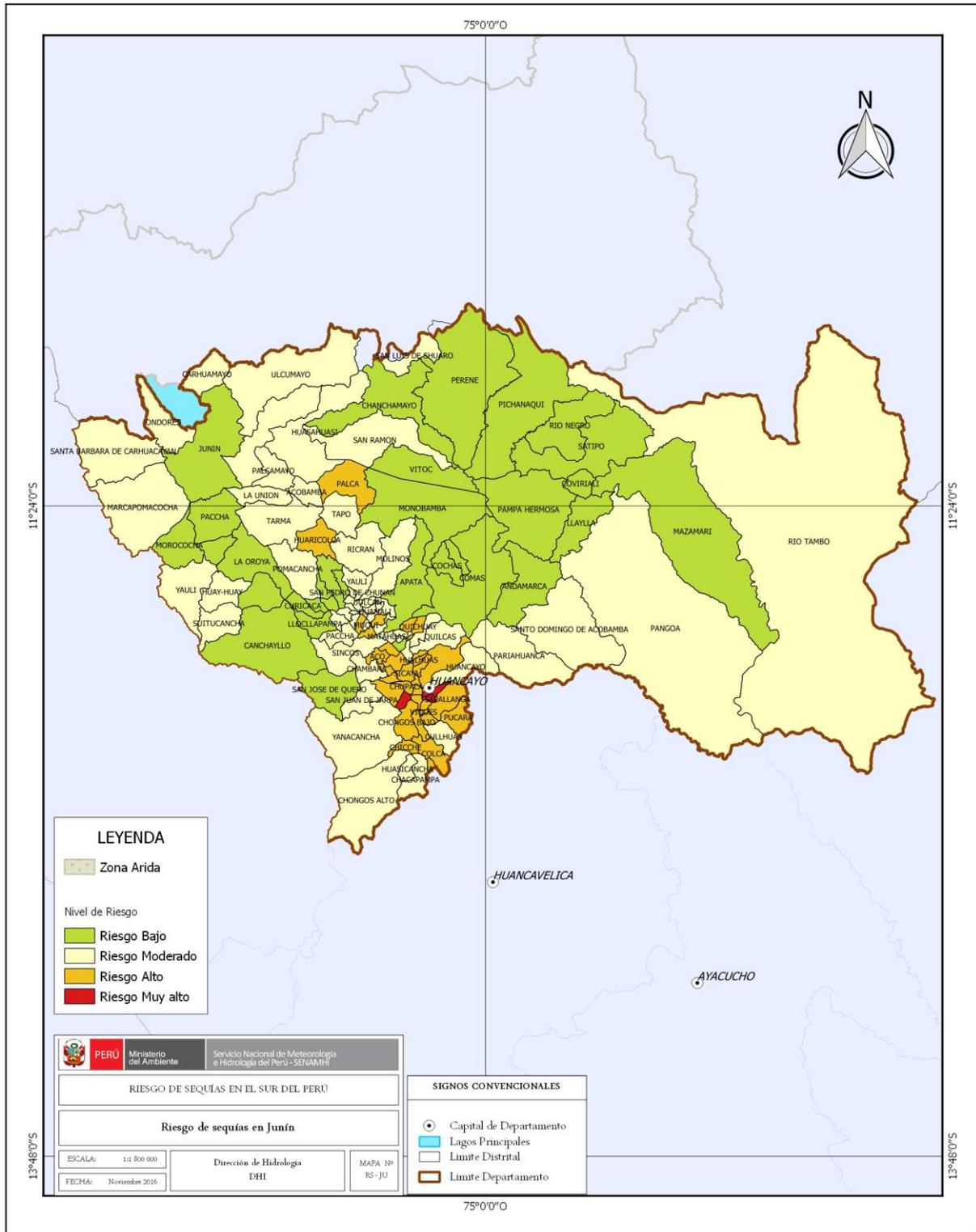
Mapa 8: Mapa de Población al 2009

Fuente: INEI

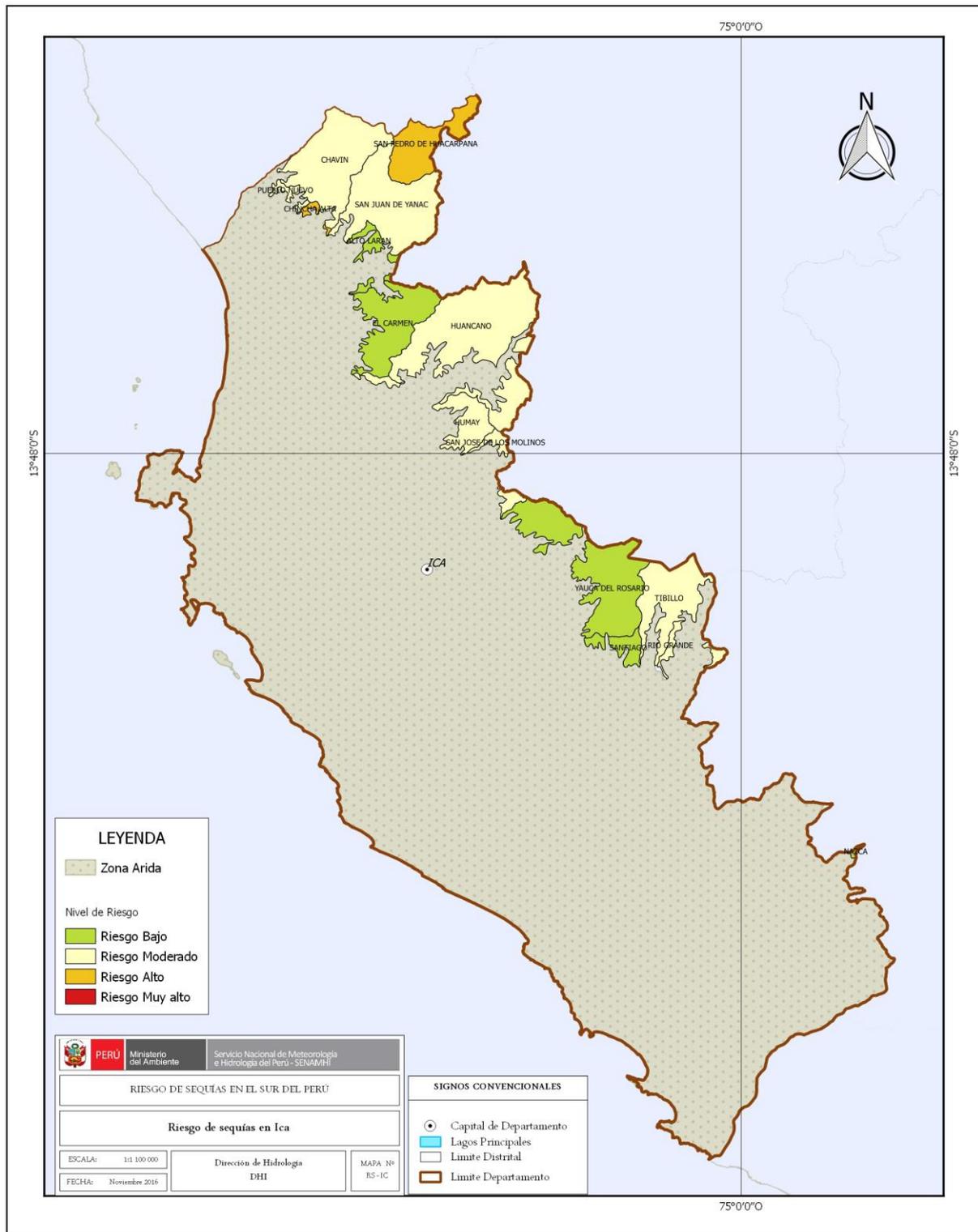
ANEXO 2 : MAPAS DE RIESGO POR DEPARTAMENTO



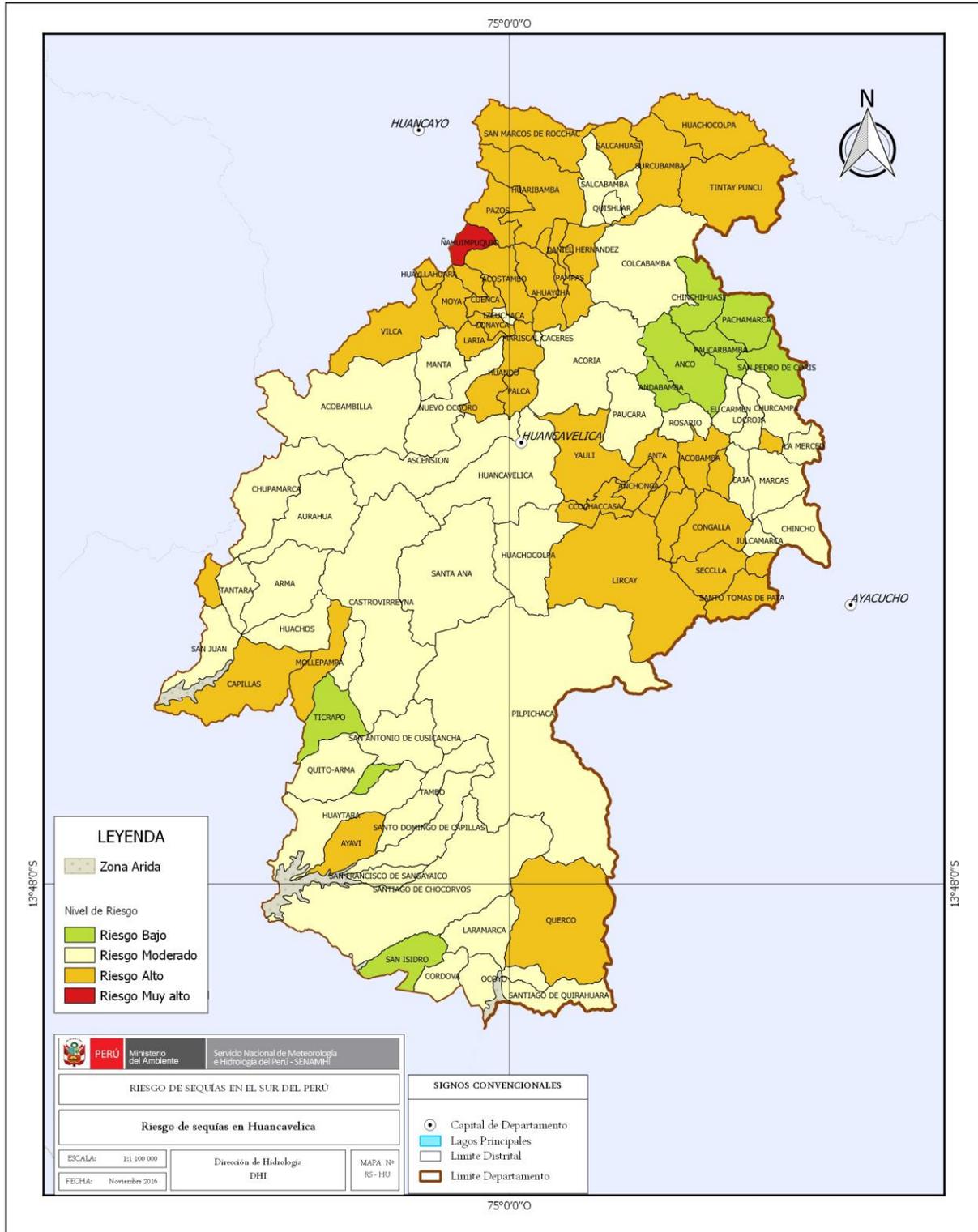
Mapa 9 Riesgo de Sequías en Lima



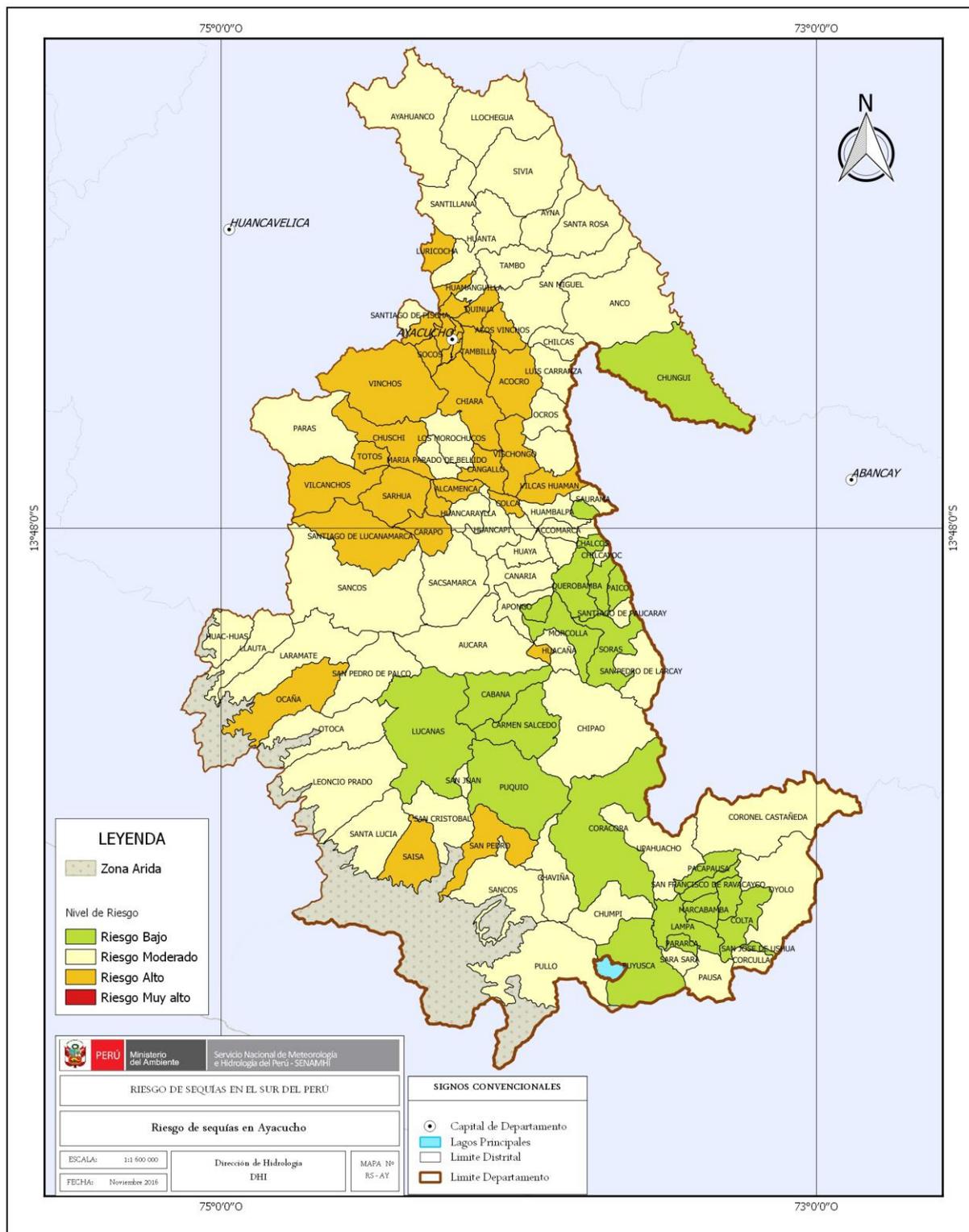
Mapa 10 Riesgo de Sequías en Lima



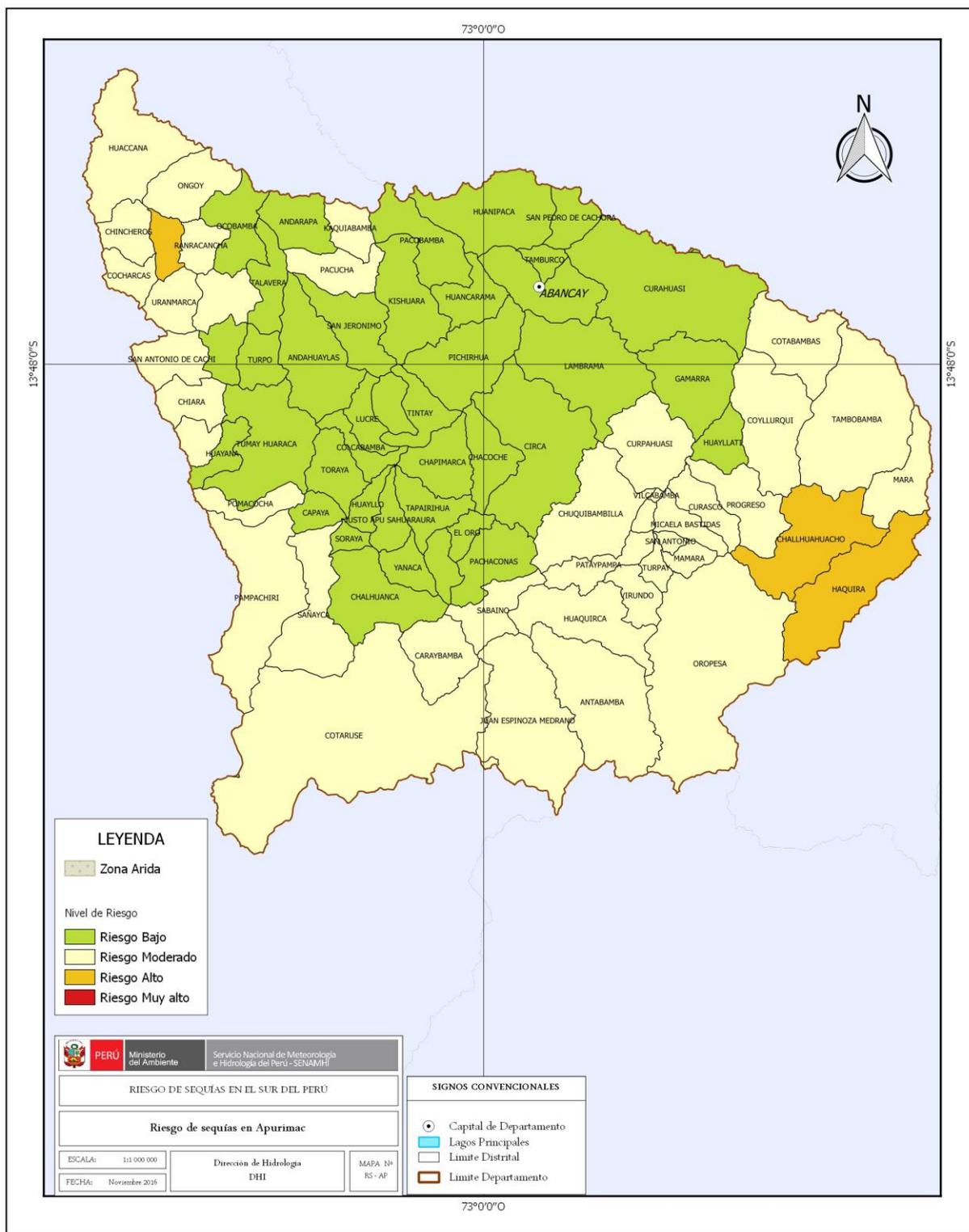
Mapa 11 Riesgo de Sequías en Ica



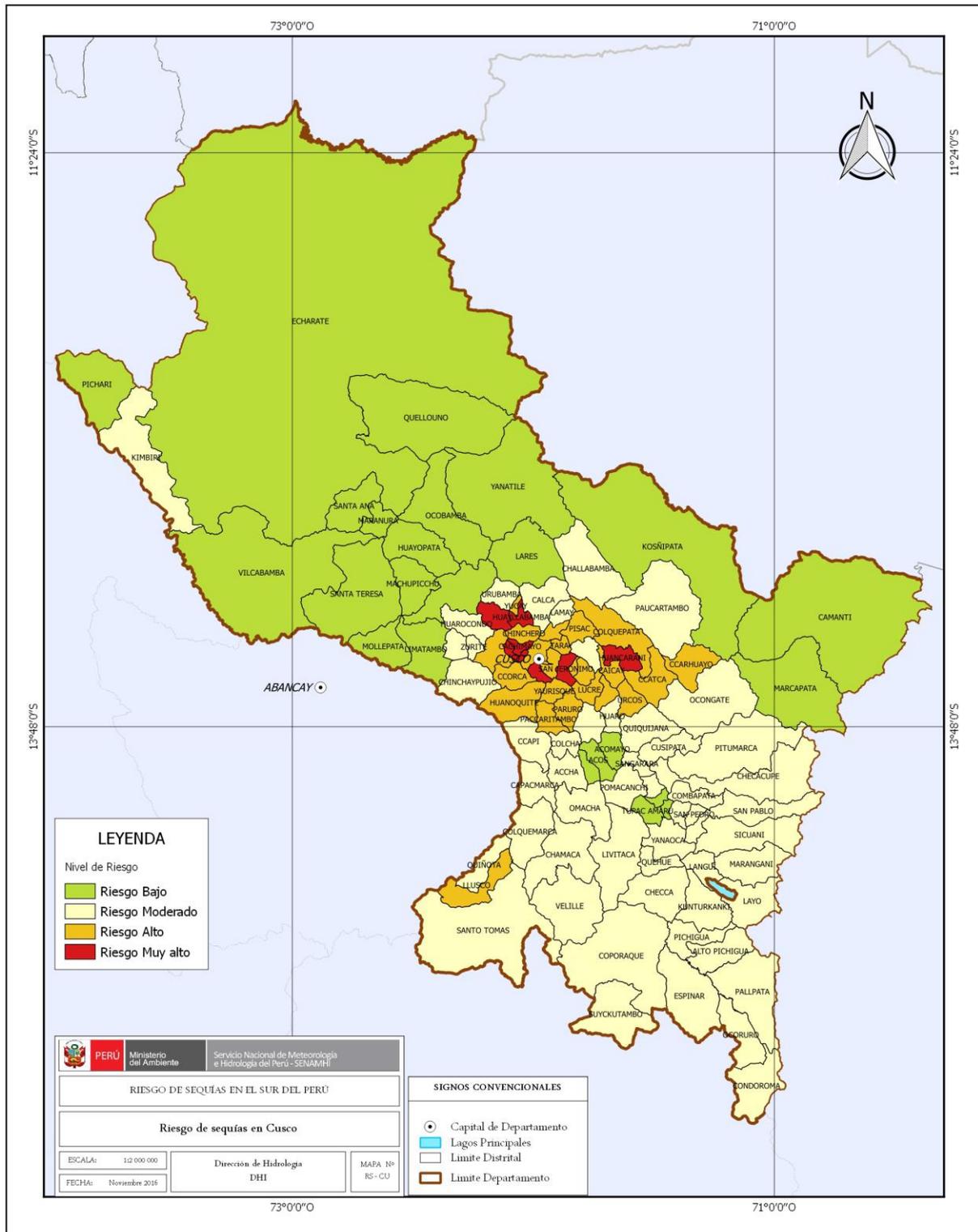
Mapa 12 Riesgo de Sequías en Huancavelica



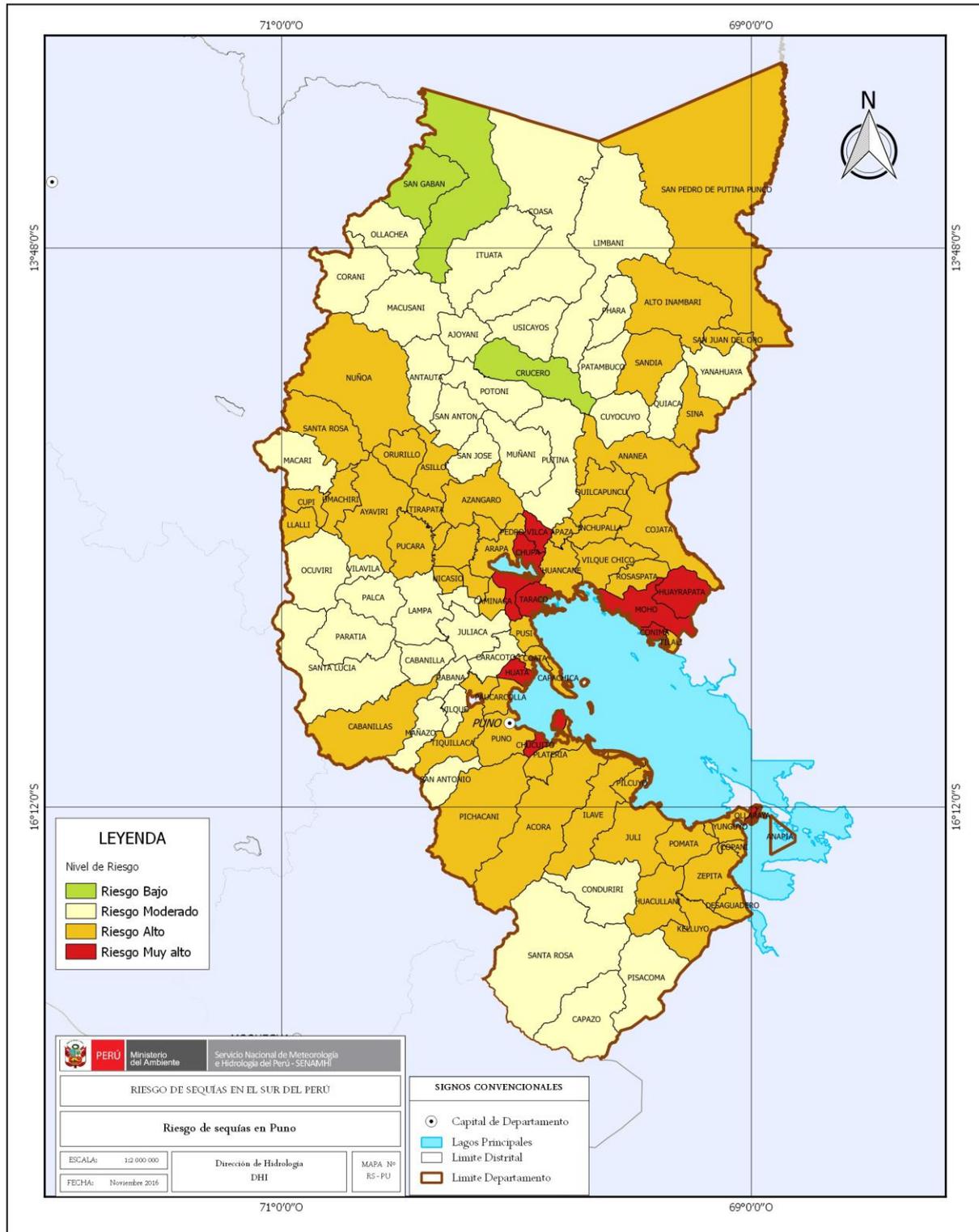
Mapa 13 Riesgo de Sequías en Ayacucho



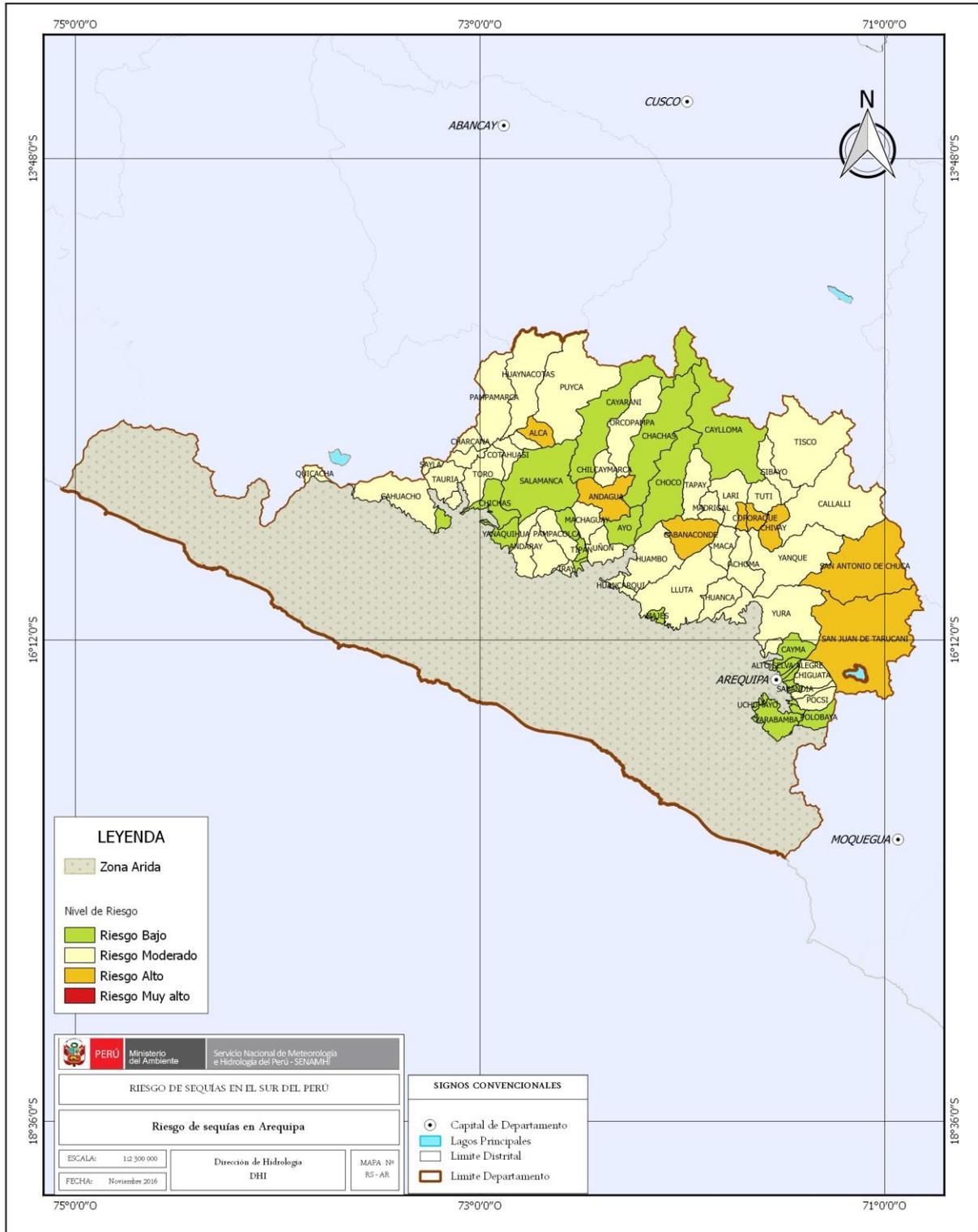
Mapa 14 Riesgo de Sequías en Apurímac



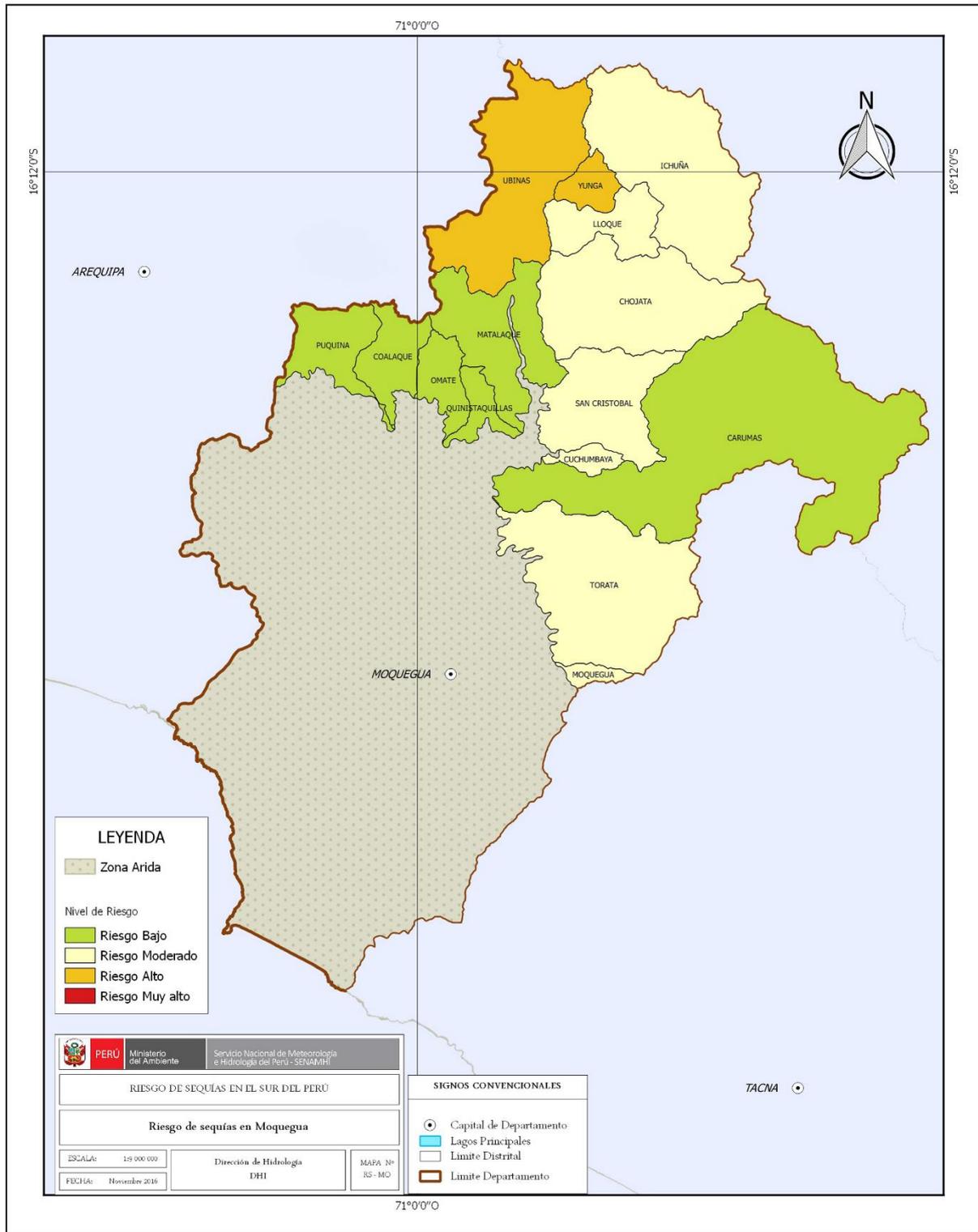
Mapa 15 Riesgo de Sequías en Cusco



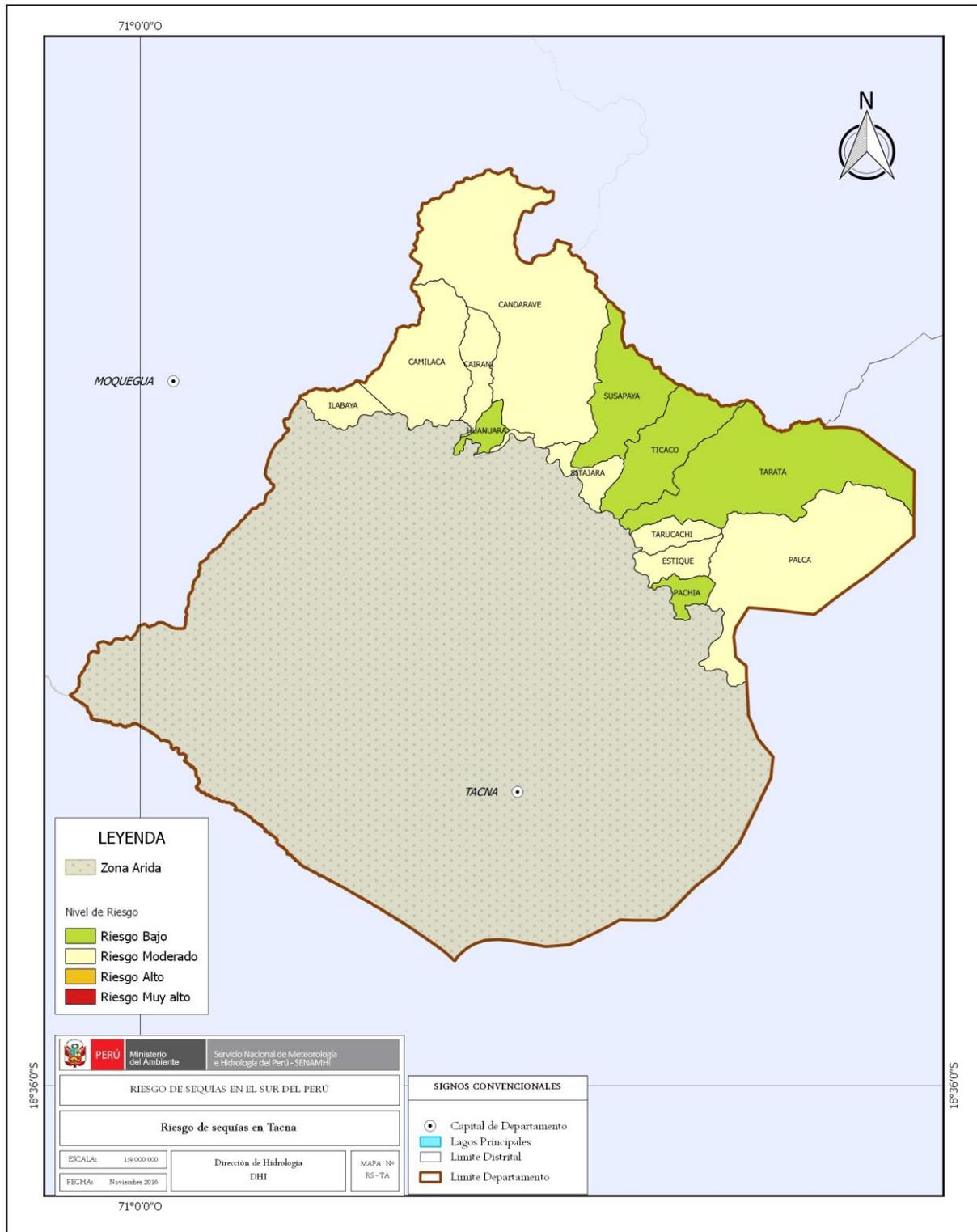
Mapa 16 Riesgo de Sequías en Cusco



Mapa 17 Riesgo de Sequías en Arequipa



Mapa 18 Riesgo de Sequías en Moquegua



Mapa 19 Riesgo de Sequías en Tacna