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

Análisis espacio - temporal de erosión de suelos por regiones hidrológicas en el Perú (1981 - 2014)

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo

AUTOR

Evelin Daysi SABINO ROJAS

ASESOR

José Luis QUISPE VÍLCHEZ

Lima, Perú

2016

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

Sabino, E. (2016). *Análisis espacio - temporal de erosión de suelos por regiones hidrológicas en el Perú (1981 - 2014)*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

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 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 martes 15 de noviembre del 2016, siendo las 19:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Jurado Calificador.

Ing. Ayala Gutiérrez, Máximo	Presidente
Ing. Garnica Gonzáles, Luis	Miembro
Ing. Loayza Alatrista, Dante	Miembro

Reunidos en Acto Académico Público de Sustentación de la TESIS titulada: **"ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE EROSIÓN DE SUELOS POR REGIONES HIDROLÓGICAS EN EL PERÚ (1981-2014)",** presentada por la Bachiller EVELIN DAYSI SABINO ROJAS, para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo.

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

Concluida la sustentación de Tesis, el Jurado procedió a evaluar y calificar la calidad y sustentación en secreto, cuyo calificativo fue: diecisiete (17); aprobado sobresaliente

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 Doña EVELIN DAYSI SABINO ROJAS.

Siendo las 20:10 se dio por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (05) Actas Originales de la Sustentación de Tesis, firmadas por el Jurado Calificador.

Ciudad Universitaria, 15 de noviembre del 2016

Ing. MÁXIMO AYALA GUTIÉRREZ
PRESIDENTE

Ing. LUIS GARNICA GONZÁLES
MIEMBRO

Ing. DANTE LOAYZA ALATRISTA
MIEMBRO

Dedicatoria

Acto que dedico a Dios.

Agradecimientos

Al Ing. José Luis Quispe Vílchez, asesor de Tesis, por sus sugerencias y apoyo en el presente trabajo de investigación.

Al PhD. Waldo Lavado Casimiro, director de del área de Investigación de Hidrología del SENAMHI, quién desde el primer momento me ofreció sin titubeo su confianza, su excelente dirección y apoyo científico para la realización de esta Tesis.

Al **Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología** (SENAMHI) **del Perú** por la confianza y la información disponible proporcionada para la ejecución de la Tesis.

A la Dirección de Hidrología del SENAMHI por el apoyo. En especial a mis compañeros de trabajo de Hidrología, por haber compartido sus conocimientos y haberme inspirado con su labor como investigadores. Al Ingeniero Agrícola Carlos Fernandéz, a la Ingeniera Ambiental Fiorella Vega, al Bachiller en Mecánica de Fluidos José Zevallos y Al Bachiller en Ingeniería Geográfica César Aybar por su confianza y apoyo sincero para desarrollar el presente trabajo.

Al Dr. Alejandro Alcántara, por sus aportes y sugerencias en un inicio de la investigación.

Al ing. Agrónomo Luis Garnica Gonzales por sus aportes y sugerencias en esta investigación.

A mis padres y mis hermanos como una pequeña muestra de agradecimiento por su amor, apoyo y por su comprensión en todo momento.

¡Gracias!

Resumen

La degradación de suelos por erosión hídrica elimina la capa superficial del suelo, reduce los niveles de materia orgánica y contribuye a la destrucción de la estructura del suelo, aumentando el riesgo por erosión. El Perú tiene pisos altitudinales muy variados y muy marcados, tiene variedades de cubierta vegetal, intensidades de lluvias y propiedades de suelos diferenciadas. Estas diversas caracteristicas del territorio se ven representadas en tres Regiones Geográficas (Costa, Andina y Amazónica). A nivel nacional, el Perú no cuenta con datos o registro de tasas de erosión. El objetivo de este estudio fue analizar espacial y temporalmente la erosión de suelos por Regiones Hidrológicas. La metodología aplicada para esta investigación es la Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), su aplicación hace uso de factores que fueron obtenidos y procesados a través de sistemas de Información Geográfica (SIG). Los parámetros de erosión de suelos fueron evaluados de la siguiente manera: el factor-R (erosividad) estimado a partir de datos interpolados de precipitación del producto PISCO precm* (obtenidas de estaciones climatológicas e hidrológicas e imágenes satelitales), el mapa del factor K (erodabilidad) se obtuvo a partir de la clasificación textural y el tipo de suelo, el mapa del factor C (cubierta vegetal) basada en el mapa de vegetación del Perú, el factor LS (topográfico) basado en un Modelo de Elevación Digital y el factor P (prácticas de conservación) hace uso de un mapa topográfico desarrollado para la vegetación siguiendo las curvas de nivel. Por integración de los factores y haciendo uso de la ecuación RUSLE, se obtuvo los mapas de erosión de suelo (periodo 1981-2014). Los resultados fueron analizados por Regiones Hidrológicas.

Palabras clave: Erosión de suelo · RUSLE · SIG

* PISCO precm (Peruvian Interpolation data of the SENAMHI'S Climatological and Hidrological Observations)

Índice general

Dedicatoria **2**

Agradecimientos **3**

Resumen **4**

Índice de figuras **8**

Índice de cuadros **13**

1. Introducción **14**
1.1. Antecedentes . . . 15
1.2. Planteamiento del Problema . . . 16
1.3. Formulación del Problema . . . 17
1.4. Objetivos . . . 17
1.4.1. Objetivo General . . . 17
1.4.2. Objetivos Específicos . . . 18
1.5. Hipótesis . . . 18
1.6. Justificación . . . 18
1.7. Finalidad e Importancia . . . 19

2. Marco teórico y conceptual **24**
2.1. La Erosión: generalidades . . . 24
2.1.1. Los tres actos de la erosión . . . 25
2.1.2. Tipos de Erosión . . . 26
2.1.3. Los agentes de la erosión . . . 27
2.1.4. Formas de la erosión hídrica . . . 27
2.2. Modelos matemáticos para estimar la erosión . . . 29
2.2.1. Modelos empíricos . . . 29
2.2.2. Modelos conceptuales . . . 30
2.2.3. Modelos de base física . . . 30

3. Metodología **36**
3.1. La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) 36
3.1.1. Factor erosividad de la lluvia 37
3.1.2. Factor erodabilidad del suelo 38
3.1.3. Factor topográfico 39
3.1.4. Factor cobertura del suelo 39
3.1.5. Factor prácticas de conservación 40
3.2. Evolución y críticas al modelo 40

4. Zona de Estudio **42**
4.1. Descripción general del Perú 42
4.2. Aspectos de Localización 42
4.2.1. Ubicación Política 42
4.2.2. Ubicación Geográfica 43
4.2.3. Superficie 44
4.2.4. Límites 44
4.3. Descripción del Territorio 44
4.3.1. La Región Geográfica de la Costa 45
4.3.2. La Región Geográfica Andina 47
4.3.3. La Región Geográfica Amazónica 47
4.4. Aspectos Físicos 48
4.4.1. Clima 48
4.5. Heterogeneidad Geográfica 50

5. Construcción de la base de datos **52**
5.1. Base de datos 52
5.1.1. Producto PISCO precm 53
5.1.2. Modelo Digital de Elevación (MDE) 55
5.1.3. Cobertura del suelo 55
5.1.4. Tipo de suelo 56
5.2. Regiones hidrológicas 57
5.3. Sistema de codificación Pfafstetter 58

6. Aplicación de la Metodología **60**
6.1. Modelo RUSLE 60
6.1.1. Estimación de los factores de Erosión Hídrica 62
6.1.2. Diagrama de flujo 66

7. Resultados **72**
7.1. Región Hidrológica Pacífico 1 72
7.2. Región Hidrológica Pacífico 2 74
7.3. Región Hidrológica Pacífico 3 74
7.4. Región Hidrológica Pacífico 4 75
7.5. Región Hidrológica Pacífico 5 76
7.6. Región Hidrológica Pacífico 6 78
7.7. Región Hidrológica Atlántico 7 81
7.8. Región Hidrológica Atlánticoo 9 82
7.9. Región Hidrológica Atlántico 10 84
7.10. Región Hidrológica Atlántico 11 85
7.11. Región Hidrológica Atlántico 12 87
7.12. Región Hidrológica Atlántico 13 89
7.13. Región Hidrológica Titicaca 14 90

8. Conclusiones **93**

9. Recomendaciones **95**

10. Apéndice 1 **96**

11. Apéndice 2 **131**

12. Apéndice 3 **136**

Bibliografía **171**

Bibliografía **171**

Índice de figuras

1.1. Estapas de la erosión hídrica: (a)Las tasas de erosión y su variación entre entre 4000 a 6000 años. (b) Las tasas de erosión de 0 a 2000 años. (c) Relación entre las tasas de erosión entre 0 a 2000 años y 4000 y 6000 años (Herman et al., 2013). 20

1.2. Mapa de Intensidades de erosión de suelos del Perú. *Fuente: INRENA, 1996* 21

1.3. Mapa Geodinámico de los peligros naturales del Perú. *Fuente: INGEMMET, 1999* 22

1.4. Mapa de Susceptibilidad por Movimientos de Masa del Perú. *Fuente: INGEMMET, 1999* 23

2.1. Estapas de la erosión hídrica: (A)Impacto de la gota de lluvia por el suelo desnudo.(B) Deseintegración de los agregados en partículas minúsculas. (C) Escurrimiento superficial del agua de lluvia. (D) Cuando la velocidad de escurrimiento es reducida, la carga de partículas de suelo que escurre con el agua son depositados en lugares más bajos (Derpsch et al., 1991). 25

2.2. PROCESOS DE EROSIÓN: La primera fase es la de erosión o desagregación, la segunda es el transporte de los materiales desgastados y la última fase es la acumulación o sedimentación. . . . 26

2.3. Las imágenes muestran la densidad de la vegetación, la topografía y demás características que determinan los factores climáticos relevantes a la ocurrencia de la erosión de diversos lugares del Perú. (a) Huarochirí, provincia de Lima, centro del Perú. (b) Carhuaz, provincia de Áncash, norte del Perú. (c) Junín, provincia de Junín, centro del Perú. (d) Chanchamayo, provincia de Junín. (e) Iquitos, capital de la provincia de Maynas, del departamento de Loreto. 33

2.4. Una gruesa gota de lluvia (a) sobre la superficie húmeda del suelo originando un cráter en miniatura (b). Los granos de arena y de arcilla son impulsados al aire, removiendose la superficie del suelo. *Fuente: Fotografía oficial de la marina de los Estados Unidos.* 34
2.5. Erosión Laminar Superficial. (Muñoz, 2006) 34
2.6. Erosión en Canalillos. 35
2.7. Aspecto de una cárcava. 35

3.1. Nomograma de Wischmeiere y Smith para el cálculo del factor K. . . 39
3.2. Fenómeno de intercepto de las gotas de lluvia 40

4.1. Ubicación del Perú 43
4.2. Modelo Digital de Elevación (DEM) del Perú 45

5.1. Evolución temporal mensual de la cantidad de datos utilizados para generar PISCO-precipitación 54
5.2. Portal de Descargas del MDE SRTM 4.1 56
5.3. Portal de descargas del GlobeLand30 57
5.4. Porcentaje de limo, arcilla y arena 57
5.5. Mapa de las 14 Regiones Hidrológicas del Perú 59

6.1. Diagrama triangular de las clases texturales básicas del suelo según el tamaño de partículas, de acuerdo con el United States Departament of Agriculture (USDA) 64
6.2. La clasificación textural de suelos, está clasificada en textural generales de gruesa, media y fina de acuerdo al porcentaje de arena, limo y arcilla. 65
6.3. Valores del factor de erodabilidad (factor K) de acuerdo a la taxonomía y la textura de suelo 69
6.4. Valores para el factor de prácticas de conservación (P) 70
6.5. Valores de Cobertura Vegetal (C) 70
6.6. Diagrama de flujo del proceso de cálculo para la estimación de la erosión * Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) 71

7.1. Mapa de ubicación de la Región Hidrológica “Pacífico 1” 73
7.2. Erosión de suelos para la Región Hidrológica “Pacífico 1” 74
7.3. Mapa de ubicación de la Región Hidrológica “Pacífico 2” 75
7.4. Erosión de suelos para la Región Hidrológica “Pacífico 2” 76
7.5. Mapa de ubicación de la Región Hidrológica “Pacífico 3” 76

7.6. Erosión de suelos para la Región Hidrológica “Pacífico 3” 77
7.7. Mapa de ubicación de la Región Hidrológica “Pacífico 4” 78
7.8. Erosión de suelos para la Región Hidrológica “Pacífico 4” 78
7.9. Mapa de ubicación de la Región Hidrológica “Pacífico 5” 80
7.10. Erosión de suelos para la Región Hidrológica “Pacífico 5” 81
7.11. Mapa de ubicación de la Región Hidrológica “Pacífico 6” 81
7.12. Erosión de suelos para la Región Hidrológica “Pacífico 6” 82
7.13. Mapa de ubicación de la Región Hidrológica “Atlántico 7” 83
7.14. Erosión de suelos para la Región Hidrológica “Atlántico 7” 84
7.15. Mapa de ubicación de la Región Hidrológica “Atlántico 9” 84
7.16. Erosión de suelos para la Región Hidrológica “Atlántico 9” 85
7.17. Mapa de ubicación de la Región Hidrológica “Atlántico 10” 86
7.18. Erosión de suelos para la Región Hidrológica “Atlántico 10” 86
7.19. Mapa de ubicación de la Región Hidrológica “Atlántico 11” 87
7.20. Erosión de suelos para la Región Hidrológica “Atlántico 11” 88
7.21. Mapa de ubicación de la Región Hidrológica “Atlántico 12” 88
7.22. Erosión de suelos para la Región Hidrológica “Atlántico 12” 89
7.23. Mapa de ubicación de la Región Hidrológica “Atlántico 13” 90
7.24. Erosión de suelos para la Región Hidrológica “Atlántico 13” 91
7.25. Mapa de ubicación de la Región Hidrológica “Titicaca 14” 91
7.26. Erosión de suelos para la Región Hidrológica “Titicaca 14” 92

10.1. Erosión Pluvial Anual (1981) 97
10.2. Erosión Pluvial Anual (1982) 98
10.3. Erosión Pluvial Anual (1983) 99
10.4. Erosión Pluvial Anual (1984) 100
10.5. Erosión Pluvial Anual (1985) 101
10.6. Erosión Pluvial Anual (1986) 102
10.7. Erosión Pluvial Anual (1987) 103
10.8. Erosión Pluvial Anual (1988) 104
10.9. Erosión Pluvial Anual (1989) 105
10.10. Erosión Pluvial Anual (1990) 106
10.11. Erosión Pluvial Anual (1991) 107
10.12. Erosión Pluvial Anual (1992) 108
10.13. Erosión Pluvial Anual (1993) 109
10.14. Erosión Pluvial Anual (1994) 110
10.15. Erosión Pluvial Anual (1995) 111
10.16. Erosión Pluvial Anual (1996) 112

10.17. Erosión Pluvial Anual (1997) . . . 113
10.18. Erosión Pluvial Anual (1998) . . . 114
10.19. Erosión Pluvial Anual (1999) . . . 115
10.20. Erosión Pluvial Anual (2000) . . . 116
10.21. Erosión Pluvial Anual (2001) . . . 117
10.22. Erosión Pluvial Anual (2002) . . . 118
10.23. Erosión Pluvial Anual (2003) . . . 119
10.24. Erosión Pluvial Anual (2004) . . . 120
10.25. Erosión Pluvial Anual (2005) . . . 121
10.26. Erosión Pluvial Anual (2006) . . . 122
10.27. Erosión Pluvial Anual (2007) . . . 123
10.28. Erosión Pluvial Anual (2008) . . . 124
10.29. Erosión Pluvial Anual (2009) . . . 125
10.30. Erosión Pluvial Anual (2010) . . . 126
10.31. Erosión Pluvial Anual (2011) . . . 127
10.32. Erosión Pluvial Anual (2012) . . . 128
10.33. Erosión Pluvial Anual (2013) . . . 129
10.34. Erosión Pluvial Anual (2014) . . . 130

11.1. . Factor Topográfico (LS) . . . 132
11.2. . Factor Erodabilidad (K) . . . 133
11.3. . Factor de Cobertura Vegetal (C) . . . 134
11.4. . Factor Prácticas de Conservación (P) . . . 135

12.1. . Erosión de Suelo Anual (1981) . . . 137
12.2. . Erosión de Suelo Anual (1982) . . . 138
12.3. . Erosión de Suelo Anual (1983) . . . 139
12.4. . Erosión de Suelo Anual (1984) . . . 140
12.5. . Erosión de Suelo Anual (1985) . . . 141
12.6. . Erosión de Suelo Anual (1986) . . . 142
12.7. . Erosión de Suelo Anual (1987) . . . 143
12.8. . Erosión de Suelo Anual (1988) . . . 144
12.9. . Erosión de Suelo Anual (1989) . . . 145
12.10. Erosión de Suelo Anual (1990) . . . 146
12.11. Erosión de Suelo Anual (1991) . . . 147
12.12. Erosión de Suelo Anual (1992) . . . 148
12.13. Erosión de Suelo Anual (1993) . . . 149
12.14. Erosión de Suelo Anual (1994) . . . 150

12.15. Erosión de Suelo Anual (1995) 151
12.16. Erosión de Suelo Anual (1996) 152
12.17. Erosión de Suelo Anual (1997) 153
12.18. Erosión de Suelo Anual (1998) 154
12.19. Erosión de Suelo Anual (1999) 155
12.20. Erosión de Suelo Anual (2000) 156
12.21. Erosión de Suelo Anual (2001) 157
12.22. Erosión de Suelo Anual (2002) 158
12.23. Erosión de Suelo Anual (2003) 159
12.24. Erosión de Suelo Anual (2004) 160
12.25. Erosión de Suelo Anual (2005) 161
12.26. Erosión de Suelo Anual (2006) 162
12.27. Erosión de Suelo Anual (2007) 163
12.28. Erosión de Suelo Anual (2008) 164
12.29. Erosión de Suelo Anual (2009) 165
12.30. Erosión de Suelo Anual (2010) 166
12.31. Erosión de Suelo Anual (2011) 167
12.32. Erosión de Suelo Anual (2012) 168
12.33. Erosión de Suelo Anual (2013) 169
12.34. Erosión de Suelo Anual (2014) 170

Índice de cuadros

1.1. Superficie afectada por el tipo y causa de erosión a nivel mundial . . 17

2.1. Modelos de erosión y transporte de sedimentos 32

7.1. Unidades Hidrográficas para la Región Pacífico 1 73
7.2. Unidades Hidrográficas para la Región Pacífico 2 75
7.3. Unidades Hidrográficas para la Región Pacífico 3 77
7.4. Unidades Hidrográficas para la Región Pacífico 4 79
7.5. Unidades Hidrográficas para la Región Pacífico 5 80
7.6. Unidades Hidrográficas para la Región Pacífico 6 82
7.7. Unidades Hidrográficas para la Región Atlántico 7 83
7.8. Unidades Hidrográficas para la Región Atlántico 9 85
7.9. Unidades Hidrográficas para la Región Atlántico 10 86
7.10. Unidades Hidrográficas para la Región Atlántico 11 87
7.11. Unidades Hidrográficas para la Región Atlántico 12 89
7.12. Unidades Hidrográficas para la Región Atlántico 13 90
7.13. Unidades Hidrográficas para la Región Atlántico 14 92

Capítulo 1

Introducción

Se entiende por degradación toda modificación que conduzca al deterioro del suelo. Es un proceso que disminuye su capacidad actual y potencial para producir cualitativamente bienes y servicios (FAO UNESCO, 1983). Dentro de los procesos de degradación del suelo, la erosión es el proceso que afecta al mayor números de hectáreas y la erosión hídrica es el fenómeno más significativo (Cuadro 1.1). Este fenómeno se considera uno de los problemas más serios que enfrenta y enfrentará en un futuro la humanidad, ya que se encuentra asociado con prácticas inapropiadas de agricultura, sobrepastoreo, aprovechamiento desordenado de los bosques, matorrales, pasatizales, selvas y cambios de uso de suelos de terrenos forestales para uso agropecuario principalmente (Muñoz, 2006).

Los factores que afectan la erosión están en función del tipo de erosión. Sin embargo; como regla general, se puede decir que la erosión que ocurrirá en un suelo específico va a depender directamente de ciertas variables (Morgan, 2009), las cuales son:

* Clima
* Topografía
* Vegetación
* Tipo de suelo
* Uso de la tierra
* Gología (litología)
* Antrópicos

La lluvia es uno de los principales agentes erosivos del suelo, la necesidad de conocer los efectos de la precipitación e intensidad, y en especial el impacto de las gotas de lluvia sobre las propiedades físicas del suelo superficial y las consecuencias que

ello provoca en la infiltración, escorrentía y erosión, llevaron al desarrollo de este capítulo.

1.1. Antecedentes

En la actualidad el estudio de erosión en el Perú es muy escasa o está limitada a los registros o disponibilidad de datos; sin embargo, tenemos formas alternativas de poder realizarlas, haciendo uso de las imágenes de satélite.

A continuación se presentará los estudios antecedentes de erosión realizados en el Perú.

En el año 1996 el Instituto Nacional de Recursos Naturales - INRENA, en base a los trabajos de la ex ONERN editó a nivel exploratorio un **mapa de Intensidades de Erosión de Suelos del Perú** utilizando información cartográfica, representada por cartas nacionales, fotografías aéreas y por imágenes captadas mediante radar y satélite. La clasificación de las cuatro unidades de intensidad de erosión obedece a diversos factores como: origen, posición fisiografía, variación litológica, influencia antrópica y climática. Este tipo de información está disponible en formato digital en el Motor de Búsqueda de Recursos Educativos del Portal Educativo Nacional, administrativo por el Ministerio de Educación de la República del Perú (`portal.perueduca.edu.pe`).

En 1999 El Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico-INGEMMET elaboró el **Mapa Geodinámico del Perú** a una escala de 1:6 000 000, utilizando como base la cartografía oficial del IGN. El Mapa clasifica su leyenda en tres peligros naturales: erosión de laderas, erosión fluvial y erosión marina. Dentro de la erosión de laderas tenemos varios fenómenos como erosión en zanjas profundas o cárcavas, remoción de escombros de talud y erosión de mantos para proceso de desgaste de las superficie. Siendo los agentes el agua de lluvias, el escurrimiento superficial, los vientos, etc.(`geocatminapp.ingemmet.gob.pe`).

En el 2009, el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico a través de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico, concluyó el inventario de peligros geológicos en el Perú. Siendo uno de los productos, el **"Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa del Perú"** escala 1:1 000 000 (Villacorta et al.) Este mapa hace uso del Mapa de Susceptibilidad, el cual se obtuvo usando el modelo

heurístico multivariado y para validar el modelo se utilizó el inventario de Peligros Geológicos nacional. El Mapa de Inventario de Peligros Geológicos comprende los siguientes procesos: caída, deslizamiento, flujo, movimiento complejo, reptación, vuelco, arenamiento, erosión fluvial, erosión marina, erosión de ladera, hundimiento e inundación (Villacorta et al.).

Aparte de los trabajos indicados no hay mayores registros sobre la erosión de suelos en el país; de allí la importancia de realizar esta investigación.

1.2. Planteamiento del Problema

A nivel mundial la erosión hídrica es el tipo de erosión más importante de degradación de suelos. La erosión es un proceso que elimina la capa orgánica superficial del suelo, reduce los niveles de materia orgánica y contribuye a la destrucción de la estructura del suelo (DGAAA - Ministerio de Agricultura, Perú).

Considerando que la erosión de los suelos, elemento central determinante de la *sedimentación*, colmara cauces y cuerpos de agua, reduciendo su regulación hidrológica y resultando desbordes y crecientes más frecuentes.Constituye uno de los problemas que contribuye a la destrucción de gran parte de las tierras del país.

Dentro de la problemática ambiental tenemos que la oxidación acelerada de la materia orgánica del suelo removido por la erosión, incrementan en la atmósfera el CO_2, gas de efecto invernadero (Lal, 2003).

Tal es el caso que se observa en el Cuadro 1.1 que la mayor cantidad de superficie afectada a nivel mundial es ocasionada por la erosión hídrica.

La preocupación de que este fenómeno natural se intensifique teniendo como resultado el incremento de susperficies afectadas, nos hace pensar en la necesidad de conocimiento que tenemos acerca de la realidad que vamos a enfrentar. La falta de información sobre Las tasas de erosión actuales para todo el territorio peruano parece todo un reto; sin embargo, con los avances de la tecnología podemos hacer frente a esta necesidad de información, así lo demuestran estudios realizados a nivel mundial (Figura 1.1).

Cuadro 1.1: Superficie afectada por el tipo y causa de erosión a nivel mundial

Tipo y causa de erosión	**Superficie afectada** (10^6ha)
Hídrica	**1094**
Eólica	549
Degradación Química	240
Degradación física	83
Sobrepastoreo	679
Deforestación	579
Agricultura	552
Sobreexplotación	133
Industria	23
Total	1966

1.3. Formulación del Problema

Pregunta general:

¿Cuál es la variabilidad de la erosión de suelos en el Perú a nivel de Regiones Hidrológicas?

Preguntas específicas:

- ¿Cuál de los factores de erosión son los mas influyentes para la estimación de la erosión?
- ¿Cuál de las Regiones Hidrológicas es la más afectada por la erosión de suelos?
- ¿En que Regiones del Perú el modelo RUSLE representa mejor la estimación espacio-temporal de la erosión de suelos?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Evaluar la variablidad espacio-temporal de la pédida por erosión de suelos a nivel de Regiones Hidrológicas en el Perú aplicando el modelo RUSLE.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Evaluar los siguientes factores principales de erosión: factor de erosividad, factor de erodabilidad del suelo, factor topográfico, factor de cobertura vegetal y factor de prácticas de conservación. Con fines de evaluar la variablidad de la erosión de suelos con su pérdida consiguiente.
- Estimar y evaluar la erosión de suelos por Regiones Hidrológicas para todo el territorio peruano.
- Contribuir al adecuado manejo y conservación de suelos, pero evitar la pérdida del recurso por el agravamiento de los procesos de erosión.

1.5. Hipótesis

Hipotesis General:

La variabilidad de erosión de suelos en el Perú a nivel de Regiones Hidrológicas puede ser representada espacial y temporalmente por la metodología RUSLE.

Hipótesis Específicas:

- El Factor de erosividad por ser el más dinámico es el más influyente en el modelo RUSLE para la estimación de la erosión de suelos causada por la lluvia.
- Las Regiones Hidrológicas cuyos factores erosivos son más susceptibles a la lluvia serán los que se verán mas afectados por la erosión de suelos.
- El modelo RUSLE representará mejor la estimación espacio-temporal de la erosión de suelos, si la base de datos requerida representa la variabilidad del agente activo de erosión.

1.6. Justificación

Al ser escasos los estudios de erosión de suelos en el Perú, genera la necesidad y el interés por conocer u representar de la mejor manera este fenómeno. Esta investigación satisface la falta de información sobre erosión de suelos del Perú, siendo un estudio a escala nacional y con una resolución espacial de 250 metros nos permite

tener una escala media (1:5.000 a 1:15.000), esta escala nos va a permitir tomar deciciones sobre prevención y manejo (Leroi, 1996).

1.7. Finalidad e Importancia

El conocimiento de la pérdida de suelo por erosión hídrica en el Perú es fundamental para decidir el manejo y las medidas de conservación de suelo más adecuados; por ello, es importante obtener datos confiables de los factores y la velocidad a la que se está perdiendo el recurso suelo, estimando el grado de variablidad de la erosión.

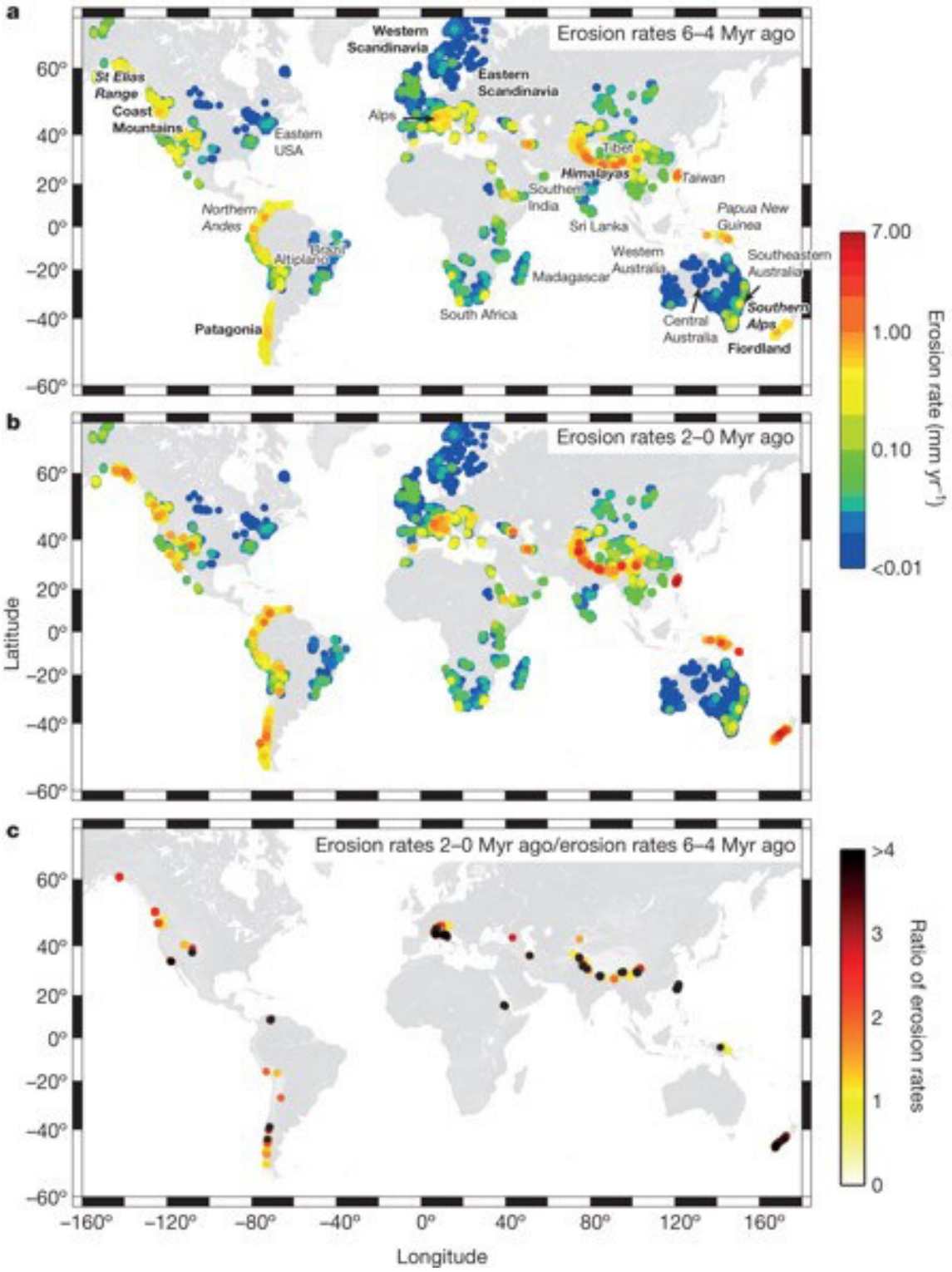


Figura 1.1: Estapas de la erosión hídrica: (a)Las tasas de erosión y su variación entre entre 4000 a 6000 años. (b) Las tasas de erosión de 0 a 2000 años. (c) Relación entre las tasas de erosión entre 0 a 2000 años y 4000 y 6000 años (Herman et al., 2013).

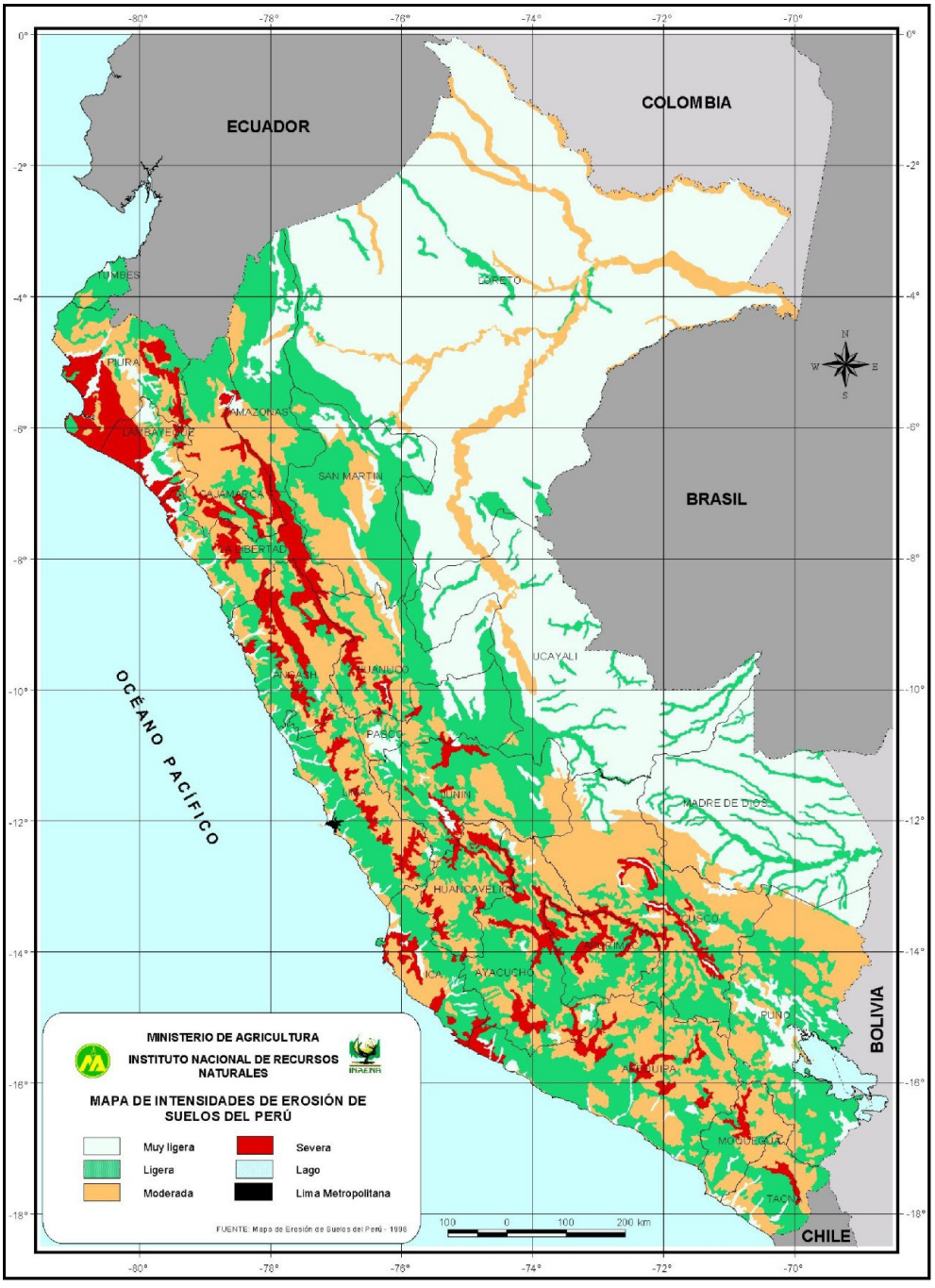


Figura 1.2: Mapa de Intensidades de erosión de suelos del Perú.
Fuente: INRENA, 1996

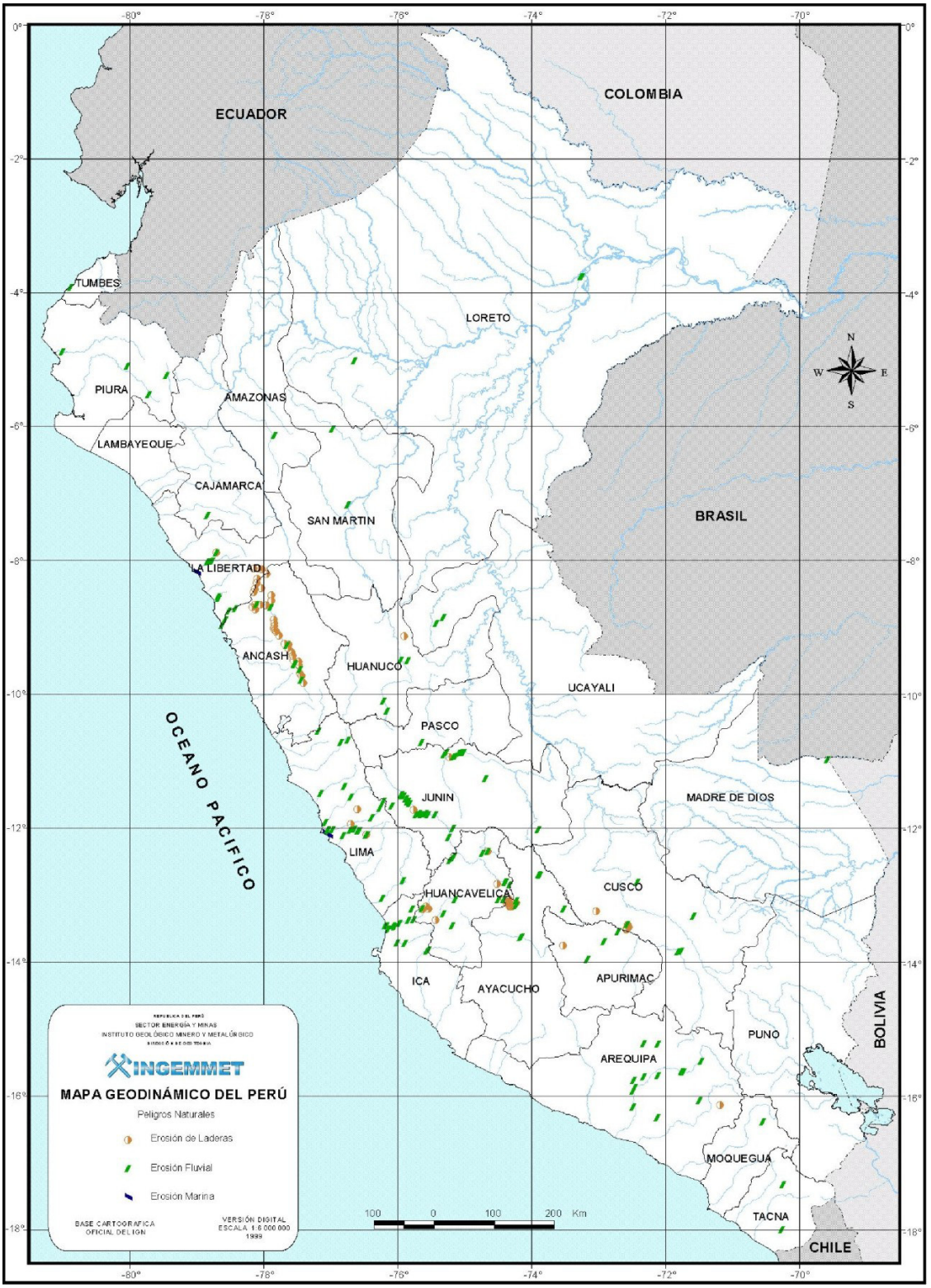


Figura 1.3: Mapa Geodinámico de los peligros naturales del Perú.
Fuente: INGEMMET, 1999

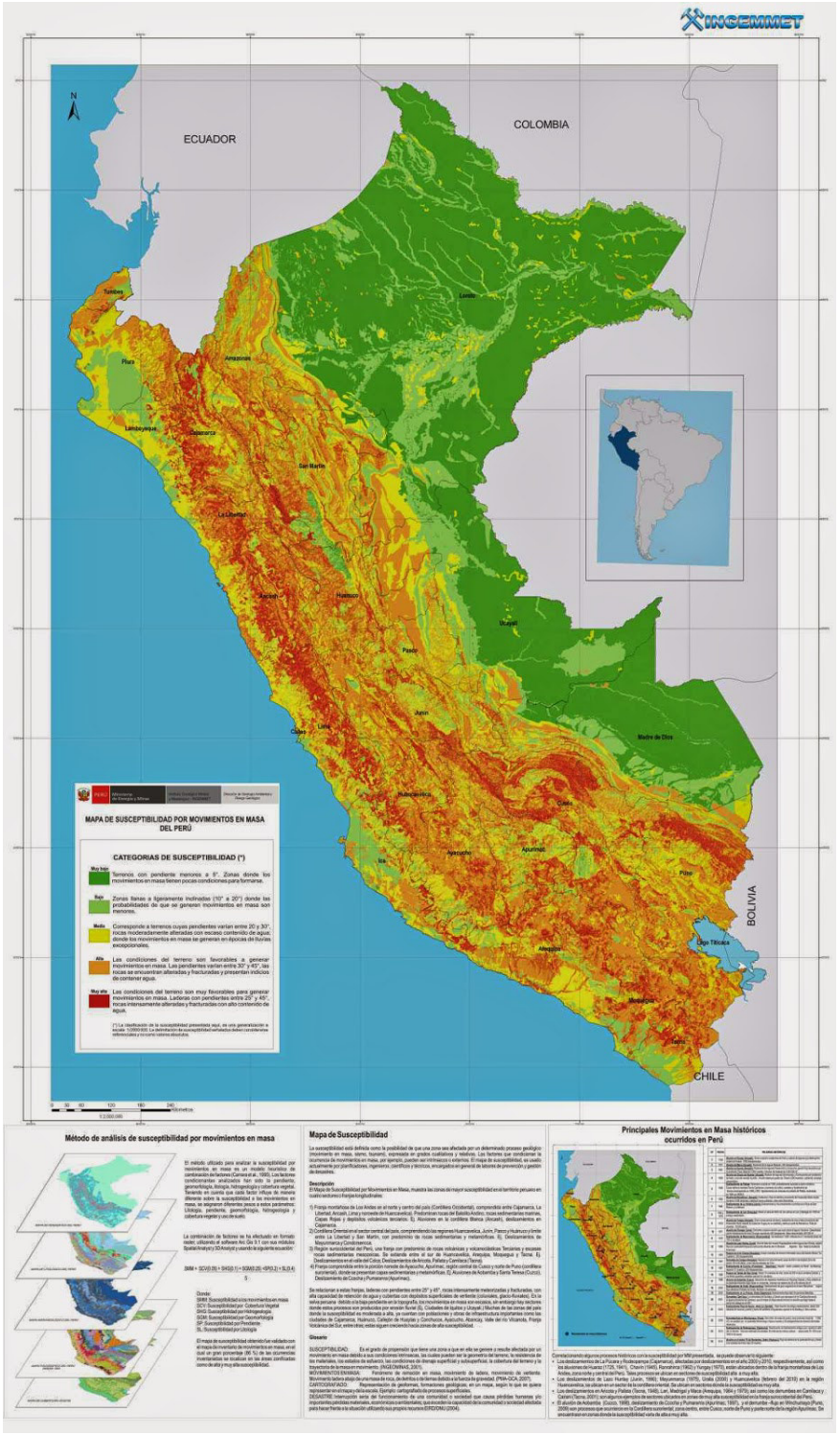


Figura 1.4: Mapa de Susceptibilidad por Movimientos de Masa del Perú. *Fuente: INGEMMET, 1999*

Capítulo 2

Marco teórico y conceptual

En este capítulo se presentará el contenido teórico que definirá el tipo de erosión que se evaluará en esta investigación, detallando los factores o variables que influyen en su desarrollo. Los efectos de la erosión conjuntamente con la importancia de su estudio.

Se hará referencia de los modelos matemáticos para estimar la erosión, dando mas detalle del modelo RUSLE.

2.1. La Erosión: generalidades

La erosión no es una entidad, sino un fenómeno concreto y muy diversificado en sus modalidades Viers et al., 1974. La erosión, es entendida como la remoción, transporte y deposición de partículas de suelo, materia orgánica y nutriente soluble. Se presenta con diversos grados de intensidad, llegando muchas veces hasta condiciones tales, que no es posible restaurarlas, provocando en consecuencia el desequilibrio de la estabilidad armónica a nivel de cuencas hidrográficas.

Es importante considerar la erosión, porque es un proceso que elimina la capa orgánica superficial del suelo, reduce los niveles de la materia orgánica; en consecuencia se genera un ambiente menos favorable para el crecimiento vegetal. La erosión de los suelos es uno de los procesos más dinámicos en el desarrollo del paisaje. Es el proceso responsable de la degradación de suelos, de la reducción del nivel de fertilidad y de la productividad. La erosión es causada principalmente por las lluvias y los escurrimientos (Fig. 2.1). Dicha erosión produce una pérdida irremediable del suelo, el cual es para fines prácticos, un recurso no renovable.

Para entenderlo mejor tenemos la necesidad de precisar el vocabulario que hace referencia a los hechos de erosión (Villón (2004)).

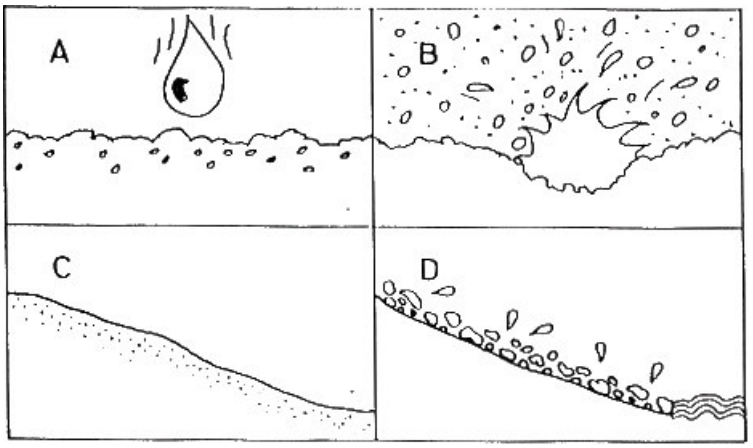


Figura 2.1: Estapas de la erosión hídrica: (A)Impacto de la gota de lluvia por el suelo desnudo.(B) Deseintegración de los agregados en partículas minúsculas. (C) Escurrimiento superficial del agua de lluvia. (D) Cuando la velocidad de escurrimiento es reducida, la carga de partículas de suelo que escurre con el agua son depositados en lugares más bajos (Derpsch et al., 1991).

2.1.1. Los tres actos de la erosión

La *erosión*, que es la acción de roer, de gastar, provoca una pérdida de sustancia del relieve y elabora un vacío , una disminución del volumen.

El *transporte*. La ablación y el desplazamiento de los materiales desgastados presuponen un transporte; es la segunda fase de la erosión. La gravedad de una pendiente seca, el viento, etc., aseguran este desplazamiento.

La *acumulación*. A su vez, el transporte provoca más pronto o más tarde una acumulación. Cuando se verifica en el fondo de las aguas de un lago o de un océano se llama *sedimentación*; esta operación no modifica las formas del relieve terrestre, pero cuando la sedimentación se efectúa al aire libre en un cono de deyección torrencial, en una duna o en unos derrubios, modifica el modelado (Viers et al., 1974) Se considera que estas tres fases-erosión, transporte, acumulación- son correlativas, unidas inseparablemente de tal modo,que la costumbre ha hecho que de se denomine a su conjunto el término erosión, tomando en su sentido más amplio.

Para esta investigación, estudiamos la erosión hídrica considerada como una forma de erosionar el suelo, la cual para su proceso considera los tres actos de la erosión (erosión o intemperismo, transporte y acumulación).

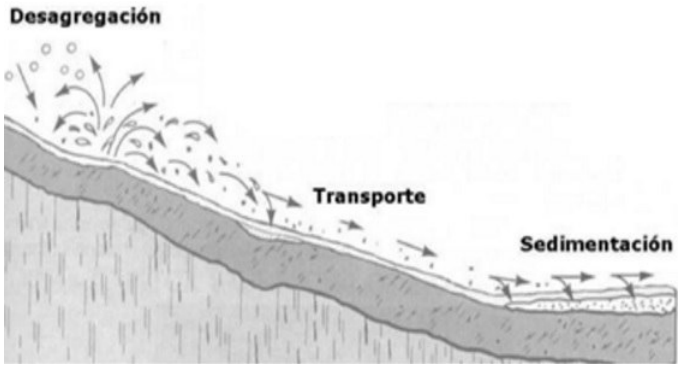


Figura 2.2: PROCESOS DE EROSIÓN: La primera fase es la de erosión o desagregación, la segunda es el transporte de los materiales desgastados y la última fase es la acumulación o sedimentación.

2.1.2. Tipos de Erosión

La erosión del suelo es la remoción del material superficial por la acción del viento o del agua y corresponde a un fenómeno que ha a existido desde la formación de la Tierra por los mismos factores que intervienen en esta formación. La superficie de la Tierra es afectada por procesos exógenos y endógenos, los primeros tienden a nivelar, mientras que los segundos tratan de formar un nuevo relieve. La superficie terrestre que vemos en la actualidad es producto de estos cambios muy lentos que se hacen notables sólo en periodos largos de tiempo.

De acuerdo a las fuerzas que actúan y tiempos de ocurrencia, la erosión hídrica se define en dos tipos:

a) Erosión Natural o Geológica: Es aquella que ocurre como consecuencia solamente de las fuerzas de la Naturaleza y cuyas tasas de ocurrencia son generalmente bajas. Los principales tipos de erosión son : hídrica (pluvial, fluvial, marina, glacial, cárstica), eólica y gravitacional.

b) Erosión Acelerada o Inducida (Antrópica): Es aquella en la que se agrega la acción del hombre a la acción de los agentes naturales. Este tipo de erosión es propiciado por el mal manejo del suelo y en términos

2.1.3. Los agentes de la erosión

Los principales agentes que intervienen en el proceso de la erosión son: el agua y el viento. Cuando el agente causal es el agua, la erosión se denomina **hídrica**, mientras que cuando el agente causal es el viento, se denomina **eólica**. Existen otros agentes causantes de la erosión que en menor escala y extensión causan el movimiento del suelo, tales como la gravedad, la maquinaria, y algunos procesos biológicos. En cualquier caso, la erosión hídrica es la de mayor importancia en el Perú, debido a que en gran parte del país nuestra actividad económica se desarrolla en el sector agrario.

2.1.4. Formas de la erosión hídrica

2.1.4.1. Erosión por salpicadura

El salpicado de suelo se origina cuando las gotas de lluvia caen directamente sobre las partículas de suelo o superficies de agua muy delgadas, salpicando cantidades enormes de suelo debido a la energía cinética de impacto.

En suelos a nivel, la dispersión de suelo es más o menos uniforme en todas las direcciones, pero en un terreno con pendiente habrá un transporte neto hacia abajo. Si durante el proceso ocurre flujo superficial, las partículas removidas son incorporadas al flujo y serán transportadas aguas abajo antes de ser depositadas de nuevo en la superficie. La cantidad de suelo salpicado varía entre 50 y 90 veces más que las pérdidas por socavación o arrastre. Se calcula que en suelo descubierto se salpican al aire 224 Mg/ha debido a las lluvias frecuentes (Muñoz, 2006). Sin embargo, el salpicado normalmente no es transportado fuera de las áreas por el impacto como tal. La relación entre erosión y energía e impulso de la lluvia se determina por la masa de las gotas de lluvia, su tamaño, forma, velocidad y dirección. El impacto de la gota de lluvia también deteriora la estructura del suelo. El arrastre de materiales finos origina el "pavimento"de erosión. que es el resultado de la acumulación de partículas gruesas o fragmentos de roca en la superficie.

2.1.4.2. Erosión laminar

La erosión laminar remueve uniformemente el suelo en estratos delgados, como consecuencia del flujo superficial laminar que escurre en capas delgadas sobre el terreno. Los estudios actuales sobre el mecanismo de la erosión, en los que se han

utilizado técnicas fotométricas de exposición prolongada y de alta velocidad, indican que la forma idealizada de erosión laminar rara vez se verifica.

El impacto de las gotas de lluvia, combinado con el flujo superficial, forma los riachuelos microscópicos iniciales, Desde el punto de vista de la energía, la erosión por las gotas de lluvia es muy importante, pues estas tienen velocidades de flujo superficial son mucho menores (aproximadamente de 0.3 a 0.6 m/s). Las gotas de lluvias provocan el desprendimiento de las partículas de suelo y al aumentar el sedimento, se llenan los poros de la capa superficial, reduciendo así la taza de infiltración. La fuerza abrasiva y la de arrastre de la corriente laminar están en función de la profundidad y la velocidad de escurrimiento para una partícula o agregado de suelo de tamaño, forma y densidad determinados (Rivera-Ruiz et al., 2012). En la Figura 2.3 se muestra la forma en la que actúa la erosión laminar.

2.1.4.3. Erosión en surcos

Cuando el flujo superficial se concentra, el agua actúa sobre el suelo desprendiéndolo originando canales o arroyos pequeños bien definidos, conocidos como surcos o canalillos. Este tipo de canales se vuelven estables y se les ve con facilidad. El desprendimiento y transporte son más severos porque las velocidades de escurrimiento son más altas y el esfuerzo hidráulico cortante aumenta con el grado de la pendiente y el radio hidráulico de la sección del canal.

El flujo concentrado desprende el suelo en el perímetro mojado del surco y transporta el material desprendido junto con el material aportado del área entre surcos, donde normalmente ocurre erosión por salpicado y erosión laminar. Las formaciones de la erosión en surcos son fácilmente eliminados de los terrenos con el paso de las maquinarias. Las cantidad de suelo transportado por la erosión en surcos depende de la relación entre la capacidad de desprendimiento y la capacidad de transporte, así como la carga de sedimentos. Normalmente la capacidad de desprendimiento disminuye con la carga de sedimentos, y viceversa.

2.1.4.4. Erosión en cárcavas

Esta forma de erosión abre canales de mayores dimensiones que los surcos, los cuales conducen agua durante o inmediatamente después de las lluvias y, a diferencia de lo que ocurre en éstos, el paso de maquinaria difícilmente borra los cauces sin dejar depresiones donde existían las cárcavas. Entonces, la erosión que origina cárcavas u hondonadas es una etapa avanzada de la que produce la erosión en surcos, del mismo modo que ésta, es una etapa posterior de la erosión laminar. El grado de erosión depende fundamentalmente de las características del suelo, del alineamiento,

el tamaño, la forma de la zanja y el declive del canal. En la Figura 2.5 se puede apreciar el aspecto de una cárcava.

2.2. Modelos matemáticos para estimar la erosión

Desde la segunda mitad del siglo XX han proliferado gran cantidad de modelos matemáticos que permiten realizar cálculos aproximados para evaluar la pérdida de suelo por erosión a distintas escalas.

Numerosas administraciones públicas han apostado por el desarrollo y aplicación de estos modelos, como es el caso de la Agencia de Protección Ambiental (USEPA) y del Departamento de Agricultura (USDA) de los EEUU. En la Unión Europea También se han creado nuevos modelos como EUROSEM (Morgan et al., 1998), PERSERA (Kirkby et al., 2003). En la actualidad existe un elevado número de modelos de erosión, existiendo diferencias en su complejidad, escala y resolución espacial del análisis, procesos que consideran, representación del medio físico y cantidad y tipo de datos que se requieren para su calibración (Alatorre and Beguería, 2009).

Dependiendo de la forma matemática que adopte la descripción de los procesos físicos representados, podemos clasificar los modelos de erosión en los siguientes tres grupos.

2.2.1. Modelos empíricos

Se basan en el análisis estadísticos de datos obtenidos mediante observación. son generalmente lo más sencillos de aplicar. Adquieren generalmente la forma de una ecuación paramétrica (suma y multiplicación de factores).

La gran mayoría de modelos de erosión de tipo empírico que se utilizan en la actualidad se derivan de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (*Universal Soil Loss Equation*, USLE; Wischmeier et al., 1978). No obstante algunos críticos mencionan que tanto la USLE como la mayoría de sus derivados se limitan a la estimación de la erosión bruta, pero no contemplan los procesos de transporte y sedimentación a lo largo de la ladera, o en depresiones, fondos de valle y canales (Alatorre and Beguería, 2009).

2.2.2. Modelos conceptuales

Representan la erosión partiendo de una serie de almacenamientos entre los que se establecen relaciones matemáticas simplificadas. Son adecuados para describir el comportamiento dinámico del sistema de erosión. Por ello los modelos conceptuales se suelen calificar de *semidistribuidos*.

Los modelos conceptuales tienden a presentar los resultados de forma agregada y proporcionan un escaso nivel de detalle acerca de los procesos internos del sistema, son capaces de describir los procesos fundamentales que gobiernan la erosión.

2.2.3. Modelos de base física

Basados en leyes físicas que controlan las relaciones entre los parámetros y los procesos observados. Se basan en una representación espacial distribuida, ya sea en forma de rejilla regular (grid) o irregular (tesseled irregular network, o TIN), que permite implementar las ecuaciones de conservación de masa y momento mediante diferencias finitas o elementos finitos, respectivamente.

En general, se basan en una representación espacial distribuida. Permiten la predicción de la erosión bajo diferentes escenarios de clima y de usos de suelo, así como estudiar los efectos de transformaciones en los factores externos tales como el cambio climático.

En conclusión la selección de algunos de los modelos va a depender y va a estar limitada por la disponibilidad de datos, de manera que no siempre es posible utilizar el modelo más adecuado en función de sus características (procesos, escala espacial y temporal, resolución, etc.). A modo de regla general puede decirse que los tres grandes tipos de modelos (empíricos, conceptuales y de base física) representan una escala creciente en cuanto a complejidad y requerimiento de datos, por lo que los primeros tipos han sido utilizados con preferencia para estudios de tipo regional. La investigación puramente modelizadora es altamente interesante para el conocimiento de la erosión (Alatorre and Beguería, 2009).

Es recomendable el siguiente planteamiento al momento de elegir el modelo adecuado, "qué es realmente lo que necesitamos" en lugar de limitarnos por el hasta dónde podemos llegar con el modelo.

A continuación el siguiente cuadro que observamos (Cuadro 2.1) "Los modelos de erosión: una revisión" donde aparecen los modelos de predicción de la erosión

del suelo más utilizado, asi como la escala temporal en las que se suelen emplear (Dumas Salazar, 2012).

Cuadro 2.1: Modelos de erosión y transporte de sedimentos

Modelo	*Tipo*	*Escala temporal*	*Base de datos*	*Resultados*	*Referencia (año)*
USLE	Empírico	Anual	Alta	Erosión	Wischmeier y Smith, 1978
HSPF	Conceptual	Continuo	Alta	Escorrentía, sedimentos	Johanson et. al., 1980
CREAMS	Físico	Evento/ continuo	Alta	Erosión, depositación	Knisel,1980
EPIC	Físico	Continuo	Alta	Erosión	William et. al., 1983
MMF	Empírico/ conceptual	Anual	Moderada	Escorrentía, erosión	Morgan et. al., 2001
PERSERA	Físico	Continuo	Alta	Escorrentía, erosión, sedimentos	Kirkby et. al., 2000
WEPP	Físico	Continuo	Alta	Escorrentía, pérdida de suelo	Nearing et. al., 1989
RUSLE	Empírico	Anual	Alta	Erosión	Renard et.al., 1991 y 1994
SWAT	Conceptual	Continuo	Alta	Escorrentía, erosión, sedimentos	Arnold et. al., 1995
EROSIÓN 3D	2D-Físico	Evento	Alta	Escorrentía, erosión, sedimentos	von Werner, 2000
RUSLE 3D	Empírico/ conceptual	Anual	Moderada	Erosión	Mitasova et. al., 1998
EUROSEM	Físico	Evento	Alta	Escorrentía, erosión, sedimentos	Morgan et. al., 1998
WATEM	Conceptual	Anual	Moderada	Erosión	Van Oost et. al., 2000
SEDNET	Conceptual/ Empírico	Anual/ Continuo	Alta	Sedimentos en suspención, rills y gullies	Wilkinson et. al., 2004
STREAM	Conceptual	Evento	Moderada	Ecorrentía y erosión	Cerdan et. al., 2002
SEAGIS	Empírico/ conceptual	Anual	Alta	Erosión, producción de sedimentos	DHI, 2003

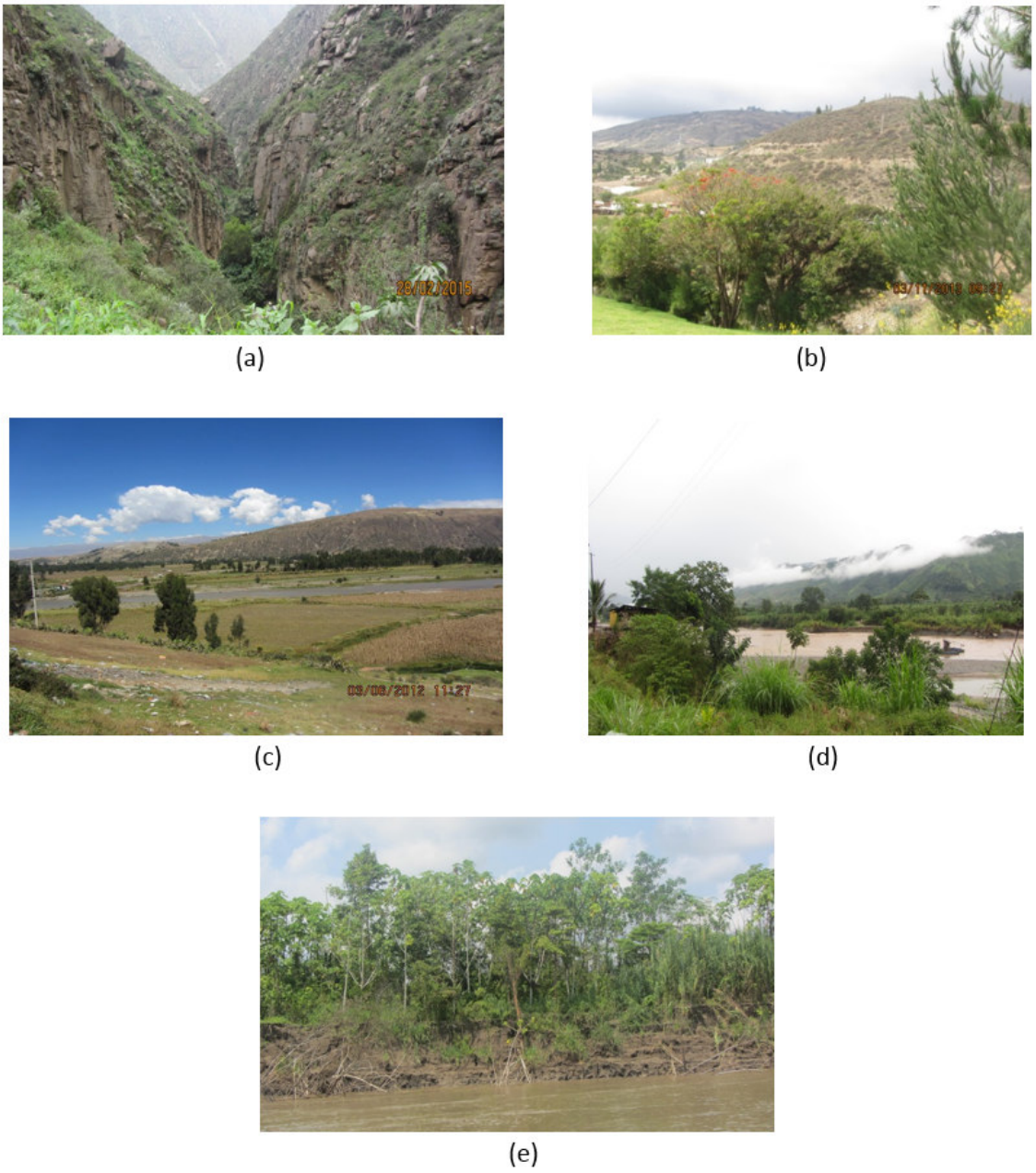
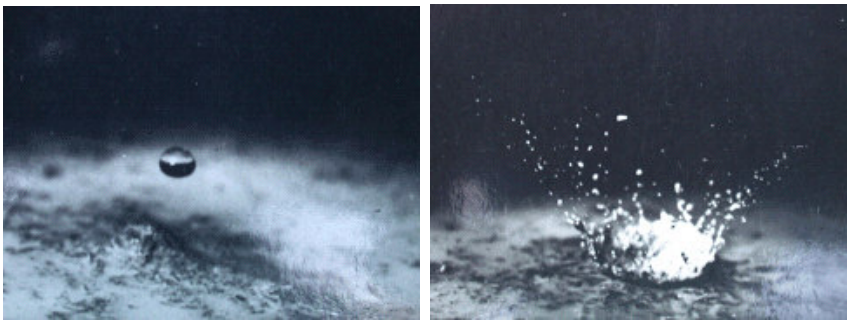


Figura 2.3: Las imágenes muestran la densidad de la vegetación, la topografía y demás características que determinan los factores climáticos relevantes a la ocurrencia de la erosión de diversos lugares del Perú. (a) Huarochirí, provincia de Lima, centro del Perú. (b) Carhuaz, provincia de Áncash, norte del Perú. (c) Junín, provincia de Junín, centro del Perú. (d) Chanchamayo, provincia de Junín. (e) Iquitos, capital de la provincia de Maynas, del departamento de Loreto. .



(a) (b)

Figura 2.4: Una gruesa gota de lluvia (a) sobre la superficie húmeda del suelo originando un cráter en miniatura (b). Los granos de arena y de arcilla son impulsados al aire, removiendose la superficie del suelo. *Fuente: Fotografía oficial de la marina de los Estados Unidos.*

Figura 2.5: Erosión Laminar Superficial. (Muñoz, 2006)

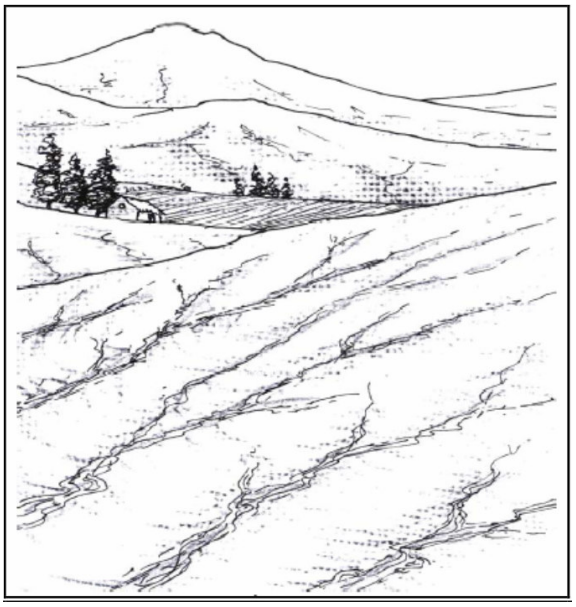


Figura 2.6: Erosión en Canalillos.

Figura 2.7: Aspecto de una cárcava.

Capítulo 3

Metodología

3.1. La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE)

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) (Wischmeier et al., 1978) y su versión revisada, RUSLE (Renard et al., 1997) se definen igual, los cambios radican en los procedimientos para estimar los factores erosivos. Estos modelos estiman pérdidas medias de suelo por erosión no encauzada por unidad de superficie y año para periodos largos de tiempo, otorgando como variable de respuesta un promedio de erosión anual. Aunque la USLE y la RUSLE utilizan los mismos factores para calcular la erosión media anual del suelo, muchas mejoras se han hecho desde el comienzo de la investigación y el desarrollo de la USLE por Wischmeier y Smith desde los años 1950 (Lucas, 2012).

En 1997, la RUSLE fue publicado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). Se hicieron varias modificaciones importantes a la fórmula. El uso de las computadoras ayudaron a la evaluación de la RUSLE y subfactores. Se añadieron 1.200 ubicaciones de calibración en el oeste de los Estados Unidos para ayudar a determinar el factor de lluvia-escorrentía (o llamado también factor erosividad), se realizaron correcciones para tener en cuenta: la erosión por salpicadura de terreno plano y el agua estancada, la variación estacional (congelación y descongelación) en el factor de erodabilidad del suelo, los subfactores que indican el uso del suelo antes de determinar el factor de cubierta vegetal, la longitud de la pendiente y las ecuaciones de la calidad de pendiente con relación directa con interregueros de la erosión (la longitud de la pendiente y las ecuaciones de la calidad de pendiente son para calcular los valores para varias formas y alineaciones de

pendiente), y los valores del factor de la práctica de soporte modificados (Renard et al., 1991).

La RUSLE se actualiza continuamente por el USDA - Servicio de Investigación para la Agricultura (ARS). Las ecuaciones más actuales son más precisas porque las variables pueden ser muy específicas para reflejar las circunstancias exactas.

La RUSLE se expresa en la siguiente ecuación (3.1). La forma del modelo se presenta en sistema métrico internacional (SI):

$$\mathbf{A{=}R \times K \times L.S \times C \times P} \tag{3.1}$$

Donde A (ton ha^{-1}año^{-1}) es la pérdida de suelo, R (MJ mm $ha^{-1}h^{-1}$año^{-1}) factor de erosividad de lluvia, K (ton ha h $ha^{-1}MJ^{-1}mm^{-1}$) factor de erodabilidad del suelo, el factor LS es el factor topográfico que a la vez es producto de los subfactores longitud (L) y pendiente (S) (L es el factor de longitud de terreno (adimensional) y S es el factor de pendiente del terreno (adimensional)) y P es el factor de prácticas de conservación (adimensional).

3.1.1. Factor erosividad de la lluvia

El factor erosividad de la lluvia es un índice numérico que expresa la capacidad de la lluvia para erosionar el suelo (Wischmeier et al., 1978), representa la energía con que las gotas de lluvia impactan en el suelo a determinada intensidad rompiendo los agregados superficiales en partículas de tamaño transportable (Dumas Salazar, 2012). Se trata de un factor activo en el proceso de erosión.

Se han diseñado numeroso índices que se han utilizado en modelos de predicción de riesgo de erosión, siendo el más conocido el factor R (Wischmeier, 1959) En la forma original de RUSLE el factor R se calcula como la suma promedio anual de la erosividad de las tormentas individuales, que se calcula como el producto de la energía total de la tormenta y la intensidad máxima en 30 minutos (Lal, 1996).

$$R = \frac{EI_{30}}{173{,}6} \tag{3.2}$$

La ecuación (3.2) nos dice que R es la energía cinética liberada por la lluvia (E) y la máxima intensidad de precipitación durante un intervalo de 30 minutos (I_{30}) de la tormenta. Para el cálculo del índice de Erosividad de la lluvia propuesto por Wischmeier es necesario contar con mucha información pluviométrica muy específica

y muy difícil de obtener, por lo que numerosos autores han señalado la gran dificultad que existe para poder aplicar en algunos territorios este índice donde la red de pluviógrafos existente es escasa y está irregularmente distribuida, como ocurren en Perú. En la Figura 4 (ver Apendice B) se muestra la distribución espacial en todo el Perú de las estaciones de lluvia y temperatura que monitorea el SENAMHI, se observa claramente que la distribución espacial es muy irregular en todo el país, esto es debido a la dificultad e inaccesibilidad de algunas zonas de nuestro territorio, por ejemplo en nuestra Amazonía contamos con aproximadamente el 10 % de las 155 estaciones de lluvia que hay a nivel nacional, considerando que la Amazonía peruana ocupa el 60 % de todo el territorio.

Para poder resolver este problema, se cuenta con algunos índices adicionales que permiten calcular de forma más sencilla el índice de erosividad de la lluvia como la siguiente relación (ecuación 3.3) desarrollada por Wischmeier y Smith (1978) que además a sido aplicada en diversos estudios, fue la que se utilizó para esta investigación (Pan and Wen, 2014):

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1{,}735 \times 10^{(1{,}5log_{10}(P_i^2/p)-0{,}08188)} \tag{3.3}$$

Donde:

- R el factor erosividad de lluvias (MJ mm ha^{-1} h^{-1} $año^{-1}$)
- P_i precipitación mensual que está en mm.
- p la precipitación anual en mm.

3.1.2. Factor erodabilidad del suelo

El factor de erodabilidad del suelo es llamado también “factor K”, representa la erosinabilidad del suelo; es decir, muestra su vulnerabilidad a la acción del agua; es una característica inherente a los suelos, que es función de la acción individual y/o combinada de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, así como también del manejo que de ellos se haga.El método más complejo para estimar el factor K es el Nomograma de Wischmeier y Smith (1978) (ver la Figura 3.1), el cual requiere datos de porcentaje de limo, porcentaje de arena muy fina, porcentaje de arena, porcentaje de materia orgánica, estructura y permeabilidad. En el caso de contar con información tan detallada se puede usar valores tabulados por Kirkby et al. (1980).

El método más completo para estimar el factor K es el nomograma de Wischmeier y Smith (1978), el cual requiere datos muy pormenorizados. Al existir diferentes métodos para calcular el factor K y teniendo en cuenta y teniendo en cuenta que en algunos de estos se requiere mayor información y de forma más detallada, se ha empleado el método de Kirkby y Morgan (1980).

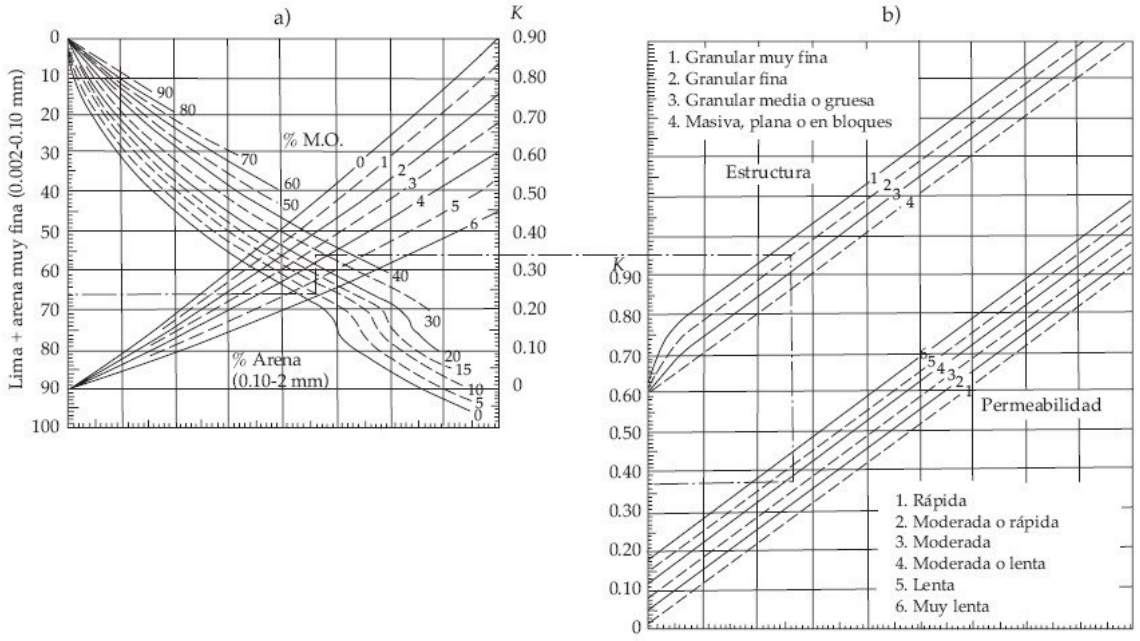


Figura 3.1: Nomograma de Wischmeiere y Smith para el cálculo del factor K.

3.1.3. Factor topográfico

El efecto de la topografía sobre la erosión está representado por los factores longitud (L) y grado de pendiente (S). La Longitud L se define como la distancia desde el punto de origen en un escurrimiento hasta el punto donde decrece la pendiente al grado de que ocurre el depósito, o bien, hasta el punto donde el escurrimiento encuentra un canal de salida bien definido.

$$LS = 1{,}07(\frac{\lambda}{20})^{0,28}(\frac{\alpha}{10})^{1,45} \tag{3.4}$$

3.1.4. Factor cobertura del suelo

La cobertura de la Tierra se refiere a la síntesis de diversos tipos de materiales, así como sus atributos naturales y las características de la superficie de la tierra. Su distribución espacial refleja el proceso de las actividades socio-económicas de los seres humanos, y determina el equilibrio hidrotermal y la masa en la superficie, lo

que cambia directamente el ciclo de la biogeoquímica, tierra-atmósfera de humedad, la energía y el ciclo del carbono, e incluso el cambio climático.

El factor C de RUSLE representa la efectividad de las plantas como cubierta protectora del suelo frente a la energía de impacto de las gotas de lluvia y a la fuerza de flujo superficial. Su valor expresa la relación que existe entre las pérdidas de suelo medias anuales de un lugar determinado con una determinada vegetación. Este factor es constante para cultivos permanentes y variable para cultivos anuales (Wischmeier y Smith, 1878)

La cubierta vegetal es el elemento natural de protección del suelo frente a la fuerza erosiva de las precipitaciones, controlando no sólo la energía con la que llegan las gotas de lluvia a la superficie del suelo, sino la velocidad de la escorrentía superficial.

El factor C de RUSLE recoge la influencia debida no sólo al tipo de vegetación existente, si no al manejo o disposición de los residuos que produce sobre el suelo.

En la imagen podemos ver que la cobertura vegetal tiene la función de proteger el suelo frente a la energía con la llegan las gotas de lluvia.

(a) (b)

Figura 3.2: Fenómeno de intercepto de las gotas de lluvia

3.1.5. Factor prácticas de conservación

El factor P es la relación de pérdida de suelo entre una parcela donde se han aplicado prácticas mecánicas de conservación de suelos (contornos, terrazas, cultivos en fajas, etc.) para el control de la erosión, y las pérdidas que se producen en una parcela si tales prácticas no se utilizan y el laboreo se efectúa en el sentido de la pendiente.

3.2. Evolución y críticas al modelo

La USLE ha sufrido modificaciones que han dado lugar a modelos matemáticos diferentes como:

- RUSLE *"Revised Universal Soil Loss Equation"* que modifica la forma de estimar los distintos factores.
- MUSLE *"Modified Universal Soil Loss Equation"*
- RUSLE - 3D
- SLEMSA *"Soil Loss Estimation Model for Sourthern Africa"*

La evolución de la USLE y sus modificaciones se encuentra muy bien recogida en "Pioneering Soil Erosion Prediction: The USLE Story", así como en "A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation" (Renard et al., 1997).

La USLE a pesar de tratarse de uno de los métodos que más se utiliza en la actualidad como herramiento para planificar la conservación de los suelos se ha enfrentado a numerosas críticas.

En primer lugar aunque parece que es un método muy sencillo, la obtención de los datos fiables que alimenten el modelo no lo es. La mayoría de las críticas argumentan que no es una ecuación universal sino que ha sido preparada para ser utilizada en las condiciones de los Estados Unidos. Además este modelo en un principio se generó para medir la erosión en zonas bastante restringidas (una parcela) por lo que cuando se pretende aplicar el mismo modelo a un territorio más amplio pueden surgir grandes dificultades y resultados algo desvirtuados. Es por eso que se han ido realizando actualizaciones a las ecuaciones de cada subfactor, para poder contrarrestar las limitaciones.

Capítulo 4

Zona de Estudio

Este capítulo se centra en la descripción general del territorio peruano considerando, por un lado la ubicación geográfica, los aspectos físicos más importantes como: el clima, la vegetación, la geología y la fisiografía. La situación del sector agrario en nuestro país es muy importante para poder entender la importancia del estudio de este fenómeno, que nos ayudará a contrarrestar posibles daños que podamos tener frente a la degradación de los suelos por el aceleramiento del proceso erosivo.

La erosión hídrica es un proceso de pérdida de suelo que afecta a toda la sierra peruana, debido a sus condiciones semiáridas, así como altas pendientes del terreno, uso de prácticas agrícolas inadecuadas, creciente presión demográfica por el uso del suelo, escasa cubierta vegetal debido a la deforestación, sobre pastoreo y presencia esporádicas lluvias pero de alta intensidad (Tapia Muñóz, 2011)

4.1. Descripción general del Perú

4.2. Aspectos de Localización

4.2.1. Ubicación Política

El Perú se encuentra en la zona intertropical de Sudamérica comprendida entre la línea del Ecuador y el trópico de Capricornio. Limita al norte con Ecuador y Colombia, al este con Brasil, al sureste con Bolivia, al sur con Chile y al oeste con el océano Pacífico (ver Figura 4.1).

La República del Perú tiene como una de sus principales ciudades: Lima, Arequipa, Trujillo, Chiclayo, Callao, Piura y Cuzco; se rige por la constitución

Política de 1993, la cual establece que el Perú es una República, unitaria y descentralizada, dividida en 24 Departamentos, 25 Regiones Políticas incluido la Provincia Constitucional del Callao.

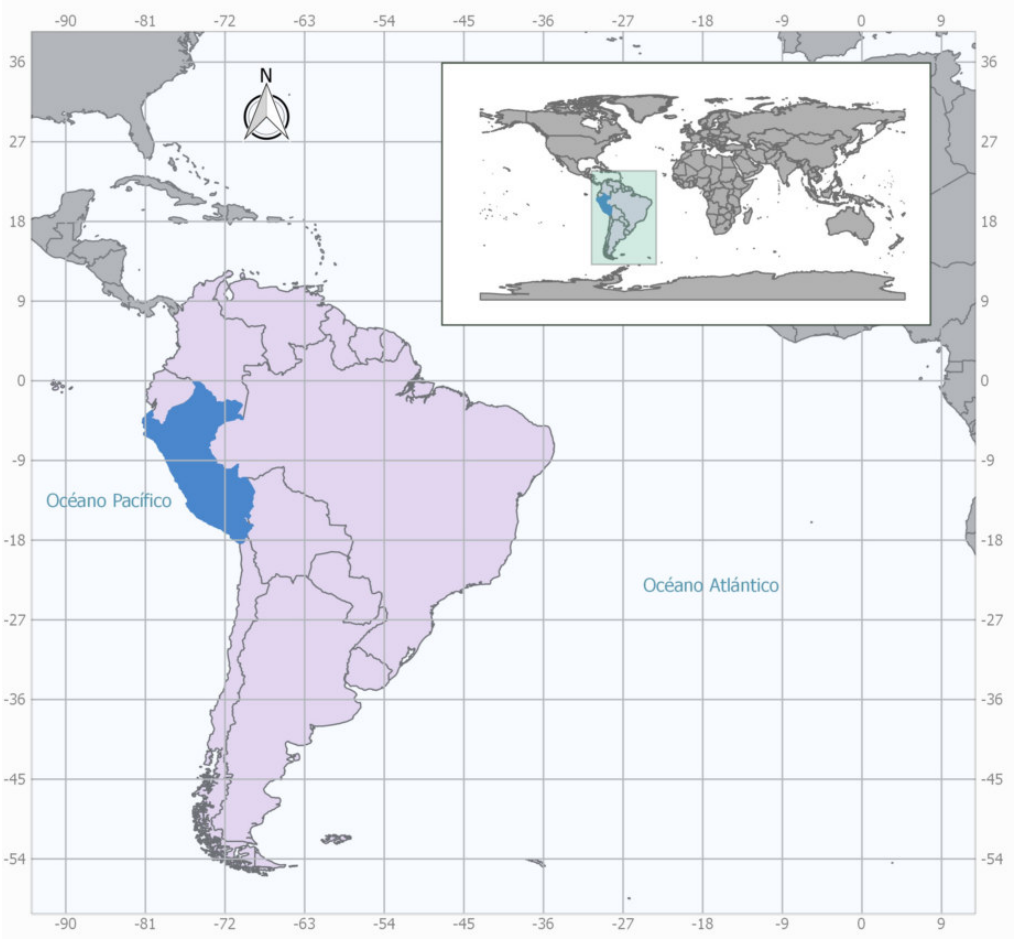


Figura 4.1: Ubicación del Perú

4.2.2. Ubicación Geográfica

El Perú es un país Sudamericano, Litoral, Andino, Altiplánico, Amazónico y Antártico. se encuentra ubicado en la parte central y occidental de América del Sur, extendiéndose al continente Antártico por factores geográficos, ecológicos y por antecedentes históricos. Además, conforman su territorio las 200 millas del mar territorial en el Océano Pacífico y la respectiva plataforma continental.
La superficie continental sudamericano peruano se extiende entre los meridianos 68° 39'27"(Boca del Río Heath o Abuyama en el departamento de Madre de Dios) y 81° 19'34.5"longitud oeste (Punta de Balcón, en el departamento de Piura); y entre los paralelos 0° 01'48"(Thalweg en el río Putumayo, departamento de Loreto) y 18°

21'03"(Pascana del Hueso, en el departamento de Tacna).
El territorio Antártico peruano está comprendido entre los meridianos 84° y 90° Longitud Oeste y hasta el Polo Sur, a los 90° Latitud Sur (Desde el 10 de abril en 1981; en virtud al Tratado Antártico, firmado en Washington, Estados Unidos de América).

4.2.3. Superficie

El Perú tiene una superficie continental de 1'285 215.6 Km^2., incluyendo el territorio de las Islas del Mar Pacífico Peruano y la parte peruana del Lago Titicaca y sus islas. Además, tiene soberanía y jurisdicción sobre una franja de 200 millas (370 Km^2 del Mar Pacífico Peruano). Del Océano Pacífico, adyacente a su litoral marino, que alcanza una longitud de 3 079.5 km. de largo, debido a las entrantes y salientes de la costa.

4.2.4. Límites

Limita al Norte:

* Con el Océano Pacífico (Mar de Ecuador), en una extensión de 200 millas marinas (371 Km. aprox.)
* Con la República de Ecuador, una extensión de 1 529 Km.
* Con la República de Colombia, en 1 506 km.

Por el Este:

* Con República de Brasil, en 2 823 Km.
* Con la República de Bolivia, en 1 047 Km.

Por el Sur:

* Con Chile, en 169 Km.
* Con el Océano Pacífico (Mar de Chile), en una extensión de 371 Km. incluyendo las 200 millas del mar territorial.

4.3. Descripción del Territorio

El Territorio del Perú comprende: el suelo, subsuelo, el dominio marítimo (mar adyacentes a sus costas, así como su lecho y subsuelo hasta la distancia de 200 millas) y el espacio aéreo que los rodea. Presenta un relieve extremadamente accidentado,

originado fundamentalmente por la existencia del sistema montañoso denominado Cordillera de los Andes, que recorre el pasís longitudinalmente de Sur a Norte y da lugar a la formación de tres unidades o regiones geográficas que reciben los nombres de Costa (Chala), Sierra (Andina) y Selva (Amazonía).

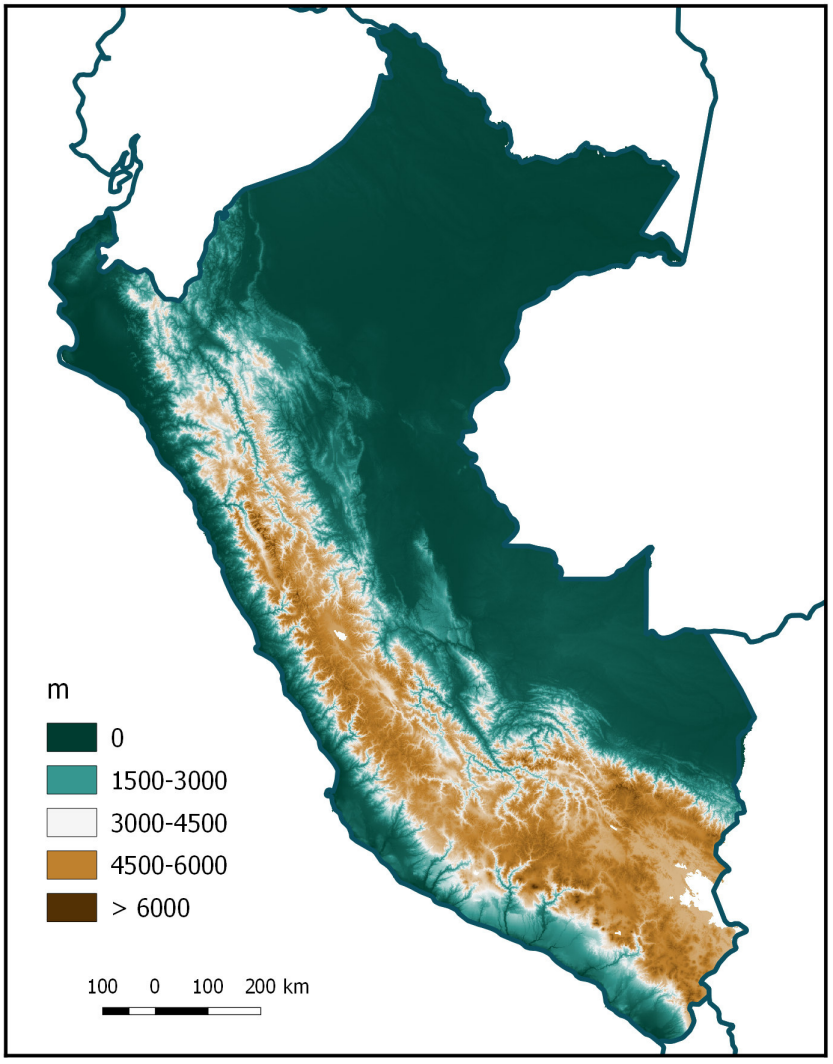


Figura 4.2: Modelo Digital de Elevación (DEM) del Perú

4.3.1. La Región Geográfica de la Costa

La región Costa es una estrecha franja longitudinal que se extiende desde el Océano Pacífico hasta los 500 msnm al encuentro con los contrafuertes occidentales de la Cordillera de los Andes. Ocupa una extensión que representa el 10.7 % de la superficie total del país, con un litoral de 3 080 Km. de longitud, es estrecho en el Sur y se va ampliando mucho en el departamento de Piura, cerca a los límites con

el Ecuador, con un ancho variable entre el 50 y 100 km. Su relieve es moderado, destacando las terrazas marinas, los abanicos fluviales, las dunas y los depósitos de arenas eólicas, alternadas con pequeños cerros que constituye la parte baja de los contrafuertes occidentales de la Cordillera de los Andes.
La Costa está constituida por una variedad de paisajes como son: los valles que en número de 53 la recorren en forma transversal de Este a Oeste; los desiertos interfluviales, ubicados entre los valles, comprenden subpaisajes tales como, planicies o pampas, cerros quebradas secas; el bosque seco del desierto costero del Norte, que se extiende desde la frontera con el Ecuador hasta el Sur del departamento de Lambayeque; el ecosistema de los manglares, pequeño pero único en su género en el Perú, ubicado en el extremo norte del departamento de Tumbes; y el ecosistema de "lomas", dispuesto en las estribaciones andinas, más cercanas al Océano Pacífico.
El litoral peruano es casi recto. Son pocos los accidentes de importancia, entre los que se pueden citar las penínsulas de Paracas en la Región de los Libertadores - Wari (Ica), Ferrol en la Región Chavin (Áncash) e Illescas en la Región de Grau (Piura), y las Bahías de la Independencia en la Región Los Libertadores-Wari (Ica), Samanco y Chimbote en la Región Chavín (Áncash), y la Sechura y Paita en la Región Grau (Piura). Existen también algunas pequeñas puntas como la de Coles en la Región Jos, Carlos Mariategui (Moquegua), Islay y Ático en la Región Arequipa, La Punta en la Provincia Constitucional del Callao, Lachay en el departamento de Lima y Malabrigo en la Región La Libertad, entre otras.
Frente al litoral se encuentran numerosas islas de diferentes tamaños e importancia, entre ellas tenemos las siguientes: Lobos de Tierra, Lobos de Afuera, La Viuda, Mazorca, San Lorenzo, Chincha, Las Ballestas etc., también en el litoral se encuentran los puertos y caletas, para el intercambio comercial marítimo tanto con el interior del país como con el resto del mundo.
Entre los puertos principales destacan Talara y Paita en la Región Grau (Piura); Pimentel y Eten en la Región Nor Oriental del Marañón (Lambayeque), Salaverry y Pacasmayo en la Región Libertad; Chimbote y Samanco en la Región Chavin (Áncash), Pisco y San Juan en la Región Los Libertadores-Wari (Ica); Ático, Mollendo y Matarani en la Región Arequipa e Ilo en la Región Jos, Carlos Mariátegui (Moquegua); Chancay y Huacho en el departamento de Lima, y el Callao en la Provincia Constitucional del mismo nombre.

La carencia de agua es un factor limitante para el intensivo aprovechamiento agrícola de los suelos de la costa, estimándose que sólo el 10 % de su superficie es cultivable. En ésta se producen importantes especies entre las que destacan el

algodón, azúcar y arroz, que además de satisfacer el mercado interno fortalece el comercio con el exterior. Los suelos sin riesgo tienen también gran valor económico. En el Norte, por ejemplo, se encuentran instaladas las industrias extractoras de petróleo y las industrias de transformación del pescado y del acero. en la Costa, también se localizan los núcleos más poblados del país, siendo Lima Metropolitana el más grande, con más de 6 millones de habitantes.

4.3.2. La Región Geográfica Andina

La región Andina o Sierra está conformada por la Cordillera de los Andes, la cual constituye un escarpado sistema montañoso que corre de sur a Norte, atravesando longitudinalmente el país y ocupando una posición central entre la costa y la selva. En conjunto, el paisaje andino es importante y reviste una configuración heterogénea con cumbres prominentes, profundas gargantas, valles estrechos interandinos y amplias mesetas. Cubre una superficie estimada de 408 209.55 Km^2 que representa el 31.8 % del territorio nacional. Se le considera conformada por tres cadenas montañosas denominadas cordilleras: occidental, central y oriental. La primera de las cuales es la más importante, ya que sus cumbres forman la divisoria continental de las aguas que separan las vertientes del Pacífico y del Atlántico. La población se encuentra en su mayor parte entre los 2 000 y 3 500 msnm por ser ésta zona más propicia para el desarrollo de las actividades agroeconómicas.

4.3.3. La Región Geográfica Amazónica

La Región Amazónica o Selva abarca alrededor de 57.6 % del territorio nacional. Su topografía es predominantemente plana. Está situada al Este de los Andes y forma parte de la Hoya Amazónica.
en forma general, se distingue dos zonas: la Selva Alta o Ceja de Montaña y el Llano Amazónico o Selva Baja, separadas por una cota situada a 400 msnm. La Selva Alta conocida como Ceja de Selva comprende las reas boscosas de la vertiente oriental de los Andes. Su topografía es bastante accidentada y está situada sobre los últimos contrafuertes orientales andinos. Se caracteriza por la presencia de cerros escarpados y boscosos, y quebradas profundas.
La Selva Baja o Llano Amazónico tiene escaso relieve y está cubierto de exuberante vegetación tropical y sujeto a inundaciones periódicas, a excepción de las tierras altas, colinas y cerros bajos. Hidrográficamente, existen grandes sistemas fluviales que forman parte de la gran cuenca del Río Amazonas.
Al Oeste y en forma paralela a la Costa se desarrolla una cuarta región natural

denominada MAR TERRITORIAL, Mar de Grau que corresponde al mar adyacente así como su lecho y subsuelo hasta una distancia de 200 millas marinas medidas en forma perpendicular a sus líneas de base; tiene una extensión superficial de 1'042'676 Km^2. Su importancia económica, generada por la presencia de la corriente fría marina del Perú, rica en plancton atrae a la más abundante y variada fauna ictiológica que la sitúa como una de las regiones claves de nuestra economía y sobre el cual el Estado ejerce soberanía y jurisdicción.

4.4. Aspectos Físicos

4.4.1. Clima

El Perú, por su ubicación geográfica debería ser un país tropical, de clima cálido y lluvioso; sin embargo, es un país de variados climas subtropicales y tropicales debido a la existencia de dos factores determinantes que modifican completamente sus condiciones ecológicas. Estos son: la Cordillera de los Andes y las corrientes marinas de Humboldt y del Niño. De acuerdo a estos factores determinantes, el Perú posee casi todas las variantes climatológicas que se presentan en el mundo.
El clima de la Costa es templado y húmeda gracias a la fría corriente marina peruana. En la Sierra, el clima varía desde el templado hasta el frío glacial; en las planicies selváticas transandinas es cálido y húmedo, con abundantes lluvias.
En términos generales, existen dos tipos de clima en la región Costa: entre las localidades de Lambayeque y Tacna, el subtropical, con temperatura media que fluctúa entre 18° y 21°C y la excesiva humedad atmosférica que alcanza a 90 y 98 %, entre Tumbes y Piura es semitropical, de elvada temperatura con una media anual de 24°C, lluvias periódicas de verano y abundante humedad.
El clima de la Sierra es variado; las temperaturas medias varían entre 6° y 16°C. Las cumbres nevadas sobre los 4 500 msnm presentan un clima glacial y el altiplano soporta un clima frígido; las vertientes bajas tienen temperaturas moderadas y los valles profundos son cálidos.
Las precipitaciones pluviales, encima de los 3,800 msnm son en forma de nieve y granizo; por debajo de esta altitud hasta los 2,500 msnm es abundante, particularmente durante el verano (diciembre a abril).

El clima de la Amazonía es cálido y húmedo. Las precipitaciones pluviales son abundantes durante todo el año, pero son más acentuados los primeros cuatro meses, periodo que influye con la creciente de los ríos. La zona más lluviosa es

la denominada Selva Baja. Las temperaturas medias anuales fluctúan entre los 16° y 35°C; registrándose las más bajas en la Selva Alta y las más altas en el Llano Amazónico.

4.4.1.1. Tipos de Clima

En el Perú destacan principalmente los siguientes tipos climáticos:

a) CLIMA SEMI-CÁLIDO MUY SECO (Desértico-Árido-Sub Tropical)

Este tipo de clima constituye uno de los eventos climáticos más notables del Perú, comprende casi toda la región de la costa, comprende Piura hasta Tacan y desde el litoral del Pacífico hasta el nivel aproximado de 2000 m. representa casi el 14 % (180 000 Km^2) de la superficie total del país.

Se distingue por ser un clima con precipitación promedio anual de 150 mm. y temperatura media anuales de 18° a 19°C, decreciendo en los niveles más elevados de la región.

b) CLIMA CÁLIDO MUY SECO (Desértico o Árido Tropical)

Comprende el sector septentrional de la región costera, que incluye gran parte de los departamentos de Tumbes Piura, entre el litoral marino y la costa aproximada de 1 000 msnm. Representa menos del 3 % (35 000 Km^2) de la superficie territorial del país.

Se caracterizan por ser muy seco, con más precipitación media anual (alrededor de 200 mm.) y cálido, con una temperatura promedio anual de 24°C, sin cambio térmico invernal definido.

c) CLIMA TEMPLADO SUB-HÚMEDAD (De Estepa y Valles Interandinos Bajos)

Este clima es propio de la región de la sierra correspondiendo a los valles interandinos bajos e intermedios, situados entre los 1 000 y 3 000 msnm.

Las temperaturas sobrepasan los 20°C y la precipitación anual se encuentra por debajo de los 500 mm. aunque en las partes mas elevadas húmedas y orientales, puede alcanzar y sobrepasar los 1 200 mm.

d) CLIMA FRÍO o BOREAL (De los Valles Mesoandinos)

Este tipo climático, predomina en segundo lugar. En la región de la sierra, extendiéndose entre los 3 000 y 4 000 msnm. Se caracteriza por sus precipitaciones anuales promedios de 700 mm. y sus temperaturas medias anuales de 12°C. Presenta veranos lluviosos e inviernos secos con fuertes heladas.

e) CLIMA FRÍGIDO (De Tundra)

Este tipo de clima, conocido como clima de Puna, corresponden a los sectores altitudinales de la región andina comprendido entre los 4 000 y 5 000 msnm. Cubre

alrededor de 13 % territorio peruano (170 000 Km^2). Se caracteriza por presentar precipitaciones promedio de 700 mm. anuales y temperatura también promedio anuales de 6°C. Comprende las colinas, mesetas y cumbres andinas. Los veranos son siempre lluviosos y nublosos; y los inviernos (Junio-Agosto), son rigurosos y secos.

f) CLIMA DE NIEVE (Gélido)

Este clima corresponde al de nieve perpetua de muy alta montaña, con temperaturas medias durante todos los meses del año por debajo del punto de congelación (0°C). Se distribuyen en los sectores altitudinales que sobrepasan los 5 000 msnm y que están representados mayormente por las grandes masas de nieve y hielo de las altas cumbres de los andes peruanos.

g) CLIMA SEMI-CÁLIDO MUY HÚMEDO (Sub-Tropical muy Húmedo)

Este tipo de clima predomina en la selva alta o contra fuertes orientales andinos boscosos.

Se caracteriza por ser muy húmedos, con precipitaciones por encima de los 2 000 mm. y con bolsones pluviales que sobrepasan los 5 000 mm. como en la zona de Quincemil.

h) CLIMA CÁLIDO HÚMEDO (Tropical Húmedo)

Este clima corresponde a las llanuras amazónicas peruanas y se caracterizan por presentar precipitaciones promedios anuales de 2 000 mm. y temperaturas de 25°C a más, sin cambio térmico invernal bien definido.

El área se encuentra bajo influencia de este tipo climático y comprende alrededor de 43 % (550 000 Km^2) de la superficie territorial del pais.

4.5. Heterogeneidad Geográfica

La heterogeneidad geográfica del Perú se expresa en cinco grandes espacios: el mar, la costa, con sus grandes desiertos y valles, el ande, con su topografía accidentada, la llanura amazónica de bosques tropicales y la Antártida con su llanura glacial.

Cada uno de estos espacios tiene subdivisiones: el mar frío y el mar tropical; la zona costera, el margen continental, la fosa oceánica; la costa desértica, los oasis fluviales y las lomas; las vertientes occidentales, los andes, la puna, la jalca, los glaciares y las vertientes orientales, la selva alta y la selva baja, y la Antártida.

Estos grandes espacios o regiones biogeográficas han sido clasificados por diferentes autores de la siguiente manera:

* 8 regiones naturales: Chala o Costa, Yunga, Quechua, Suni o Jalca, Puna, Janca o Cordillera, Rupa-rupa o Selva Alta y Omagua o Selva Baja. Esta clasificación fue hecha sobre la base de los pisos altitudinales, la flora y fauna que el Perú alberga y fue propuesta por el geógrafo, filósofo e historiador peruano *Javier Pulgar Vidal*, 1941.

* 4 Dominios y 7 Provincias Zoogeográficas; Dominio Amazónico con 4 provincias (Amazónica, Pacífica, Yungas y Páramo); Dominio andino Patagónico con 3 provincias (Altoandinas, Puneña y Desierto); Dominio Costero; Dominio Oceánico peruano-chileno (Cabrera y Willink, 1973).

* 5 Dominios Geográficos y 9 Ecozooregiones: Dominio Amazónico con 5 ecozooregiones (Amazónica o Selva Baja, Yungas o Selva Alta, Pacífica o Bosque Tropical del Pacífico, Ecuatorial y Páramo); Dominio Chaqueño con una ecoregión (Sabana de Palmeras); Dominio Andino Patagónico con tres ecorregiones (Puneña, Desierto o Desierto Costero del Pacífico y Serranía Esteparia); Dominio Oceánico Peruano chileno o Mar frío de la Corriente Peruana y Dominio Oceánico Tropical (A. Brack 1976).

* 16 unidades resultantes de la conjunción de 8 provinciaas biogeográficas y 3 regiones longitudinales (CDC-UNALM, 1976)

* 84 Zonas de Vida, de las 104 que hay en el mundo, y 17 de carácter transicional distribuidas en tres franjas latitudinales: tropical, subtropical y templada cálida (ONERN-1976 según sistema de Holdridge).

* 28 Tipos de Clima de los 32 existentes en el planeta, con una alta variabilidad local entre los mismos, clasificación obtenida según el sistema de Thornthawaite, 1948 (SENAMHI-1977).

* 7 Regiones Geográficas de acuerdo al sistema de clasificación natural de los suelos propuestos por la FAO: Desierto Costero o Yermosólica; Flanco Occidental de los Andes o Litosólica, Altoandina o Paramosólica, Valles Interandinos o Kastanosólica y Selva Baja o Acrisólica Ondulada (ONERN-1972).

Capítulo 5

Construcción de la base de datos

En este capítulo se dará información sobre el desarrollo de la base de datos utilizados para el desarrollo de la investigación y necesarios para desarrollar el modelo. Es importante tomar en cuenta que lo aplicamos a un modelo empírico, que podría ser validado, si trabajáramos en áreas más específicas, más pequeñas; sin embargo, esto no ha sido una limitante para desarrollar esta tesis, debido a que la base de datos utilizada es libre y se encuentra en la web. Mi objetivo es lograr que este trabajo sea un antecedente para poder seguir desarrollando posteriores investigaciones sobre este fenómeno erosivo, de mucha importancia en nuestro país.

5.1. Base de datos

Para el estudio fue necesario contar con los siguientes datos: a) precipitación media mensual para todo el periodo de estudio (1981-2014), para esto se utilizó el producto PISCO precm, llamado así por sus siglas en inglés (Peruvian Interpolation data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations. Precipitación mensual v1.0) desde enero de 1981 hasta diciembre 2014, con una resolución de $\tilde{5}$ Km a paso tiempo mensual en formato raster GeoTIFF, descargables en la página web del SENAMHI (http://www.senamhi.gob.pe/serviciosclimaticos/sequia/). b) Un Modelo Digital de Elevación (MDE) elaborado a partir del sistema interferométrico Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 4.1 el cual se descargan del CGIAR-CSI (http://srtm.csi.cgiar.org/) en mosaicos provistos de 5° x 5° (ver Fig. 4.2.), los cuales fueron procesados en un sola imagen en un formato raster GeoTIFF. c) La información de tipos de cobertura vegetal fue obtenida del proyecto Global Land Cover de 30 metros de resolución (GlobeLand30) obtenidos del http://glc30.tianditu.com (ver Fig. 4.3.) a partir de mosaicos provistos de 5° x 6°, esta información es de libre acceso gracias a que

la República de China donó a las Naciones Unidas el producto GlobelLand30. d) Para obtener información sobre la taxonomía y las clases texturales del suelo se utilizó la información provista por el SoilGrids 1km, el cual consiste en una colección de mapas sobre propiedades y clase de suelos actualizable del mundo con una resolución de 1̃ km, los datos WorlSoil 1km pueden obtenerse en el siguiente enlace http://soilgrids.org obteniendo así mapas en formato raster GeoTIFF a partir de mosaicos provistos de 10°x 10°, los productos descargados fueron las unidades de suelo de acuerdo a la clasificación de la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (World References Base for Soil Resources - WRB) y para obtener la clasificación de las clases texturales se descargaron raster GeoTIFFF de porcentajes de arcilla, limo y arena (ISRIC, 2010) para el ámbito de estudio.

5.1.1. Producto PISCO precm

El SENAMHI a través de la Dirección General de Hidrología y Recursos Hídricos ha comenzado a producir el producto PISCO precm. Presentando una serie de datos hidroclimáticos a una buena escala espacial (0.05) y teniendo como objetivo escalas temporales diarias y mensuales de las variables precipitación, temperaturas máximas y mínima, evapotranspiración y caudales.

El producto PISCO de precipitación tiene un área de influencia nacional y consiste de datos mensuales desde enero de 1981 hasta diciembre del 2014.

Para la generación de PISCO precm se utilizaron datos que consistió en:

- Una base de precipitación de todo el Perú y
- Datos satélites del producto CHIRPS a escala mensual.

Los datos observados fueron obtenidos por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). Estos datos fueron sometidos a un proceso de control de calidad visual enfocada en reportar valores atípicos y quiebres temporales de precipitación. Como la aplicación requería la máxima cantidad de datos observados, se trató de colectar la mayor información observada; es decir, si se encontraban series con posibles errores en un intervalo temporal este periodo fue eliminado quedándose con el intervalo más semejante a la de las estaciones temporales de precipitación. Finalmente se obtuvieron datos para el periodo 1981-2015 con un número de estaciones variables desde 180 hasta 448, cuya condición era que tengan al menos 10 años de registro (un año con al menos 9 meses de datos, ver Fig. 4.1).

Los datos CHIRPS provenientes Climate Hazards Group (CHG) de la University of California, Santa Barbara (UCSB), corresponden a un producto grillado mensual

con una resolución espacial de 0.05°, disponibles online con un registro desde 1981 hasta la actualidad. Las observaciones del GHC provienen de una variedad de fuentes, tales como: La Red Global Histórica Climática mensual (GHCN) versión 2 (Peterson & Vose, 1997), archivos diarios del GHCN (Durre et al., 2010), la información de la Base de datos del Resumen Global del Día (GSOD) del Centro de Datos Climáticos Nacional de la NOAA, archivos de datos diarios del Sistema Global de Telecomunicación de la Organización Meteorológica Mundial (GTS), provenientes de la NOAA, CPC y los servicios meteorológicos nacionales.

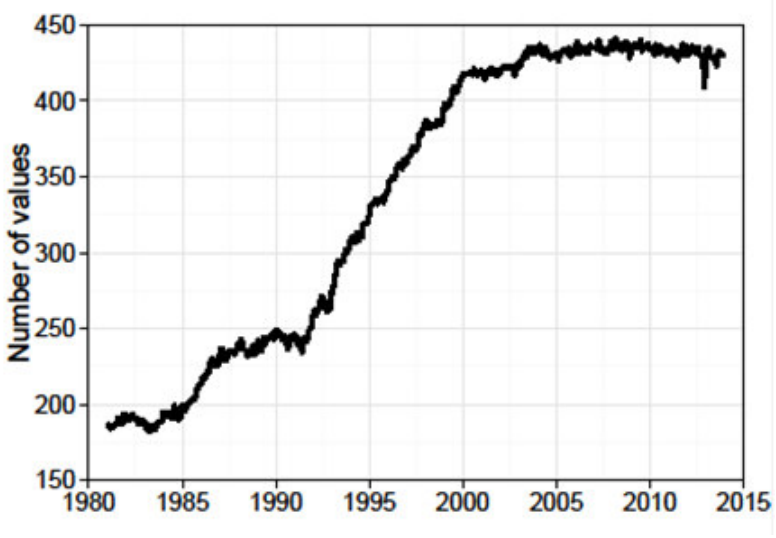


Figura 5.1: Evolución temporal mensual de la cantidad de datos utilizados para generar PISCO-precipitación

Estimación de PISCO – precipitación

PISCO – precipitación v0.1 es el producto resultado de la combinación ("merging") entre los datos de precipitación estimados por el satélite del producto CHIRPS ("Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations") y los datos de precipitación observada de la red de estaciones meteorológicas del SENAMHI.

Para la combinación se ha utilizado la técnica geoestadística Kriging con Deriva Externa (KED) por ser esta una técnica robusta y relativamente sencilla. En esta metodología, la variable a regionalizar es la precipitación observada (PO) y la covariable de la precipitación es la precipitación estimada por el satélite (producto CHIRPS), en la cual se realiza simultáneamente una regresión lineal entre PO y CHIRPS; para luego los errores residuales de esta regresión se interpolen mediante la técnica de Kriging ordinario. Finalmente el PISCO – precipitación v1.0 es el

resultado de la suma espacial entre los valores estimados por la regresión y los valores residuales interpolados.

El proceso de combinación se realizó de manera independiente para cada mes de la serie histórica (Enero 1981 hasta diciembre del 2015), debido a que se cuenta con diferente número de estaciones en cada mes y que el método KED demanda de un modelamiento de semivariogramas residuales para establecer el semivariograma teórico (Esférico, Exponencial o Gausiano) de mejor ajuste en cada mes.

5.1.2. Modelo Digital de Elevación (MDE)

El territorio peruano cuenta con tres productos que brindan información altimétrico de libre acceso: la carta nacional del IGN a la escala 1:100 000, el MDE a partir de técnicas interferométricas, Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) y el MDE a partir de técnicas esteroscópicas, Advance Space Borne Thermal Emisión and Reflection Radiometer (ASTER).

Si bien se puede trabajar con cualquiera de los datos antes expuestos, se optó finalmente por utilizar el producto SRTM debido a su mayor precisión y mayor aplicación en investigaciones hidrológicas.

Los datos digital de elevación SRTM, producido originalmente por la NASA, es un gran avance en la cartografía digital del mundo, y proporciona un importante avance en la accesibilidad de los datos de elevación de alta calidad para una gran parte de las regiones tropicales y otras zonas del mundo en desarrollo. El MDE SRTM v.4.1 versión que incorpora los métodos de interpolación descritos en el artículo "An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data" (Reuter et al., 2007); para completar las zonas sin información producto de sombras muy espesas y lagunas.

5.1.3. Cobertura del suelo

Con el fin de apoya la investigación sobre los cambios globales y el desarrollo de sistema de la Tierra de manera efectiva, el Ministerio de ciencia y Tecnología de China ha puesto en marcha el Programa Nacional de Investigación de Alta Tecnología y Desarrollo de China (Programa 863) llamado "Mapeo de la teledetección y la investigación sobre tecnologías clave de la cobertura terrestre mundial" en el 2010 (National Geomatics Center of China, 2014).

Como uno de los resultados del proyecto tenemos el GlobeLand30-2010 que es producto de la cartografía de la cubierta mundial terrestre con una resolución

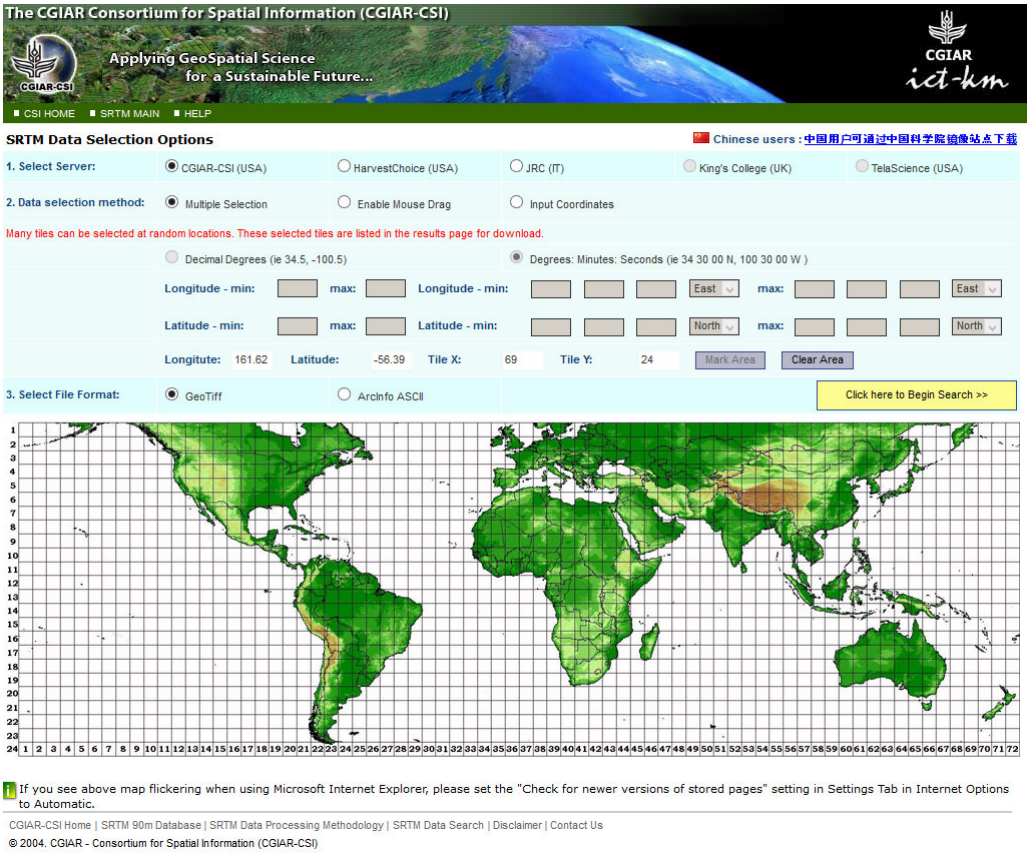


Figura 5.2: Portal de Descargas del MDE SRTM 4.1

espacial de 30 metros, derivado de imágenes de teledetección del año 2010. El producto GlobeLand30-2010 es organizado en mosaicos (Hengl and G, 2014):

- 60° N – 60° S: 5° (latitud)*6° (longitud);
- 60 – 80° N y 60 – 80° S: 5° (latitud)*¨12° (longitud)

Consta de 10 tipos de cobertura del suelo, los cuales son: tierra cultivada, bosque, pradera, matorral, humedal, cuerpos de agua, tundra, supeficies artificales, tierra desolada y nieve y hielo permanente.

5.1.4. Tipo de suelo

Los datos de tipo de suelo es quizás la información más complicada de obtener debido a su alto costo y excesivo trabajo de campo necesario. Para el presente estudio se utilizó la información provista por el SoilGrids1km esta es una colección de mapas sobre propiedades y clase de suelos actualizable del mundo con una resolución de 1̃ km y 250 m (incorporado recientemente este año 2016) de resolución espacial

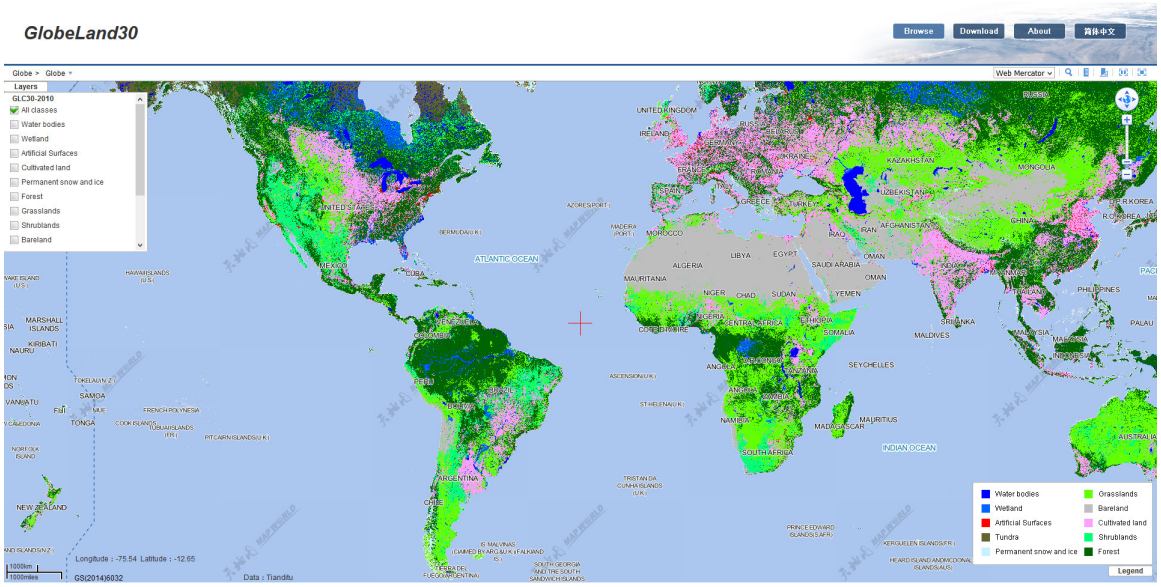


Figura 5.3: Portal de descargas del GlobeLand30

producida utilizando la cartografía automatizada del sueño basada en algortimos de aprendizaje automático.

Los datos WorlSoil1km pueden obtenerse del siguiente http://soilgrids.org o vía FTP (ftp://ftp.soilgrids.org/), estos datos se obtienen en formato raster GeoTIFF a partir de mosaicos provistos de 0.1 x 0.1°.

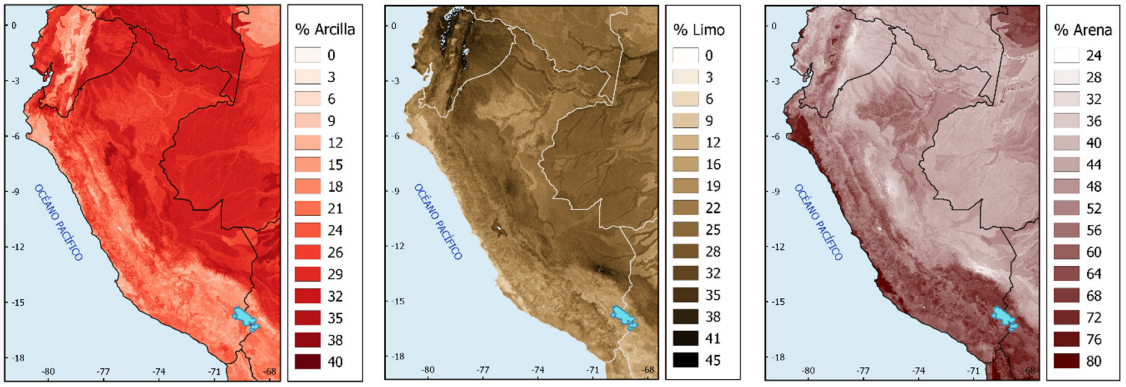


Figura 5.4: Porcentaje de limo, arcilla y arena

5.2. Regiones hidrológicas

El Perú cuenta con una delimitación y codificación de Unidades Hidrográficas, elaborado con la metodología de codificación de Unidades Geográficas Pfafstetter, aprobada mediante ley con la RM Nº 033-2008-AG (SIG-IRH / INRENA, 2008). En base a estas Unidades Hidrográficas, HALCROW en el año 2010 elabora el Atlas del

Potencial Hidroeléctrico del Perú, proponiendo así la delimitación de 14 Regiones Hidrográficas a partir de las 159 unidades hidrográficas (MINEM, 2011). Estas Regiones Hidrográficas se han tomado como áreas de análisis para los resultados de este presente estudio.

5.3. Sistema de codificación Pfafstetter

El Sistema de Codificación Pfaftetter fue desarrollado por Otto Pfastetter en 1989, difundido a partir de 1997 por Verdin y adoptado a partir de entonces por la United State Geological Survey (USGS – Servicio Geológico de los Estados Unidos), como stádar internacional. Es una metodología para asignar Identificadores Ids a unidades de drenaje basado en la topología de la superficie del terreno; dicho de otro modo asigna Ids a una cuenca para relacionarla con sus cuencas vecinas, locales e internas (INRENA/IHR/DIRHI/SIG, 2007).

Consideraciones básicas del sistema

De acuerdo al sistema Pfafstetter, existen tres tipos de unidades de drenaje: cuenca, intercuencas y cuencas internas.

- Cuenca, es una área que no recibe drenaje de ninguna otra área, pero si constituye con flujo a otra unidad de drenaje a través del curso del río, considerado como principal.
- Intercuenca, es un área que recibe drenaje de otra unidad aguas arriba, es una unidad de tránsito del río principal.
- Cuenca interna, es un área de drenaje que no recibe flujo de agua de otra unidad ni contribuye con flujo de agua a otra unidad de drenaje o cuerpo de agua.

Figura 5.5: Mapa de las 14 Regiones Hidrológicas del Perú

Capítulo 6

Aplicación de la Metodología

Para la elaboración de este estudio se ha utilizado las siguientes herramientas:

* El uso del lenguaje de programación estadístico *R* como herramienta para la automatización de los procesamiento de imágenes satelitales ha sido muy importante. **R** es un entorno y lenguaje para el cálculo estadístico y creación de gráficos, se distribuye gratuitamente bajo licencia GNU (General Public Licence); es decir, tiene libertad para usar, copiar y distribuir. https://www.r-project.org/
* QGIS es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de Código Abierto licenciado bajo GNU. QGIS es un proyecto oficial de Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Adecuado para manejar y soportar numerosos formatos y funcionalidades de datos vector, datos raster y bases de datos. http://www.qgis.org
* SAGA GIS es un software híbrido de Información Geográfica (por su acrónimo en inglés *System for Automated Geoscientific Analyses* o Sistema Automatizado para el Análisis Geocientífico en español), creado por el Instituto de Geografía de Göttinfen, Alemania. http://www.saga-gis.org

6.1. Modelo RUSLE

La metodología utilizada para estimar la pérdida de suelo está basada en el modelo de la *Universal Soil Loss Equation*, USLE, presentada en sus inicios por Wischmeier y Smith en el año 1962 y publicada posteriormente en su forma definitiva en el Manual 534 del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Wischmeier & Smith, 1978). Este modelo tiene su versión modificada *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE), de Renard y Foster 1989. Esta metodología tuvo buena aceptación en América y en países con problemas de erosión.

Esta ecuación estima las pérdidas de suelo anuales, como valor promedio de un periodo representativo de años, que se producen en la superficie del terreno debido a la erosión superficial, laminar y en regueros, ante variables que determinan condiciones de clima, suelo, relieve, vegetación y uso de suelo. La hipótesis de partida de esta ecuación se centra en considerar a las precipitaciones como el principal agente activo de esta erosión superficial.

Las mismas condiciones para el factor de erosividad de las lluvias pueden producir erosiones diferentes según las características del suelo sobre la que actúan. Así tenemos una serie de características del propio suelo que determinan la erodabilidad o vulnerabilidad a la erosión, relacionada con su textura, estructura, contenido de materia orgánica y permeabilidad. También el mismo suelo expuesto a la acción de las mismas lluvias tendrá intensidades de erosión distintas según se encuentre en la parte alta, media o baja de la ladera (efecto de relieve). Siendo el Perú la zona de estudio encontraremos mucha variabilidad de relieves, debido a que nuestras regiones van desde el nivel del mar en la costa y puede llegar a una altitud de 6768 msnm en su punto más alto en el Huascarán (Cordillera Blanca), Áncash. La erosión resultante también varía según sea el tipo de vegetación que protege al suelo, las prácticas de cultivo o de aprovechamiento de dicha vegetación. El factor topográfico (LS) y el factor de cubierta vegetal (C), son los que matizan la acción erosiva de las lluvias sobre la erosionabilidad de cada suelo, dando como resultado tasas de erosión diferente en cada caso. La ecuación utilizada (Renard et al., 1997) es la siguiente:

$$\mathbf{A{=}R \times K \times L.S \times C \times P} \tag{6.1}$$

Donde

A: es el cálculo del promedio espacial y temporal de la pérdida de suelo por unidad de área (ton ha^{-1} $año^{-1}$)

R: es el factor de *erosividad* (MJ mm ha^{-1} h^{-1} $año^{-1}$) de lluvia.

K: factor de *erodabilidad* (ton ha h ha^{-1} MJ^{-1} mm^{-1}) del suelo, es la tasa de pérdida de suelo por unidad del índice de erosión para un suelo determinado.

Los demás factores son relacionados a estándares y no tienen dimensiones:

LS: el factor L de longitud de pendiente, el cual nos da la proporción de pérdida de suelo de la longitud de pendiente de la zona de estudio y el factor S que nos dice que tan escarpado se encuentra la pendiente, mide la relación de pérdida de suelo de

la inclinación de la pendiente en la zona de estudio. En la ecuación se considera el factor LS como el factor topográfico que resulta de la multiplicación de los factores de L y S (Pan & Wen, 2014).

C: el factor de cobertura vegetal de las relaciones de la pérdida de suelo de un área con cobertura y la gestión de pérdida de suelo específico.

P: el factor de prácticas de conservación o prácticas de apoyo de la pérdida de suelo con una práctica de apoyo, como el de contorno o pérdida de suelo de terrazas.

La aplicación de RUSLE frente a la USLE inicial no siempre procede de una ampliación de los datos experimentales, sino de una mayor extrapolación estadística de los ya existentes, a veces fuera de los límites físicos de los que se derivaron las expresiones analíticas (Renard et al., 1997). Una de las características más notables de la nueva versión de USLE es que en ocasiones necesita una información más detallada del terreno en estudio, no siempre fácilmente disponible.

6.1.1. Estimación de los factores de Erosión Hídrica

6.1.1.1. Factor de Erosividad

El factor erosividad de la lluvia es un índice numérico que expresa la capacidad de la lluvia para erosionar el suelo (Wischmeier & Smith, 1978). En la forma original de RUSLE el factor R se calcula como la suma promedio anual de la erosividad de las tormentas individuales, que se calcula como el producto de la energía total de la tormenta y la intensidad máxima en 30 minutos (Wischmeier y Smith, 1958). Sin embargo a nivel nacional no contamos con registros de intensidad de lluvia, pero si tenemos disponibilidad de registros de datos de precipitaciones mensuales, las cuales se utilizaron para la determinación del factor R en valores medio anual. Su acción en la erosión es la del disgregado de partículas del suelo y compactación de su superficie.

La distribución del tamaño de las gotas de lluvia incluye una mayor proporción de gotas grandes, con diámetros superiores a 4 mm, cuando las intensidades de lluvia oscilan entre 50 y 100 mm por hora, o superan los 200 mm/h. Las gotas mayores de 4 mm de diámetro son inestables y se rompen, si bien con intensidades superiores a 200 mm/h vuelven a unirse las de menor tamaño, de forma que las intensidades de lluvia más erosivas son las que comprendidas entre 50 y 100 mm/h, y las superiores

a 250 mm/h (Gonzáles del Tánago, 1991).

La siguiente relación desarrollada por Wischmeier y Smith (1978) fue la que se aplicó:

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1{,}735 \times 10^{(1{,}5log_{10}(P_i^2/p)-0{,}08188)} \tag{6.2}$$

Donde:

R el factor erosividad de lluvias (MJ mm ha^{-1} h^{-1} $año^{-1}$); P_i precipitación mensual que está en mm y p la precipitación anual en mm.

6.1.1.2. Factor de Erodabilidad

Es una medida empírica que expresa la susceptibilidad inherente del suelo a la erosión del agua y está determinado por las propiedades intrínsecas del suelo. El factor K se califica en una escala de 0 a 1, donde 0 indica suelos con la menor susceptibilidad a la erosión y al mismo tiempo 1 indica suelos que son altamente susceptibles a la erosión del suelo por el agua.

La ecuación utilizada por Wischmeier y Smith considera la humedad del suelo y el estado de la superficie del suelo en su momento de las lluvias, teniendo un rango de variación estacional a lo largo del año. Experimentalmente se comprueba que los suelos más erosionables corresponde a texturas intermedias (fracción de limos más abundante), considerando que los suelos con un porcentaje de arcillas superior al 30 % son poco erosionables (Gonzáles del Tánago, 1991).

Las propiedades del suelo también están influenciadas por su textura, los cuales también van a definir su erodabilidad. Existen varios métodos para estimar el factor K; (Wischmeier & Smith, 1978) propusieron una ecuación para determinar su valor, donde se incluyen los siguientes factores: porcentaje de limo + arena fina (partículas de 0.002 a0.1 mm de diámetro); porcentaje de arena (partículas de 0.1 a 2.0 mm); contenido de materia orgánica (%); estructura y permeabilidad (Loredo Osti et al., 2007). Cuando no se cuente con los datos necesarios de suelos para utilizar el nomograma, la Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) propuso un método sencillo para estimar el Factor K (FAO, 1980), donde se utiliza la unidad de clasificación del suelo FAO/United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) y la textura. Como parámetros para determinar

K (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007).

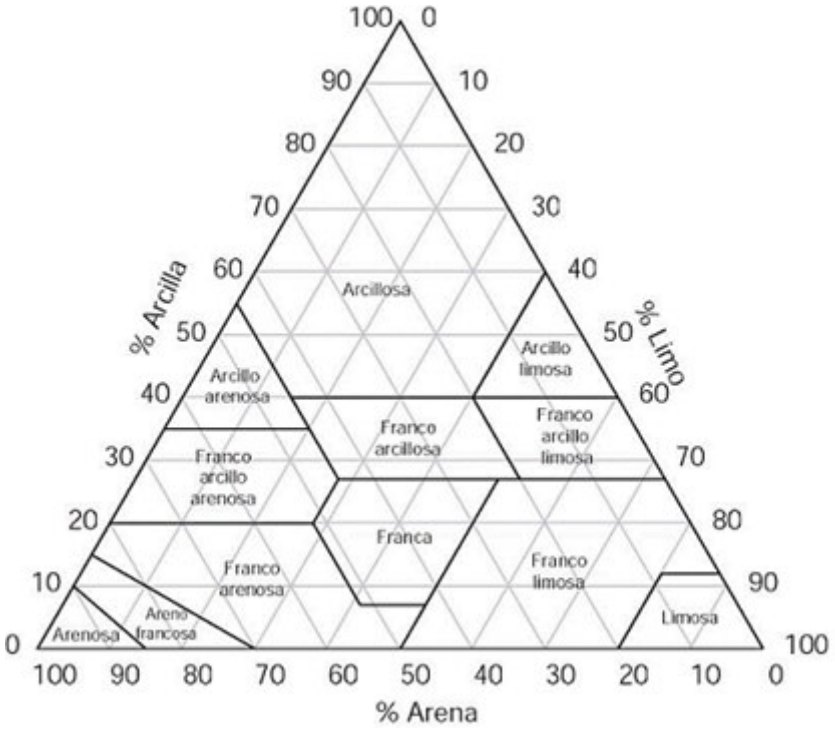


Figura 6.1: Diagrama triangular de las clases texturales básicas del suelo según el tamaño de partículas, de acuerdo con el United States Departament of Agriculture (USDA)

6.1.1.3. Factor Topográfico

Tanto la longitud de la ladera como su pendiente influyen considerablemente en las tasas de erosión de un suelo, siendo el relieve uno de los principales factores que determinan la emisión de sedimentos de las cuencas vertientes.

Según la (Fig. 2.4.), observamos que respecto a la longitud de declive existe una zona considerada como "zona sin erosión", en las partes más altas de la ladera, la aparición de fenómenos erosivos de mayor intensidad en la parte media y la sedimentación como proceso dominante en la parte más baja de la ladera, donde generalmente disminuye la pendiente.

El factor de longitud (L) de ladera es adimensional, definido como el cociente en la tasa de erosión anual de una parcela con una longitud de ladera determinada. El factor de pendiente (S), definido como el cociente entre la tasa de erosión de una

Nombres de los suelos (textura general)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clase textural	Nº	Textura
Suelos francos (textura moderadamente fina)	0-45	0-40	40-100	Arcilloso	1	Fina
	0-20	40-60	40-60	Arcilloso limoso	2	
	45-65	0-20	35-55	Arcilloso arenoso	4	
Suelos arcillosos (textura fina)	0-20	40-73	27-40	Franco limoso arcilloso	3	
	45-80	0-28	20-35	Franco arenoso arcilloso	5	
	20-45	15-52	27-40	Franco arcilloso	6	
Suelos francos (textura mediana)	0-20	88-100	0-12	Limoso	7	Media
	20-50	74-88	0-27	Franco limoso	8	
	23-52	28-50	7-27	Franco	9	
Suelos arenosos (textura gruesa)	86-100	0-14	0-10	Arenoso	10	Gruesa
	50-70	0-50	0-20	Franco arenoso	11	
Suelos francos (textura moderadamente gruesa)	70-86	0-30	0-15	arenoso Franco	12	

Figura 6.2: La clasificación textural de suelos, está clasificada en textural generales de gruesa, media y fina de acuerdo al porcentaje de arena, limo y arcilla.

determinada parcela con una pendiente.

La topografía global contribuye con dos factores a la erosión del suelo en el método RUSLE, estos son el factor de longitud (L) y el factor pendiente (S) (Renard et al., 1997). Ambos factores multiplicándose pueden generar el factor LS. La siguiente ecuación desarrollada por Jiang y Zheng (2008) se utilizó en el entorno SAGA gis para calcular el factor LS en el estudio.

$$LS = 1{,}07(\frac{\lambda}{20})^{0,28}(\frac{\alpha}{10})^{1,45} \tag{6.3}$$

Donde L es el factor de longitud pendiente; S es el factor de inclinación de pendiente; es la longitud de pendiente a lo largo de la proyección horizontal (m); y es el ángulo de inclinación en grados. Fue necesario un DEM para derivar los factores con la ayuda del software SAGA GIS (Grayson & Ladson, 1991). La distribución espacial del factor LS tiene un rango de 0 a 152. Los valores de este factor son adimensionales.

6.1.1.4. Factor de cobertura Vegetal

La cubierta vegetal es el elemento natural de protección del suelo frente a la fuerza erosiva de las precipitaciones, controlando no sólo la energía con la que llegan las

gotas de lluvia a la superficie del suelo, si no la velocidad de la escorrentía superficial (Gonzáles del Tánago, 1991).

Los principales factores que controlan la cubierta vegetal son las copas, superficie de la vegetación, uso de la tierra, rugosidad de la superficie y la humedad del suelo. Esta amplia gama de factores es difícil y costoso para estimar, a menudo varía considerablemente todo el año.

Es por eso que una buena estimación del factor de cobertura que sólo da cuenta de la cubierta vegetal se puede derivar rápidamente a partir de imágenes de satélite. Para esto utilizamos imágenes del Global Land Cover (disponibles en http://www.landcover.org), que desarrolla y distribuye datos de sensores remotos por satélite en los productos que explican la cobertura de la Tierra a escala local y global.

En la Tabla. Tenemos los valores de los factores de C, basados en la clasificación del GLC y una reclasificación de los valores del factor.

6.1.1.5. Factor Prácticas de Conservación

Este último factor de RUSLE recoge la influencia que tienen las prácticas de conservación de suelos sobre las tasas de erosión, realizando los trabajos culturales o disponiendo la vegetación siguiendo curvas de nivel, en fajas o en terrazas para cortar las líneas de escorrentía.

La influencia de la práctica de conservación consiste en disminuir la longitud del declive efectivo para la escorrentía.

6.1.2. Diagrama de flujo

La estimación de cada de uno de estos factores de erosión se pudieron haber desarrollado sólo en un entorno de Sistema de Información Geográfica (SIG) (Tang et al., 2014); sin embargo, al desarrollar el presente estudio a nivel nacional (considerando la superficie continental del Perú de 1'285 215.60 Km^2) resulta complejo. Es por eso que la mayoría del procesamiento de datos se realizaron en un lenguaje de programación denominado RStudio *versión 0.98*, y para otros procesos

se usaron SIG como el Saga Gis *versión 2.1.3*, QGIS *versión 2.14* y el *ArcMap versión 10.2.2.* Para la estimación de cada factor se toma en cuenta lo siguiente:

- Datos de entrada de Información Pluviométrica. Se utiliza el producto PISCO precipitación mensual espacializada (Pm) y se estima mediante la ecuación del factor R, el índice de erosividad mensual para el periodo de estudio (desde enero de 1981 hasta diciembre del 2014) y finalmente se estima el factor de erosividad anual. Para este proceso se elaboró un código en la plataforma de RStudio (v0.98) correspondiente. Cada Mapa del Factor Erosividad Pluvial Anual (Anexo 1) está en un formato raster GeoTIFF y el tamaño de cada celda raster es de 250 metros.
- Con un Digital Elevation Model (DEM) se pudo obtener el factor topográfico, para esto se utilizó el SAGA GIS (Menú: Análisis de Terreno, Hidrología, Índices Topográficos y el módulo del Factor LS) (Oliveira et al., 2013). Pero antes se hace las correcciones necesarias para el DEM, uno de ellos es la del relleno de sumideros (Ferrero, 2004).
- Con un mapa de Porcentajes de Pendiente realizamos la reclasificación para poder estimar el Mapa de Prácticas de Conservación .
- El producto GlobeLand30 (National Geomatics Center of China, 2014) clasifica la cobertura Vegetal de todo el Perú en 10 tipos de cubierta (Tabla 4.3.), de acuerdo a esta clasificación de cobertura reclasificamos pixel por pixel los valores correspondientes para cada Factor C. Logrando como resultado el Mapa de Cobertura Vegetal .
- Es necesario tener información sobre las características del suelo a nivel nacional, para esto es necesario contar con las imágenes satelitales en formato raster GeoTIFF del SoilGrids (Hengl and G, 2014). Para poder clases texturales básicas del suelo según el tamaño de partículas es necesario contar con Mapas de porcentaje de arcilla, limo y arena para luego hallar la clasificación textural de suelos con el software SAGA GIS (Menú: Rejilla, Análisis, Análisis de suelo y su módulo de Clasificación de Texturas de Suelo), obteniendo como resultado un mapa que tiene la clasificación de 12 clases según el diagrama triangular de clases texturales, luego se reclasifica las 12 clases de texturas en sólo 3 tipos de Texturas de Suelo, las cuales son: grueso, medio y fino. Obteniendo así un nuevo mapa de Texturas de Suelo con sólo 3 tipos de texturas. Finalmente con el Mapa de Taxonomía de suelos de 32 tipos, según la GSR , reclasificamos los valores del factor K según los tres tipos de texturas de suelo. Obteniendo como resultado el Mapa de Erodabilidad de Suelo .

Finalmente una vez estimado los factores R, LS, P, C y K utilizamos la ecuación para estimar la erosión de suelos anual del periodo de estudio .

Unidades de suelo de acuerdo a la clasificación de Grupos de Suelos de Referencia (GSR)			Textura		
Cód	Tipo de Suelo	Breve descripción	Gruesa	Media	Fina
AC	ACRISOLES	Muy ácido. Suelos fuertemente meteorizados con baja saturación con bases en alguna profundidad.	0.026	0.04	0.013
AL	ALISOLES	Suelo con baja saturación con bases en alguna profundidad.	0.026	0.04	0.013
AN	ANDOSOLES	Suelos negros de paisajes volcánicos, se desarrollan en eyecciones o vidrios volcánicos bajo casi cualquier clima.	0.026	0.04	0.013
AR	ARENOSOLES	En la zona seca hay poco desarrollo del perfil. Los Arenosoles en los trópicos perhúmedos desarrollan horizontes eluviales *álbicos*.	0.013	0.02	0.007
CL	CALCISOLES	Suelos con sustancial acumulación de calcáreo secundario. Los Calcisoles típicos tienen un horizonte superficial pardo pálido.	0.053	0.079	0.026
CM	CAMBISOLES	Suelos con por lo menos un principio de diferenciación de horizontes en el subsuelo evidentes por cambios en la estructura y color	0.026	0.04	0.013
CH	CHERNOZEM	Suelos negros ricos en materia orgánica. Horizonte superficial *mólico* pardo oscuro a negro	0.013	0.02	0.007
DU	DURISOLES	Suelos fuertemente meteorizados con una capa dura de sílice secundaria (*horizonte petrodúrico*) o nódulos de sílice secundaria (*horizonte dúrico*).	0.053	0.079	0.026
FR	FERRALSOLES	Suelos rojos y amarillos tropicales con alto contenido de sesquióxidos.	0.013	0.02	0.007
FL	FLUVISOLES	Suelos desarrollados en depósitos aluviales. Perfiles con evidencia de estratificación; débil diferenciación de horizontes.	0.026	0.04	0.013
GL	GLEYSOLES	Suelos con signos claros de influencia del agua freática. Evidencia de procesos de reducción con segregación de compuestos de *Fe*	0.026	0.04	0.013
GY	GIPSISOLES	Suelos con acumulación de sulfato de calcio, con o sin carbonatos, concentrada en el subsuelo. Horizonte superficial de color claro.	0.053	0.02	0.007
HS	HISTOSOLES	Suelos de turba y pantanos. La mineralización es lenta y la transformación de restos vegetales a través de la desintegración bioquímica crea una capa superficial de moho	0.053	0.02	0.007
KS	KASTANOZEMS	Suelos pardos oscuros ricos en materia orgánica. Los Kastanozems tienen un perfil similar a los Chernozems pero el horizonte superficial rico en humus es más delgado	0.026	0.04	0.013
LP	LEPTOSOLES	Suelos someros, finos. Los Leptosoles son suelos azonales y particularmente comunes en regiones montañosas.	0.013	0.02	0.007
LX	LIXISOLES	Suelos con diferenciación pedogenética de arcilla (migración de arcilla) entre el suelo superficial con menor y el subsuelo con mayor contenido de arcilla	0.013	0.02	0.007
LV	LUVISOLES	Diferenciación pedogénica del contenido de arcilla	0.026	0.04	0.013
NT	NITISOLES	Suelos tropicales rojos, profundos, bien drenados con un horizonte subsuperficial arcilloso *nítico* que tiene elementos estructurales de bordes planos o nuciformes	0.013	0.02	0.007
PH	PHAEOZEMS	Suelos ricos en materia orgánica. Los Phaeozems son muy parecidos a Chernozems y Kastanozems pero están más intensamente lixiviados	0.013	0.02	0.007
PL	PLANOSOLES	Suelos con un horizonte superficial de textura gruesa abruptamente sobre un subsuelo denso y de textura más fina, típicamente en tierras planas	0.053	0.079	0.026
PT	PLINTOSOLES	Fuerte meteorización con segregación subsecuente de plintita a la profundidad de fluctuación del agua freática o drenaje superficial impedido	0.026	0.04	0.013
PZ	PODZOLES	Suelos con un horizonte iluvial spódico debajo de un horizonte subsuperficial con apariencia de ceniza y cubierta por una capa orgánica	0.053	0.079	0.026
RG	REGOSOLES	Suelos débilmente desarrollados en material no consolidado, que no tienen un horizonte mólico o úmbrico, no son muy someros	0.026	0.04	0.013
LX	SOLONCHAKS	Suelos salinos. Desde débil a fuertemente meteorizados, muchos Solonchaks tienen un patrón de color gléyico a cierta profundidad	0.053	0.04	0.013
LV	SOLONETZ	Suelos con alto contenido de Na y/o Mg intercambiables	0.053	0.079	0.026
UM	UMBRISOLES	Suelo superficial oscuro. Horizonte superficial úmbrico o cámbico con baja saturación de bases	0.026	0.04	0.013
VR	VERTISOLES	Suelos muy arcillosos, que se mezclan, con alta proporción de arcillas expansibles. Estos suelos forman grietas anchas y profundas cuando se secan	0.053	0.079	0.026

Figura 6.3: Valores del factor de erodabilidad (factor K) de acuerdo a la taxonomía y la textura de suelo

Pendiente (%)	Contorno	Cultivo en franjas	Terraza
0.0 - 7.0	0.55	0.27	0.10
7.0 - 11.3	0.60	0.30	0.12
11.3 - 17.6	0.80	0.40	0.16
17.6 - 26.8	0.90	0.45	0.18
26.8 >	1.00	0.50	0.20

Figura 6.4: Valores para el factor de prácticas de conservación (P)

Código	Tipo	Contenido	Factor C
10	Tierra Cultivada	Las tierras utilizadas para la agricultura, horticultura y jardines	0.63
20	Bosque	Tierras cubiertas de árboles, con cubierta vegetal más del 30%	0.003
30	Pradera	Terrenos cubiertos de césped natural con una cubierta más del 10%	0.09
40	Matorral	Tierras cubiertas de arbustos con una cubierta de más del 30%	0.22
50	Humedal	Tierras cubiertas de plantas de humedales y cuerpos de agua	0
60	Cuerpos de agua	Las masas de agua en la superficie terrestre	0
70	Tundra	Hierbas y arbustos en las regiones polares	-
80	Las Superficies Artificiales	Tierras modificadas por las actividades humanas	0.09
90	Tierra Desolada	Tierras con cubierta vegetal inferior al 10%	0.5
100	Nieve y Hielo Permanente	Tierras cubiertas por la nieve permanente, y la capa de hielo	0

Figura 6.5: Valores de Cobertura Vegetal (C)

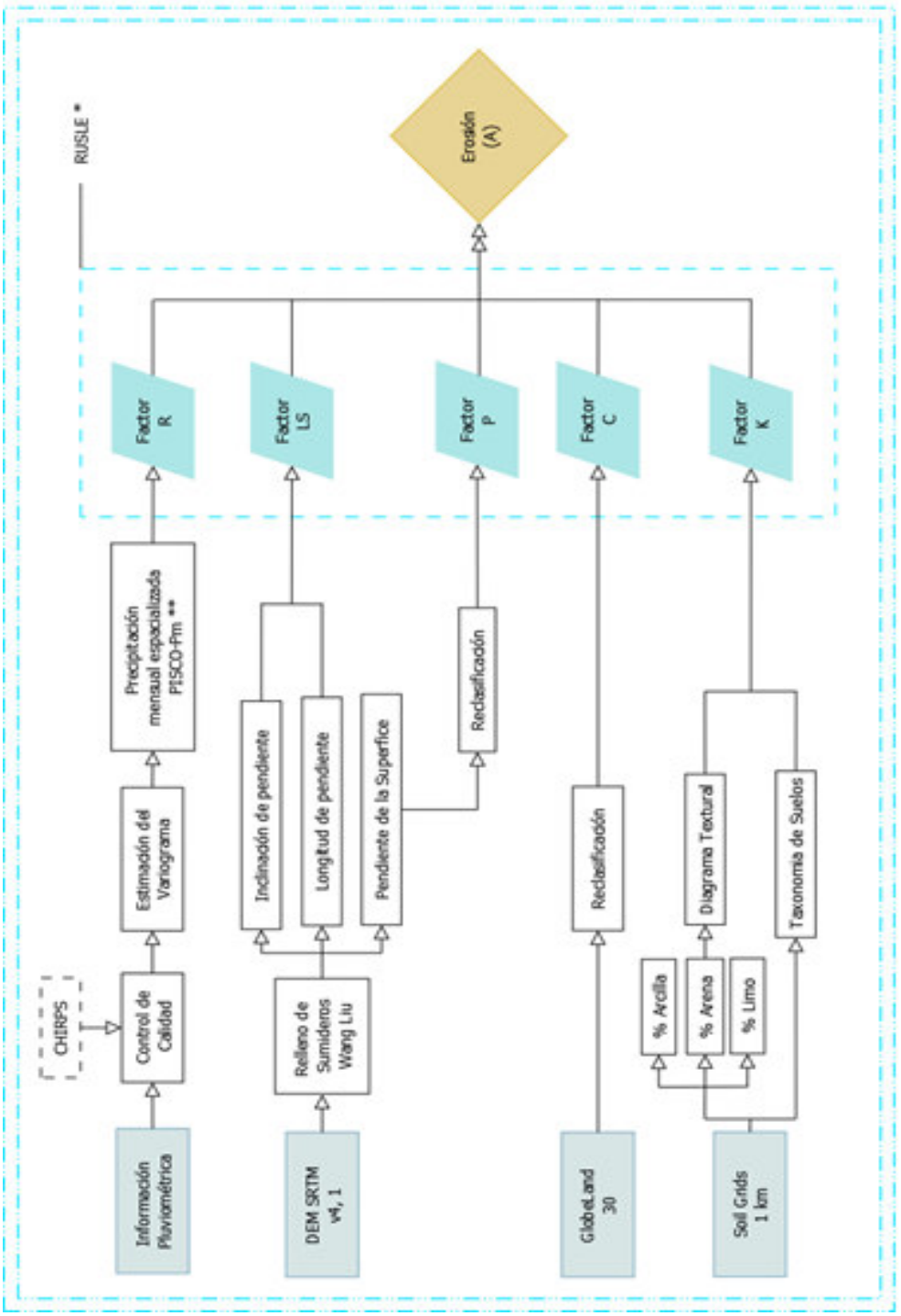


Figura 6.6: Diagrama de flujo del proceso de cálculo para la estimación de la erosión * Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)

Capítulo 7

Resultados

Los resultados son presentados en tres secciones:

- En la primera, se presenta el listado de unidades hidrográficas que comprenden cada región Hidrográfica definida en tablas que indican, por cada una, el nombre de cada unidad hidrográfica y su código nacional.
- En la segunda, se muestran los resultados multianuales (1981-2014) de erosión de suelos para región Hidrográfica en gráficos.
- Gran cantidad de documentación.
- En la tercera, se presentan promedios de erosión de suelos cada 4 años para todo el periodo de estudio en tablas.

7.1. Región Hidrológica Pacífico 1

En el mapa de la Fig. 7.1. la Región Hidrológica Pacífico 1 se encuentra ubicada al sur del Perú. Tiene un área de 34 710 Km2. En la Fig. 7.2. se muestra los niveles de erosión para cada año desde 1981 hasta el 2014, teniendo los niveles bajos de toda la serie en el año 1983, se recuerda que la mayoría de los estudios de gestión de riesgos que analizan los impactos clasifica como "El Niño Extraordinario" los eventos de 1982/83 (SENAMHI, 2014). Cuando había un incremento del volumen de agua de los ríos de la Costa del Perú, debido a las aguas cálidas en dirección contraria a la Corriente del Perú, la elevada temperatura de las aguas superficiales, paralelamente en el sur se produjeron dos fenómenos contrarias a este, la sequía que se localizó al sur del Perú, y los huaycos (deslizamientos de tierra) que se localizó en la zona central del Perú.

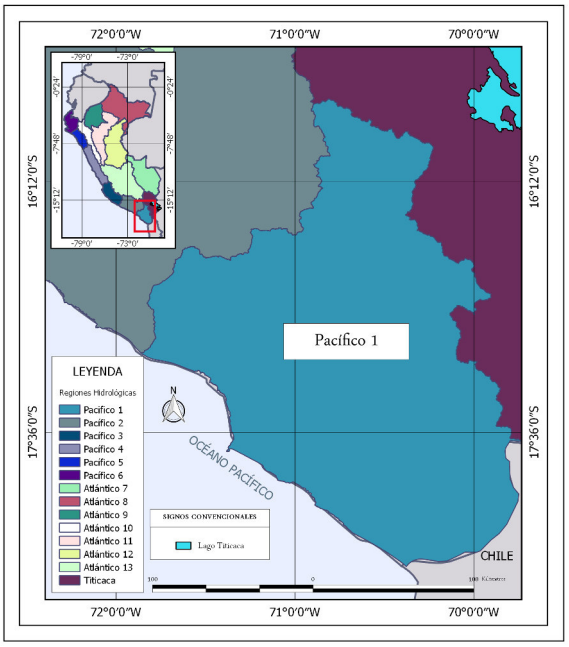


Figura 7.1: Mapa de ubicación de la Región Hidrológica "Pacífico 1"

Cuadro 7.1: Unidades Hidrográficas para la Región Pacífico 1

Región	Nombre	Código
Pacífico 01	Cuenca Caplina	CAP
	Intercuenca 13159	Z23
	Intercuenca 13171	Z24
	Cuenca Lluta	LLU
	Cuenca Ilo - Moquegua	MOQ
	Cuenca Locumba	LOC
	Cuenca Sama	SAM
	Cuenca Hospicio	HOS
	Intercuenca 13153	Z25
	Cuenca Tambo	TAB
	Intercuenca 13173	Z26
	Intercuenca 13174	Z27
	Intercuenca 13175	Z28
	Intercuenca 13177	Z29
	Intercuenca 13176	Z30
	Intercuenca 13179	Z31
	Intercuenca 13170	Z32
	Cuenca Honda Sur	HSU
	Intercuenca 13155	Z33
	Intercuenca 13157	Z34
	Intercuenca	Z35
	Cuenca de la Concordia	DLC

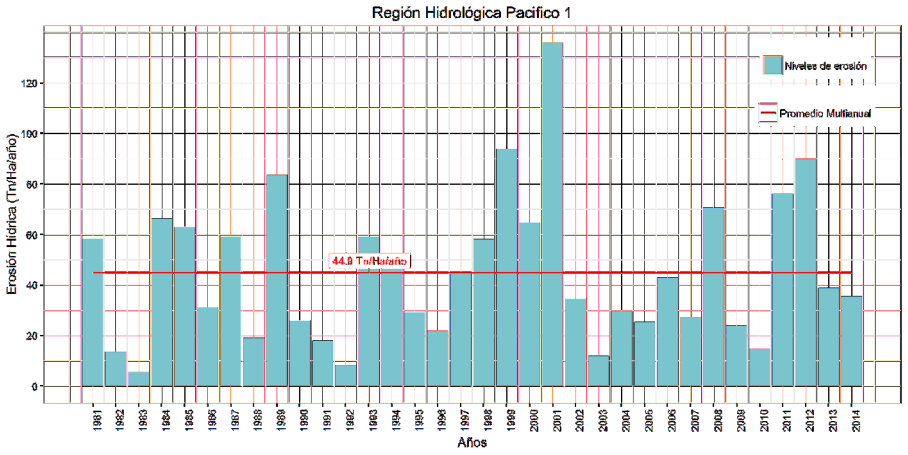


Figura 7.2: Erosión de suelos para la Región Hidrológica "Pacífico 1"

7.2. Región Hidrológica Pacífico 2

La Región Hidrológica Pacífico 2 se encuentra ubicada en la costa sur del Perú (Fig. 7.3.). Tiene un área de 58 690.18 Km^2 . La Fig. 7.4. presenta el gráfico de los niveles de erosión para la Región Pacífico 2, que oscilan entre los 0 a 100 Tn/ha/año y un promedio multianual de 45.8 Tn/ha/año (para la serie de los años de 1981 hasta el 2014). Esta serie presenta su nivel más bajo de erosión en el año 1992, el mismo que registró poca precipitación, presentando sequías en algunas zonas. El mapa FE-12 del Anexo 1, es el del factor de erosividad (factor R), este factor identificó que la zona sur del Perú (vertiente del Pacífico), siendo notorio también en la Region Hidrológica Pacífico 2 tiene un índice bajo, valor que oscila entre los 0 a 1 000 MJ mm $ha^{-1}h^{-1}año^{-1}$. Para el año 1999 (Fig. 6.4) nos muestra valores de erosión de hasta 100 tn/ha/año, registrando en este año valores del factor R de hasta 7 000 MJ mm $ha^{-1}h^{-1}año^{-1}$ para la Región Hidrográfica Pacífico 2.

7.3. Región Hidrológica Pacífico 3

La Región Hidrológica Pacífico 3 se encuentra ubicada en la Costa centro sur del Perú (Fig. 7.5.). Tiene un área de 47 697.33 Km^2. La Fig. 7.6. representa los niveles de erosión para la Región Hidrológica Pacífico 3, valores que llegan hasta los 70 tn/ha/año aproximadamente, y su promedio multianual es de 26.2 tn/ha/año para todo el periodo de estudio (1981-2014). Al igual que en la RH Pacífico 2 presenta sus valores más bajos de eroisón en el año 1992. El mapa FE-12 del Anexo 1 tiene valores del factor R de hasta 7 000 MJ mm ha^{-1} h^{-1} $año^{-1}$ para la región Pacífico 3, valor que no representa ser el más alto para la región Pacífico 3, ya que en el año

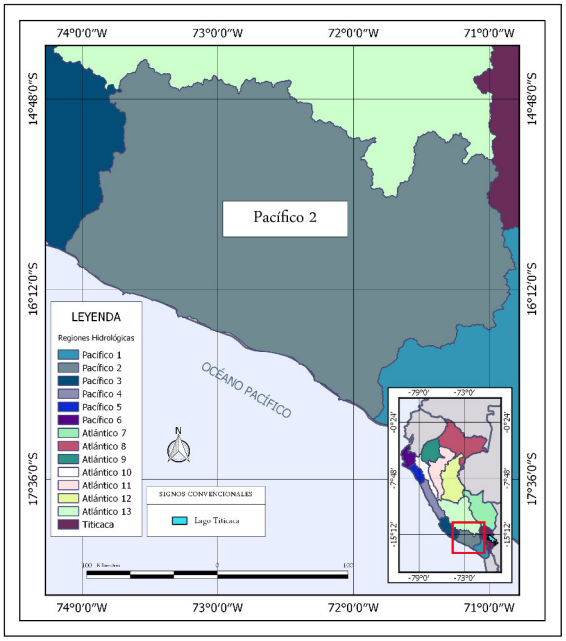


Figura 7.3: Mapa de ubicación de la Región Hidrológica "Pacífico 2"

Cuadro 7.2: Unidades Hidrográficas para la Región Pacífico 2

Región	Nombre	Código
Pacífico 2	Intercuenca 13711	Z36
	Intercuenca 13713	Z37
	Cuenca Ático	ATI
	Cuenca Pescadores - Caravelí	PES
	Cuenca Chaparra	CHP
	Cuenca Ocoña	OCO
	Cuenca Camaná	CAM
	Cuenca Quilca-Vitor-Chili	QVC
	Intercuenca 132	Z38
	Intercuenca 133	Z39
	Intercuenca 1319	Z40
	Intercuenca 137151	Z41
	Cuenca Choclón	CHO
	Intercuenca 137153	Z42

2001 sobrepasa este valor, siendo en algunas zonas mayor a los 10 000 MJ mm ha^{-1} h^{-1} $año^{-1}$.

7.4. Región Hidrológica Pacífico 4

La Región Hidrológica Pacífico 4 se encuentra ubicada en la Costa central del Perú (Fig. 7.7.). Tiene un área de 65 566 Km^2. La Fig. 7.8. representa los niveles de

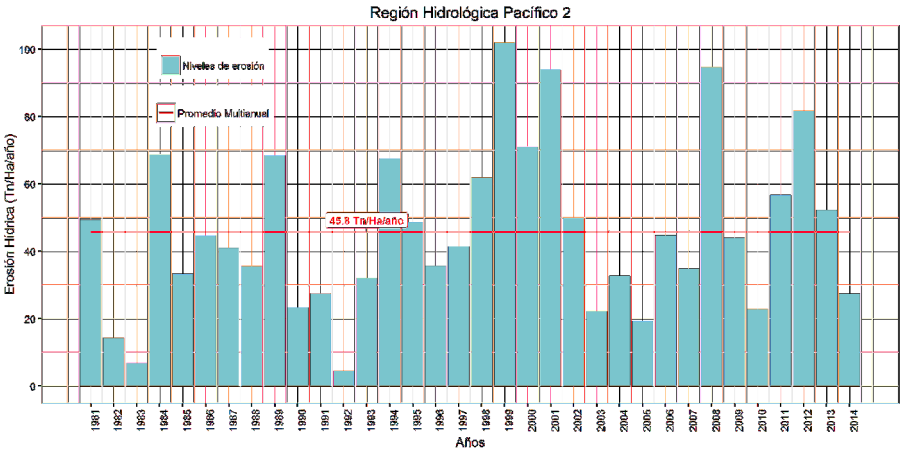


Figura 7.4: Erosión de suelos para la Región Hidrológica "Pacífico 2"

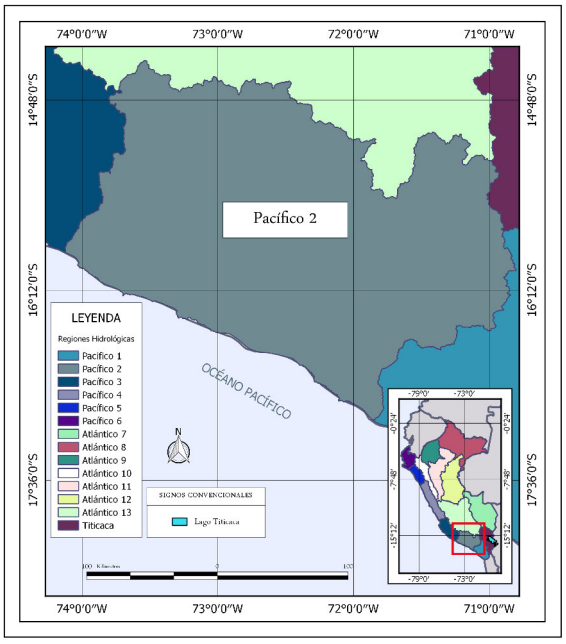


Figura 7.5: Mapa de ubicación de la Región Hidrológica "Pacífico 3"

erosión para esta región, teniendo valores que llegan hasta los 120 tn/ha/año aprox. en el año 1998 y su promedio multianual es de 57.1 tn/ha/año para todo el periodo de estudio (1981-2014).

7.5. Región Hidrológica Pacífico 5

La Región Hidrológica Pacífico 5 se encuentra ubicada en la Costa norte del Perú (Fig. 7.9.). Tiene un área de 31 700.32 Km^2. La Fig. 7.10. representa los niveles de erosión para la Región Hidrológica Pacífico 5, valores que llegan hasta los

Cuadro 7.3: Unidades Hidrográficas para la Región Pacífico 3

Región	Nombre	Código
Pacífico 3	Intercuenca 137155	Z43
	Intercuenca 13717	Z44
	Cuenca Chala	CHL
	Intercuenca 1373	Z45
	Intercuenca 13719	Z46
	Intercuenca 13751	Z47
	Intercuenca 137531	Z48
	Intercuenca 137533	Z49
	Intercuenca 137539	Z50
	Cuenca Topará	TOP
	Cuenca San Juan	SAJ
	Cuenca Pisco	PIS
	Cuenca Ica	ICA
	Cuenca Grande	GRA
	Cuenca Acarí	ACA
	Cuenca Yauca	YAU
	Intercuenca 137157	Z51
	Intercuenca 137159	Z52
	Cuenca Honda	HON

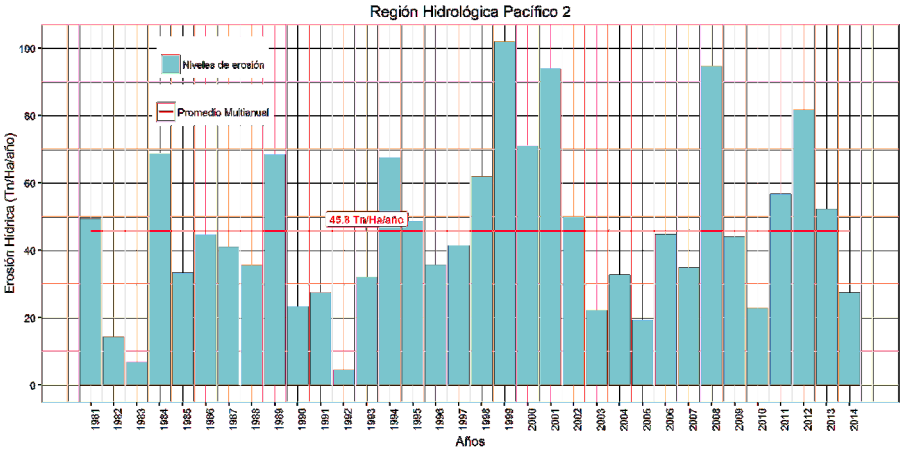


Figura 7.6: Erosión de suelos para la Región Hidrológica "Pacífico 3"

340 Tn/ha/año aproximadamente para el año 1998, y su promedio multianual es de 80.8 Tn/ha/año para todo el periodo de estudio (1981-2014). Presenta sus valores más bajos de erosión en los años 1985 y 1990. El mapa FE-18 del Anexo 1 tiene valores del factor R (para el año 1998) que superan los 10 000 MJ mm ha^{-1} h^{-1} $año^{-1}$ para la región Pacífico 5, siendo este año el que representa mayor área con estos valores altos; sin embargo, los años 1983 (FE-03) y 2001 (FE-21) también nos

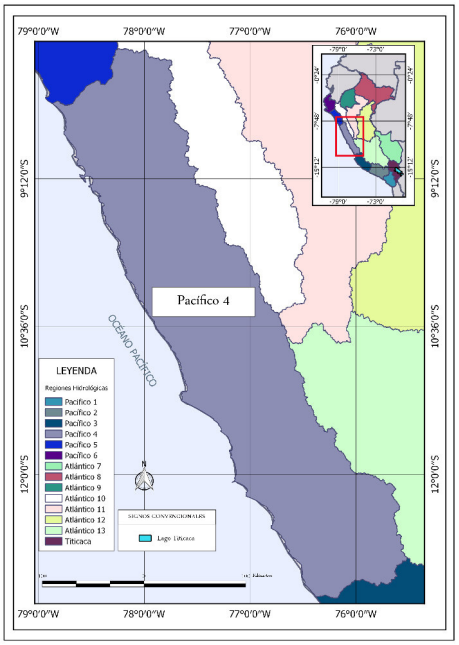


Figura 7.7: Mapa de ubicación de la Región Hidrológica "Pacífico 4"

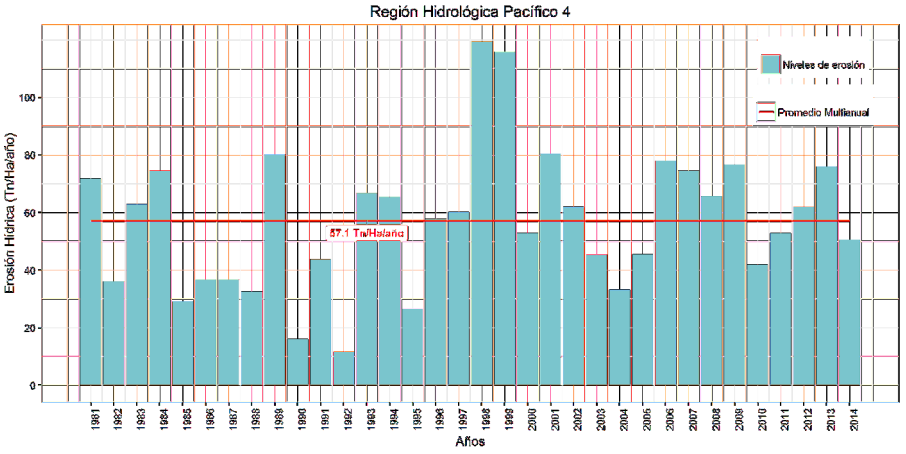


Figura 7.8: Erosión de suelos para la Región Hidrológica "Pacífico 4"

muestras valores que pueden superar los 10 000 MJ mm ha^{-1} h^{-1} $año^{-1}$ pero con menor área de influencia.

7.6. Región Hidrológica Pacífico 6

La Región Hidrológica Pacífico 6 se encuentra ubicada en la Costa norte del Perú (Fig. 7.11.). Tiene un área de 42 304.87 Km^2. La Fig. 7.12. representa los niveles de erosión para la Región Hidrológica Pacífico 6, valores que llegan hasta los 110 Tn/ha/año aproximadamente para el año 1998, y su promedio multianual es de 30.9 Tn/ha/año para todo el periodo de estudio (1981-2014). Sus valores más bajos de

Cuadro 7.4: Unidades Hidrográficas para la Región Pacífico 4

Región	Nombre	Código
Pacífico 04	Intercuenca 1375511	Z53
	Intercuenca 1375531	Z54
	Cuenca Chilca	CHC
	Intercuenca 1375533	Z55
	Intercuenca 1375539	Z56
	Intercuenca 137555	Z57
	Intercuenca 137557	Z58
	Intercuenca 137559	Z59
	Intercuenca 137571	Z60
	Intercuenca 137579	Z61
	Intercuenca 137591	Z62
	Intercuenca 137593	Z63
	Intercuenca 1375951	Z64
	Intercuenca 1375959	Z65
	Intercuenca 137597	Z66
	Intercuenca 1375991	Z67
	Intercuenca 1375999	Z68
	Intercuenca 137711	Z69
	Intercuenca 137713	Z70
	Intercuenca 1375519	Z71
	Cuenca Huamanzaña	HUM
	Cuenca Santa	STA
	Cuenca Lacramarca	LAC
	Cuenca Nepeña	NEP
	Cuenca Casma	CAS
	Cuenca Culebras	CUL
	Cuenca Fortaleza	FOR
	Cuenca Pativilca	PAT
	Cuenca Supe	SUP
	Cuenca Huaura	HUU
	Cuenca Chancay-Huaral	CHU
	Cuenca Chillón	CHI
	Cuenca Rímac	RIM
	Cuenca Lurín	LUR
	Cuenca Mala	MAL
	Cuenca Omas	OMA
	Cuenca Cañete	CAE

erosión en los años 1985 y 1990. El mapa FE-18 del Anexo 1 tiene valores del factor R (para el año 1998) que superan los 10 000 MJ mm ha^{-1} h^{-1} $año^{-1}$ para la región Pacífico 6, siendo este año el que presenta mayor área con estos valores altos; sin embargo, los años 1983 (FE-03) 1992 (FE-12), 2001 (FE-21), 2002 (FE-22), 2006

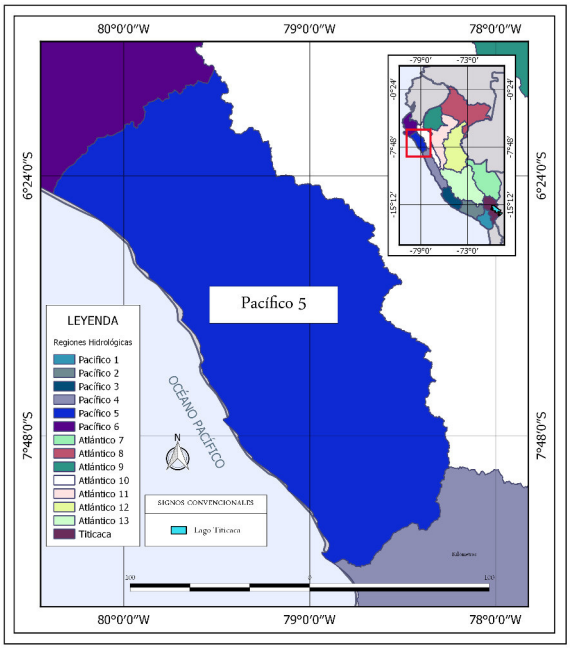


Figura 7.9: Mapa de ubicación de la Región Hidrológica "Pacífico 5"

Cuadro 7.5: Unidades Hidrográficas para la Región Pacífico 5

Región	Nombre	Código
Pacífico 05	Intercuenca 137715	Z72
	Intercuenca 137751	Z73
	Intercuenca 137753	Z74
	Intercuenca 137759	Z75
	Intercuenca 137771	Z76
	Intercuenca 137773	Z77
	Cuenca Olmos	OLM
	Cuenca Motupe	MOT
	Cuenca Chancay-Lambayeque	CLA
	Cuenca Zaña	ZAN
	Cuenca Chamán	CHM
	Cuenca Jequetepeque	JEQ
	Cuenca Viré	VIR
	Cuenca 13773	Z78
	Cuenca Chicama	HIC
	Cuenca Moche	MOC
	Intercuenca 137719	Z79

(FE-26), 2008 (FE-28) y 2012 (FE-32) también nos muestras valores que pueden superar los 10 000 MJ mm ha^{-1} h^{-1} $año^{-1}$.

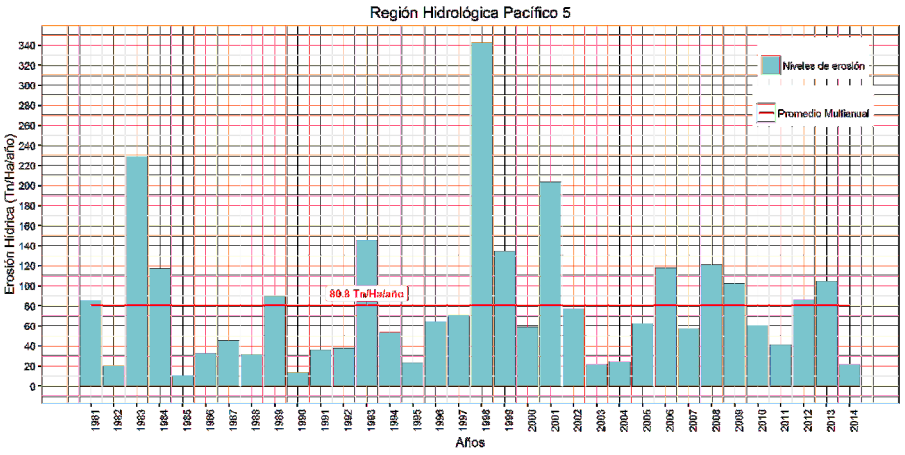


Figura 7.10: Erosión de suelos para la Región Hidrológica "Pacífico 5"

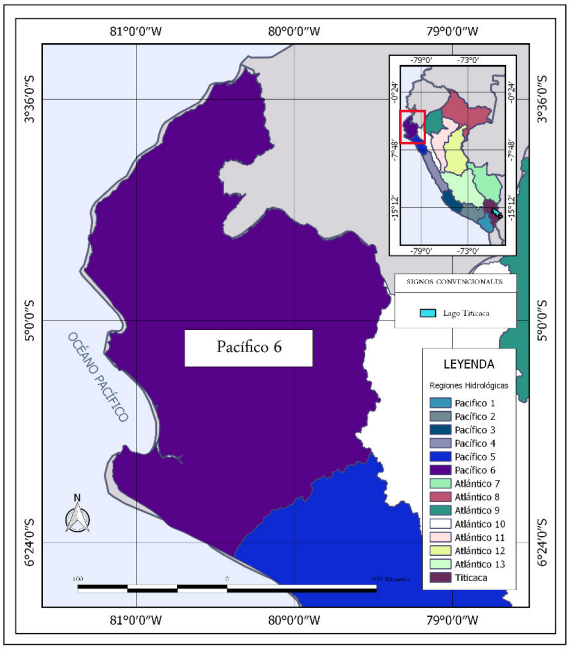


Figura 7.11: Mapa de ubicación de la Región Hidrológica "Pacífico 6"

7.7. Región Hidrológica Atlántico 7

La Región Hidrológica Atlántico 7 se encuentra ubicada en el sur del Perú (Fig. 7.13.). Tiene un área de 144 619.62 Km^2. La Fig. 7.14. representa los niveles de erosión para la Región Hidrológica Pacífico 6, valores que llegan hasta los 70 Tn/ha/año aproximadamente para el año 1986, y su promedio multianual es de 39.9 Tn/ha/año para todo el periodo de estudio (1981-2014). Su variablidad en cuanto a sus valores no son tan marcadas en comparación a las Regiones Hidrológicas del Pacífico. Presenta sus valores más bajos de erosión en los años 1989, 1992 y 2004.

Cuadro 7.6: Unidades Hidrográficas para la Región Pacífico 6

Región	Nombre	Código
Pacífico 06	Cuenca Tumbes	TUM
	Intercuenca 137779	Z80
	Cuenca Cascajal	Z80
	Intercuenca 137759	Z75
	Intercuenca 13779	Z81
	Cuenca Bocapán	BOC
	Intercuenca 13939	Z83
	Cuenca Zarumilla	ZAR
	Intercuenca 13951	Z84
	Cuenca Piura	PIU
	Cuenca Chira	CHR
	Intercuenca 13931	Z85
	Cuenca Fernández	FER
	Intercuenca 13933	Z86
	Cuenca Quebrada Seca	QSE
	Intercuenca 13935	Z87
	Intercuenca 1391	Z88
	Cuenca Pariñas	PAR

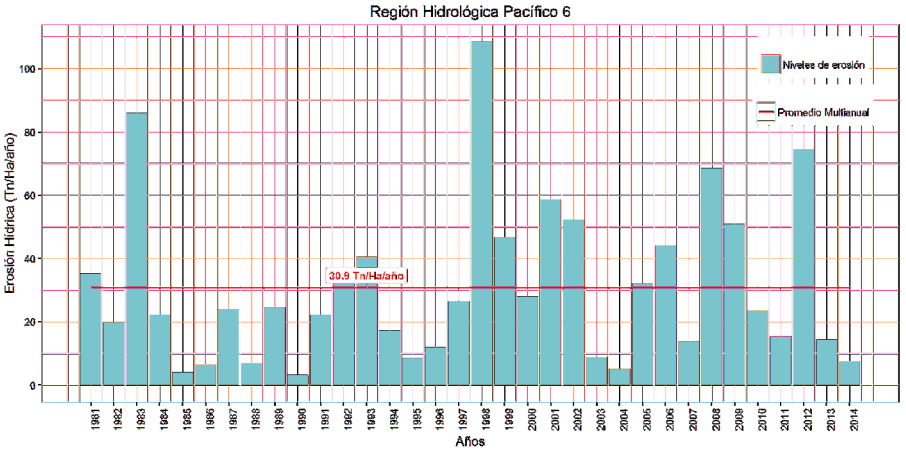


Figura 7.12: Erosión de suelos para la Región Hidrológica "Pacífico 6"

En los mapas del Anexo 1 los valores del factor R (de todos los años) superan los 10 000 MJ mm ha^{-1} h^{-1} $año^{-1}$ para las zonas de hots post.

7.8. Región Hidrológica Atlánticoo 9

La Región Hidrológica Atlántico 9 se encuentra ubicada en el norte del Perú (Fig. 7.15.). Tiene un área de 74 879 Km^2. La Fig. 7.10. representa los niveles de erosión para la Región Hidrológica Atlántico 9 con valores que llegan hasta 2 Tn/ha/año

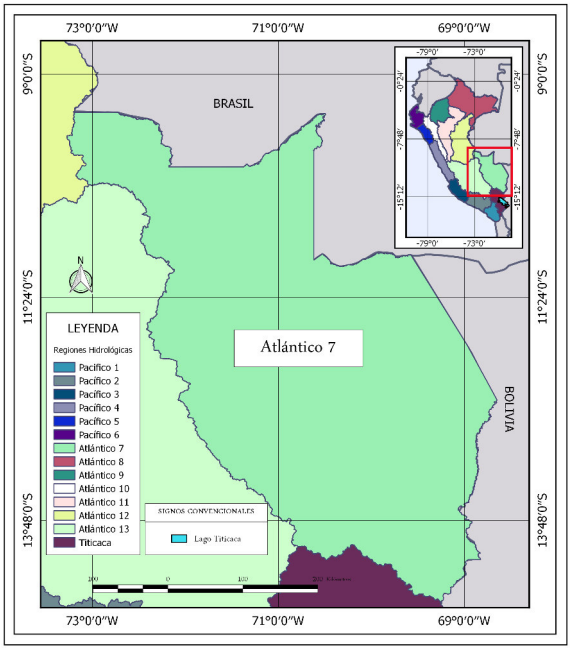


Figura 7.13: Mapa de ubicación de la Región Hidrológica "Atlántico 7"

Cuadro 7.7: Unidades Hidrográficas para la Región Atlántico 7

Región	Nombre	Código
Atlántico 07	Cuenca Tarau	TAR
	Intercuenca Alto Yuréa	YUR
	Intercuenca Alto Acre	ACR
	Intercuenca Alto Laco	IAC
	Intercuenca 48299	Z01
	Cuenca Inambari	INA
	Cuenca Tambopata	TAM
	Intercuenca Medio Alto Madre de Dios	AMD
	Intercuenca Medio Madre de Dios	MMD
	Intercuenca Medio Bajo Madre de Dios	BMD
	Intercuenca Alto Madre de Dios	MDD
	Cuenca De Las Piedras	DLP
	Cuenca Orthon	ORT

aproximadamente para el año 1993 y 2000, y su promedio multianual es de 1.4 Tn/ha/año para todo el periodo de estudio (1981-2014). Presenta sus valores más bajos de erosión en el año 1992. El mapa FE-12 del Anexo 1 tiene valores del factor R (para el año 1992) que superan los 5 000 MJ mm ha^{-1} h^{-1} $año^{-1}$ para la región Atlántico 9 al igual para el año 2000 (FE-20) que también nos muestras valores que pueden llegar hasta los 5 000 MJ mm ha^{-1} h^{-1} $año^{-1}$.

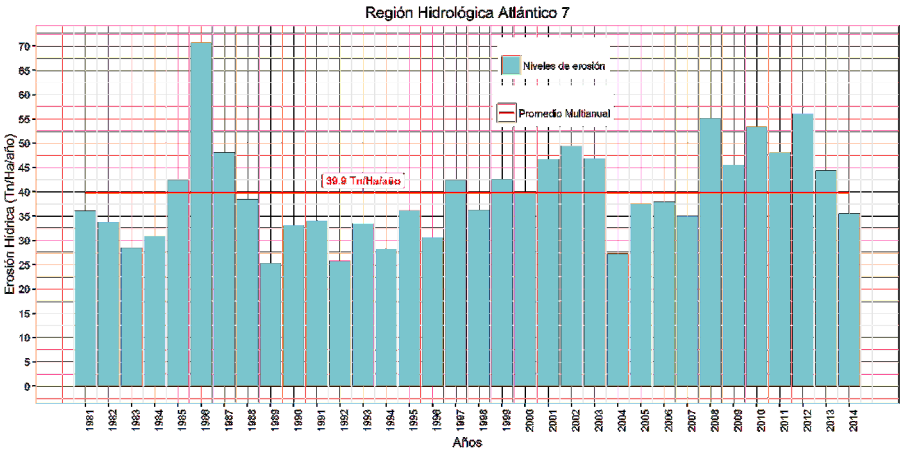


Figura 7.14: Erosión de suelos para la Región Hidrológica "Atlántico 7"

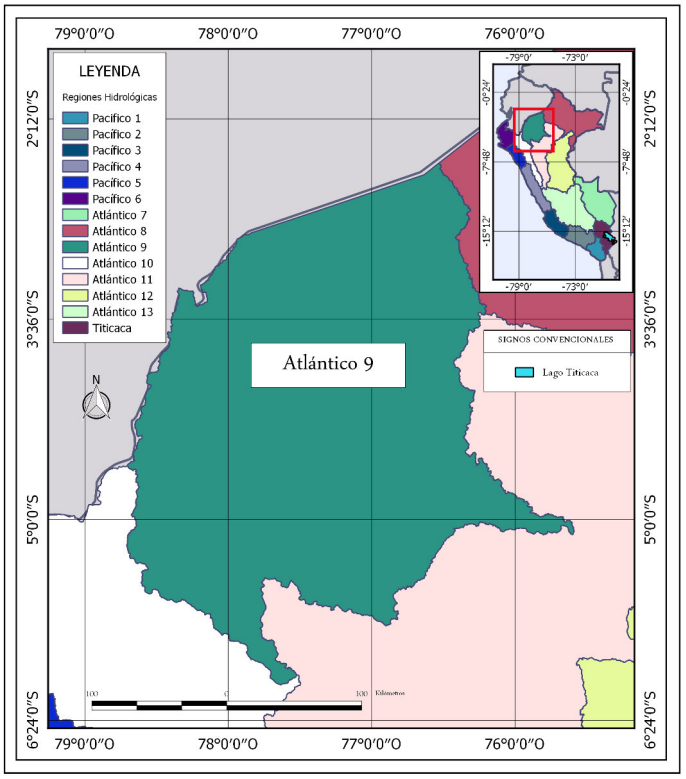


Figura 7.15: Mapa de ubicación de la Región Hidrológica "Atlántico 9"

7.9. Región Hidrológica Atlántico 10

La Región Hidrológica Atlántico 10 se encuentra ubicada en la Costa norte del Perú (Fig. 7.17.). Tiene un área de 59 283.49 Km^2. La Fig. 7.18. representa los niveles de erosión para la Región Hidrológica Atlántico 10, valores que llegan hasta los 170 Tn/ha/año aproximadamente para el año 1993, y su promedio multianual es de 101.7 para todo el periodo de estudio (1981-2014). Presenta sus valores más

Cuadro 7.8: Unidades Hidrográficas para la Región Atlántico 9

Región	Nombre	Código
Atlántico 09	Cuenca Carhuapanas	CAR
	Cuenca Potro	POT
	Intercuenca 49875	Z08
	Intercuenca Alto Marañón I	AMA
	Intercuenca 49871	Z09
	Intercuenca 49871	Z10
	Intercuenca 49877	Z11
	Intercuenca 49873	Z12
	Cuenca Santiago	SAN
	Cuenca Morona	MOR
	Cuenca Pastaza	PAS
	Cuenca Cenepa	CEN
	Intercuenca Medio Marañón	MMA

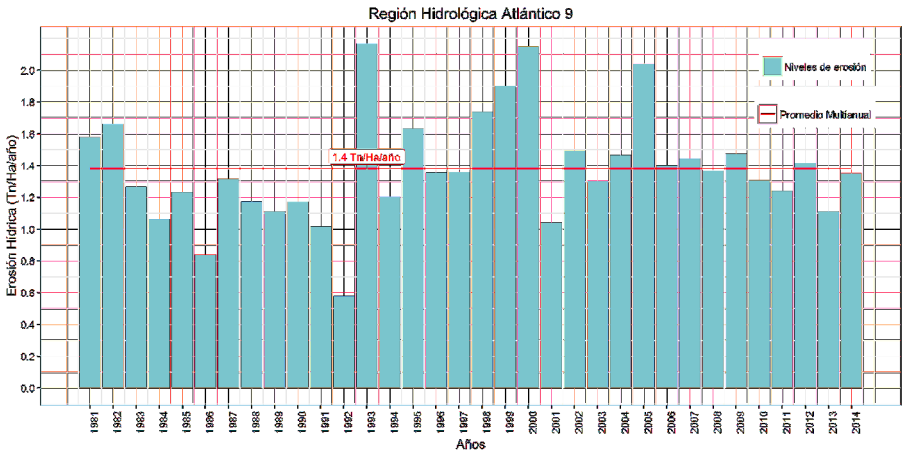


Figura 7.16: Erosión de suelos para la Región Hidrológica "Atlántico 9"

bajos de erosión en el año 1992. El mapa FE-13 del Anexo 1 tiene valores del factor R (para el año 1993) que superan los 3 000 MJ mm ha^{-1} h^{-1} $año^{-1}$ para la región Atlántico 10.

7.10. Región Hidrológica Atlántico 11

La Región Hidrológica Atlántico 11 se encuentra ubicada en la Costa norte del Perú (Fig. 7.17.). Tiene un área de 125 355.29 Km^2. La Fig. 7.18. representa los niveles de erosión para la Región Hidrológica Atlántico 11, valores que llegan hasta los 25 Tn/ha/año aproximadamente para el año 1993, y su promedio multianual es de 17.1 Tn/ha/año para todo el periodo de estudio (1981-2014). Presenta sus valores más bajos de erosión en los años 1992. El mapa FE-13 del Anexo 1 tiene valores del

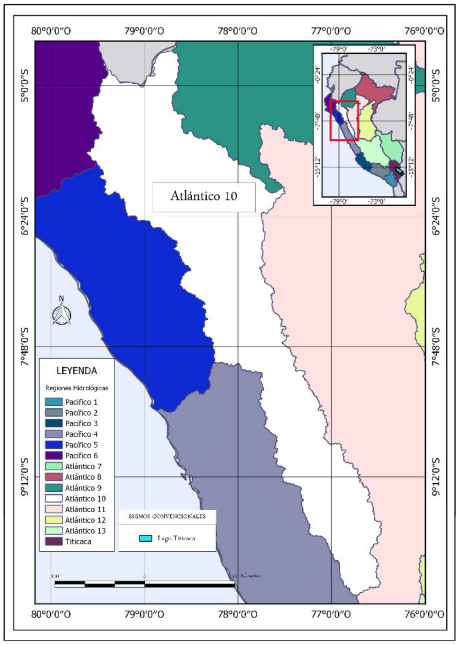


Figura 7.17: Mapa de ubicación de la Región Hidrológica "Atlántico 10"

Cuadro 7.9: Unidades Hidrográficas para la Región Atlántico 10

Región	Nombre	Código
Atlántico 10	Cuenca Crisnejas	CRI
	Intercuenca Alto Marañón IV	MA4
	Intercuenca Alto Marañón III	MA3
	Intercuenca Uctubamba	UTC
	Cuenca Chamaya	CHA
	Cuenca Chinchipe	CHN
	Intercuenca Alto Marañón V	MA5
	Intercuenca Alto Marañón II	MA2

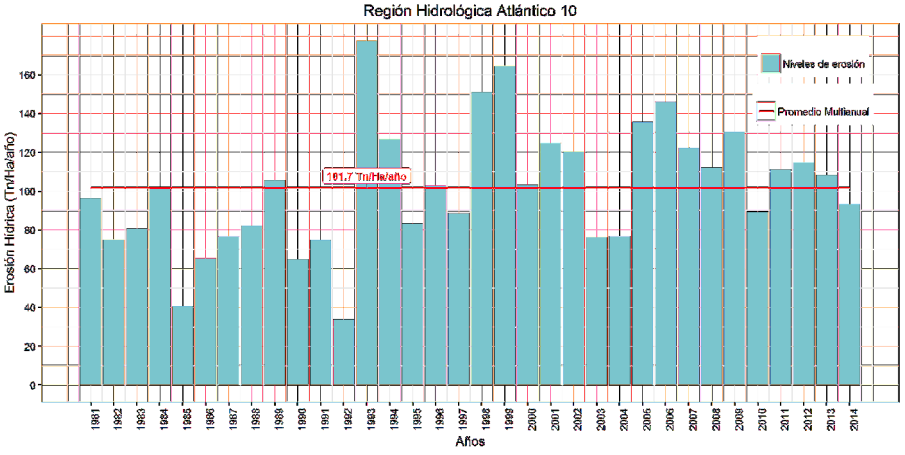


Figura 7.18: Erosión de suelos para la Región Hidrológica "Atlántico 10"

factor R (para el año 1993) que superan los 5 000 MJ mm ha^{-1} h^{-1} $año^{-1}$ para la región Atlnático 11.

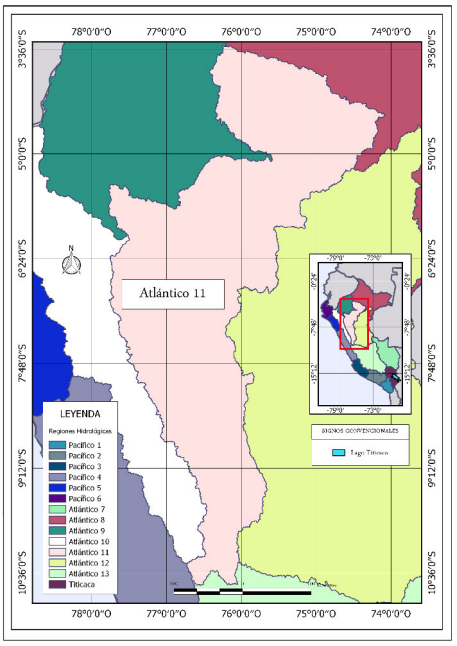


Figura 7.19: Mapa de ubicación de la Región Hidrológica "Atlántico 11"

Cuadro 7.10: Unidades Hidrográficas para la Región Atlántico 11

Región	Nombre	Código
Atlántico 11	Intercuenca Alto Huallaga	AHU
	Intercuenca Medio Huallaga	MHU
	Intercuenca Medio Alto Huallaga	MAH
	Cuenca Huayabamba	HAU
	Intercuenca Medio Bajo Huallaga III	MBH
	Cuenca Paranapure	PAA
	Cuenca Mayo	MAY
	Intercuenca Bajo Huallaga	BHU
	Cuenca Biabo	BIA
	Intercuenca Medio Bajo Marañón	MBM

7.11. Región Hidrológica Atlántico 12

La Región Hidrológica Atlántico 12 se encuentra ubicada en la Costa norte del Perú (Fig. 7.19.). Tiene un área de 159 617.43 Km^2. La Fig. 7.20. representa los niveles de erosión para la Región Hidrológica Atlántico 12, valores que llegan hasta los 8 Tn/ha/año aproximadamente para el año 1993, y su promedio multianual es

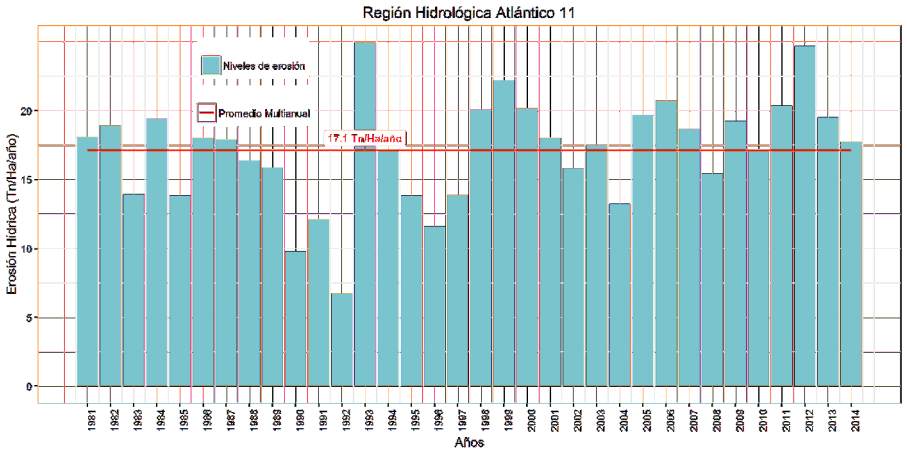


Figura 7.20: Erosión de suelos para la Región Hidrológica "Atlántico 11"

de 3.9 Tn/ha/año para todo el periodo de estudio (1981-2014). Presenta sus valores más bajos de erosión en el año 1992. El mapa FE-13 del Anexo 1 tiene valores del factor R (para el año 1993) que superan los 10 000 MJ mm ha^{-1} h^{-1} $año^{-1}$ para la región Atlántico 12, siendo este año el que representa mayor área con estos valores altos en comparación con otros años.

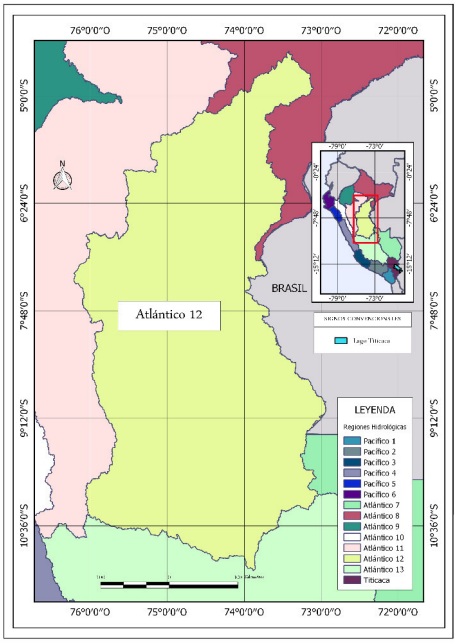


Figura 7.21: Mapa de ubicación de la Región Hidrológica "Atlántico 12"

Cuadro 7.11: Unidades Hidrográficas para la Región Atlántico 12

Región	Nombre	Código
Atlántico 12	Intercuenca 49919	Z13
	Cuenca Tamaya	TAA
	Cuenca Aguaytía	AGU
	Intercuenca 49917	Z14
	Intercuenca 49915	Z15
	Cuenca Cushabatay	CUS
	Cuenca Tapiche	TAP
	Intercuenca 49913	Z16
	Intercuenca 49911	Z17
	Cuenca Pachitea	PAC
	Intercuenca Medio Bajo Ucayali	MBU

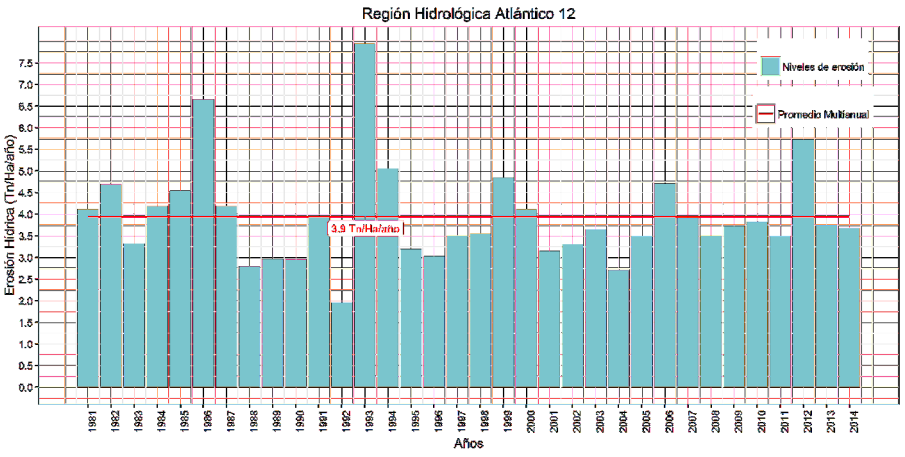


Figura 7.22: Erosión de suelos para la Región Hidrológica "Atlántico 12"

7.12. Región Hidrológica Atlántico 13

La Región Hidrológica Atlántico 13 se encuentra ubicada en la Costa norte del Perú (Fig. 7.21.). Tiene un área de 190 705.15 Km^2. La Fig. 7.22. representa los niveles de erosión para la Región Hidrológica Atlántico 13, valores que llegan hasta los 100 Tn/ha/año aproximadamente para el año 2012, y su promedio multianual es de 58.2 Tn/ha/año para todo el periodo de estudio (1981-2014). Presenta sus valores más bajos de erosión en el año 1992. El mapa FE-32 del Anexo 1 tiene valores del factor R (para el año 2012) que superan los 10 000 MJ mm ha^{-1} h^{-1} $año^{-1}$ para la región Atlántico 13, no siendo este el año que represente la mayor área con estos valores altos.

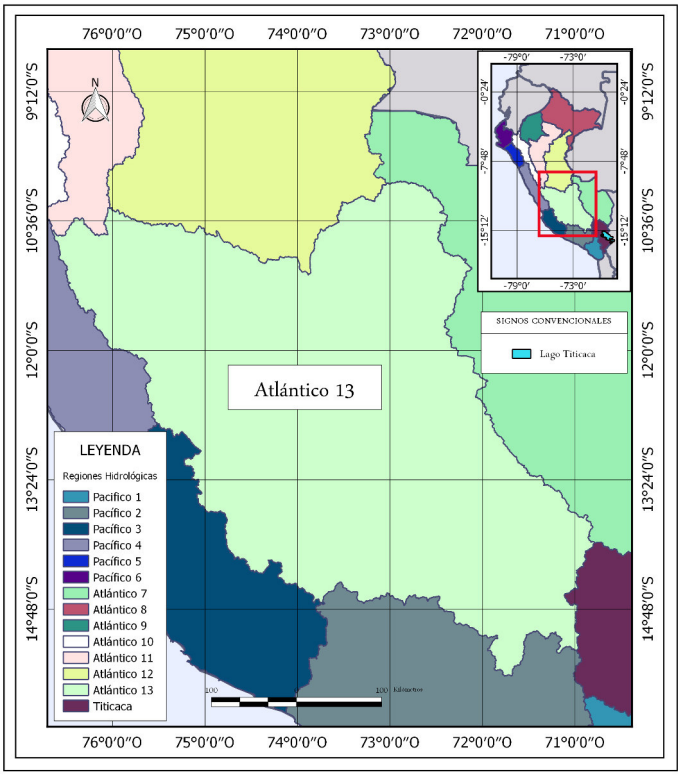


Figura 7.23: Mapa de ubicación de la Región Hidrológica "Atlántico 13"

Cuadro 7.12: Unidades Hidrográficas para la Región Atlántico 13

Región	Nombre	Código
Atlántico 13	Intercuenca 49959	Z18
	Intercuenca 49957	Z19
	Cuenca Cutivireni	CUT
	Cuenca Anapati	ANA
	Cuenca Poyeni	POY
	Intercuenca 49955	Z20
	Intercuenca 49953	Z21
	Intercuenca 49951	Z22
	Cuenca Perené	PER
	Cuenca Mantaro	MAN
	Cuenca Pampas	PAM
	Cuenca Urubamba	URU
	Intercuenca Ato Apurímac	AAP
	Intercuenca Bajo Apurímac	BAP

7.13. Región Hidrológica Titicaca 14

La Región Hidrológica Titicaca 14 se encuentra ubicada en sur del Perú (Fig. 7.23.). Tiene un área de 49 508.92 Km^2. La Fig. 7.24. representa los niveles de erosión

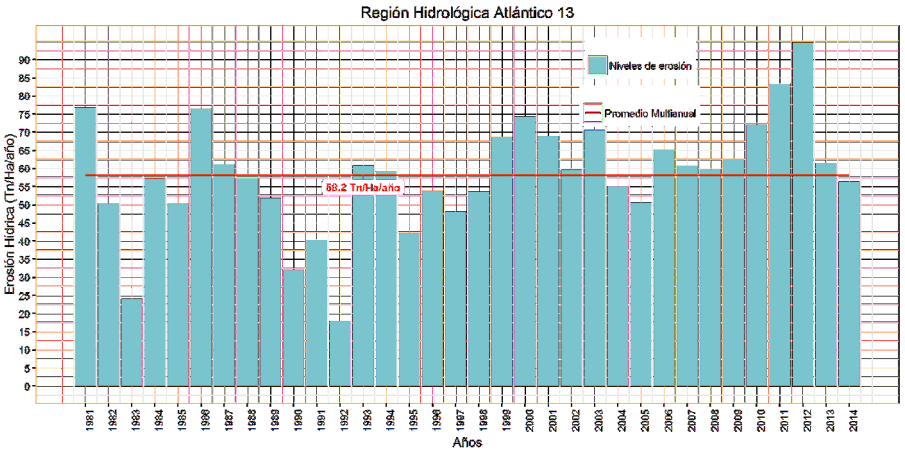


Figura 7.24: Erosión de suelos para la Región Hidrológica "Atlántico 13"

para la Región Hidrológica Titicaca 14, valores que llegan hasta los 50 Tn/ha/año aproximadamente para el año 2001, y su promedio multianual es de 26.4 Tn/ha/año para todo el periodo de estudio (1981-2014). Presenta sus valores más bajos de erosión en el año 1983.

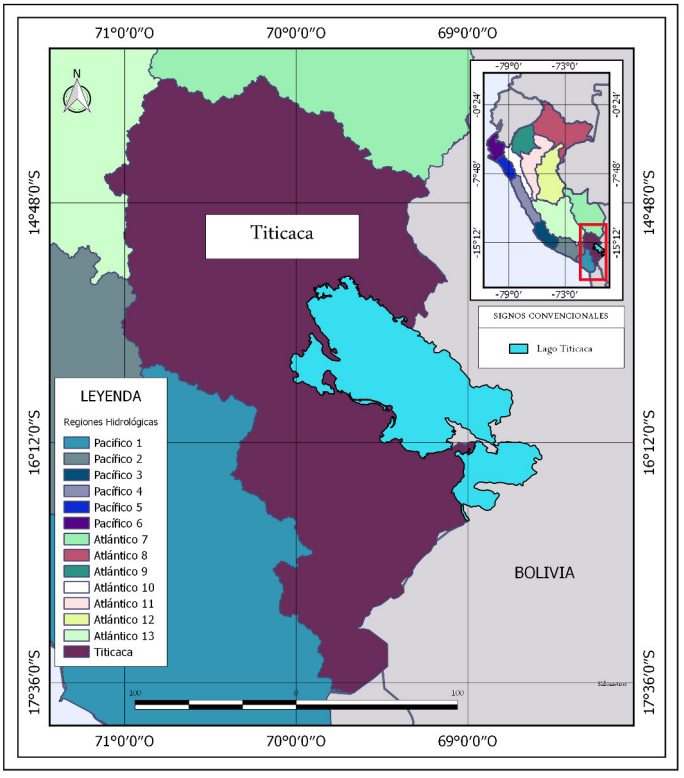


Figura 7.25: Mapa de ubicación de la Región Hidrológica "Titicaca 14"

Cuadro 7.13: Unidades Hidrográficas para la Región Atlántico 14

Región	Nombre	Código
Atlántico 14	Cuenca Ilpa	IIP
	Cuenca Callaccame	CAL
	Intercuenca 0155	Z89
	Intercuenca 0157	Z90
	Intercuenca 0175	Z91
	Intercuenca 0171	Z92
	Intercuenca 0173	Z93
	Intercuenca Ramis	RAM
	Cuenca Ilave	IIA
	Cuenca Coata	COA
	Cuenca Azángaro	AZA
	Cuenca Ushusuma	USH
	Cuenca Caño	CAN
	Cuenca Mauri	MAU
	Cuenca Mauri Chico	MAC
	Cuenca Huancané	HUN
	Cuenca Pucará	PUC
	Cuenca Suches	SUC
	Lago Tititcaca	TIT

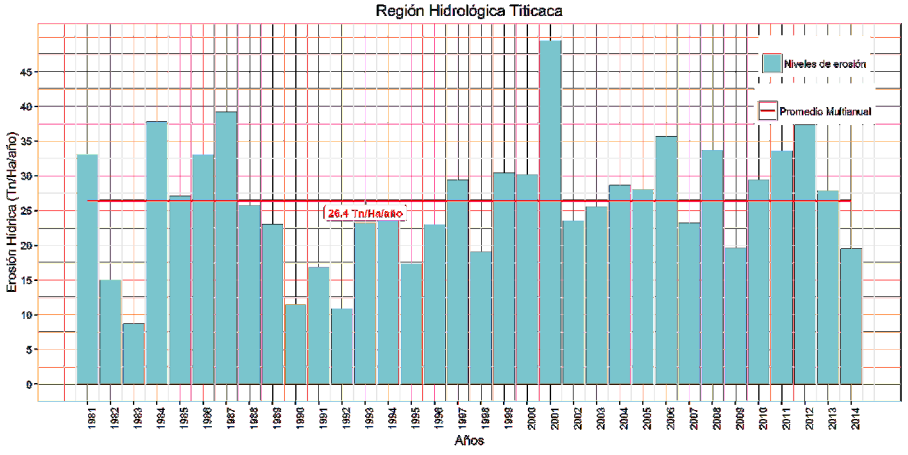


Figura 7.26: Erosión de suelos para la Región Hidrológica "Titicaca 14"

Capítulo 8

Conclusiones

Debido a la variabilidad del clima y el relieve (topografía) del territorio nacional tenemos diferentes resultados en los que respecta al proceso erosivo, teniendo en cuenta que la zona andina es la que presenta mayor erosión laminar hídrica y la Amazonía presenta erosión lateral, debido al abundante transporte de caudal de sus ríos.

Con el análisis rescatamos que nuestro principal factor de influencia en la erosión es el factor de erosividad de la lluvia (factor R), debido a la variabilidad de datos que hemos tenido, el segundo factor de influencia es el topográfico, esto es por las condiciones de relieve de nuestro es muy accidentado y facilita al escurrimiento del agua junto con las partículas del suelo. El factor de vegetación es muy importante también, en nuestra zona andina la vegetación es muy particular y escaza en algunas zonas. Las propiedades del suelo es un factor que no podemos cambiar por lo tanto el único factor que nos ayudará a disminuir nuestras estimaciones de erosión será el factor de prácticas de conservación.

Los resultados de la erosión por Regiones Hidrológicas nos muestra que la costa norte del Perú es la que se ve más afectada a la erosión de suelos, siendo la Región Hidrológica Atlántico 10 la que presenta el mayor promedio multianual de niveles de erosión con 101.7 Tn/ha/año, esta región está conformada de 8 regiones hidrográficas entre las cuales tenemos las intercuencas del Alto Marañon (II, III, IV, V). Como segunda región afectada por la erosión de suelos es la Región Hidrológica Pacífico 5 el cual presenta un promedio multianual de 80.8 Tn/ha/año, se debe tener en cuenta que en esta región se presenta el valor más alto de erosión para el año 1998 con 340 Tn/ha/año. Ambas regiones se encuentran al norte del Perú y son áreas de

influencia entre ellas.

La metodología empleada en el estudio .ªnálisis espacio-temporal de Erosión de Suelos por Regiones Hidrológicas en el Perúçumple con los objetivos de representar la espacialización de la erosión de suelos. Haciendo referencia a la Figura 1.2: Mapa de intensidaddes de erosión de suelos del Perú. Fuente: INRENA, 1996 (Capítulo 1) podemos comparar las similitudes de este primer trabajo referente al fenomeno de erosión hídrica laminar, el cual muestra las intensidades de erosión muy relacionadas a los mapas que presentamos en el Apéndice 3: Mapas de los resultados de ERisón de Suelos del Perú para el Periodo de estudio de 1981 hasta el 2014. Como objetivo principal de la investigación es tener una base de datos actualizada de erosión de suelos a nivel nacional, que puedan ser utilizados como referencia para poder identificar las zonas más afectadas a este fenómeno y consiguientemente realizar estudios mucho más específicos y a mayor detalle.

Capítulo 9

Recomendaciones

El fenómeno erosivo no puede ser evitado; sin embargo si puede ser controlado. El factor de erosión que va a permitir controlar este fenómeno es el Prácticas de Conservación antrópicas (realizadas por el hombre). En el Perú especialmente en la zona andina del pais, no se tiene una adecuada agricultura, por ende no se realizan adecuadas prácticas de conservación de acuerdo a estas. Es recomendable que el gobierno regional de diversas partes del país aumenten el interes de la conservación de suelos debido a que muchas familas dependen de esta activiada económica, siendo el suelo la princial fuente de sustento.

Se recomienda que el estudio de estimación de riesgo de erosión de suelos debe ser realizada de manera multidiciplinaria contando con una variedad de profesionales que puedan aportar a un mejor enfoque del riesgo.

Capítulo 10

Apéndice 1

Mapas del Factor de Erosividad Pluvial Anual para el periodo de 1981 hasta el 2014

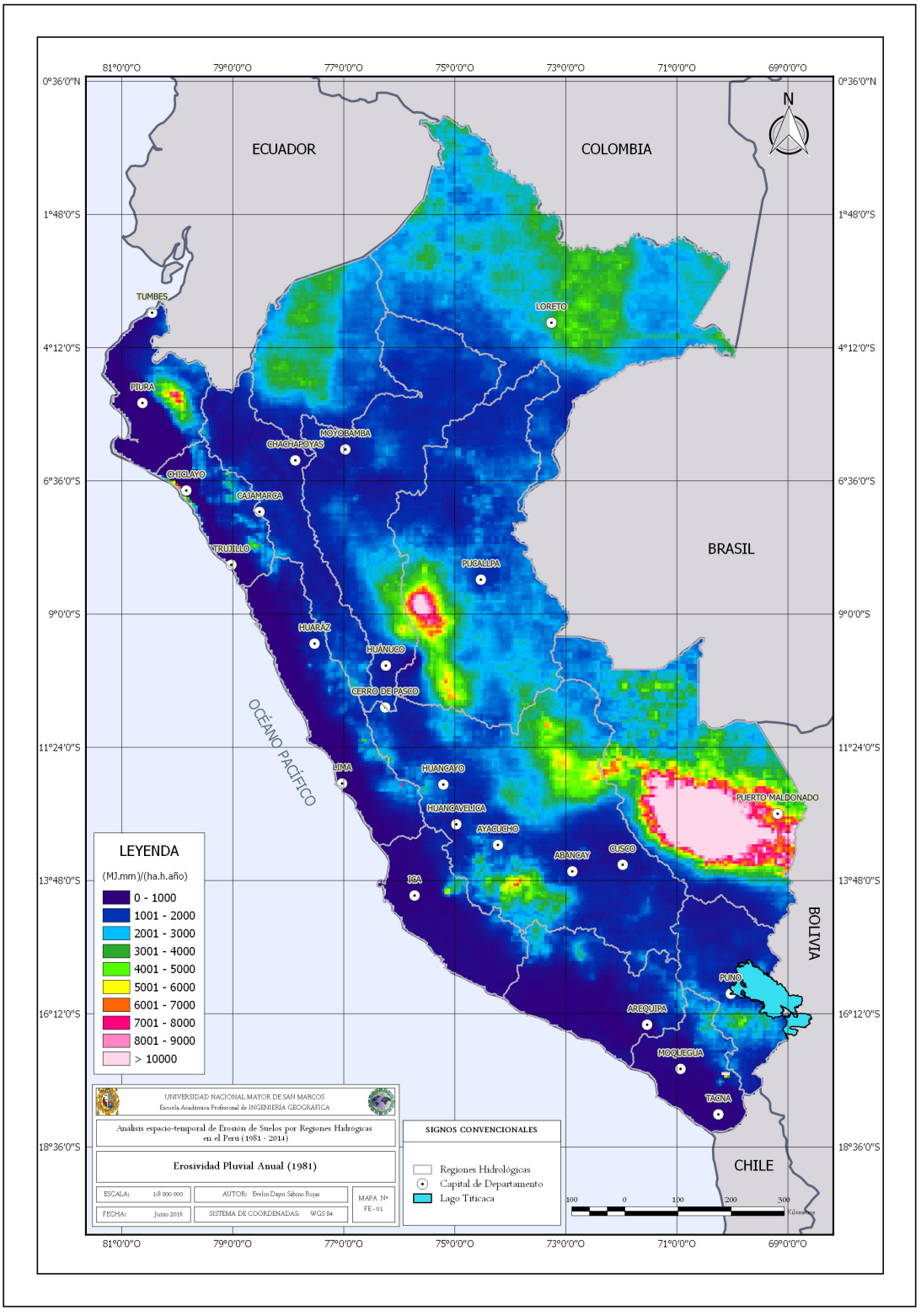


Figura 10.1: Erosión Pluvial Anual (1981)

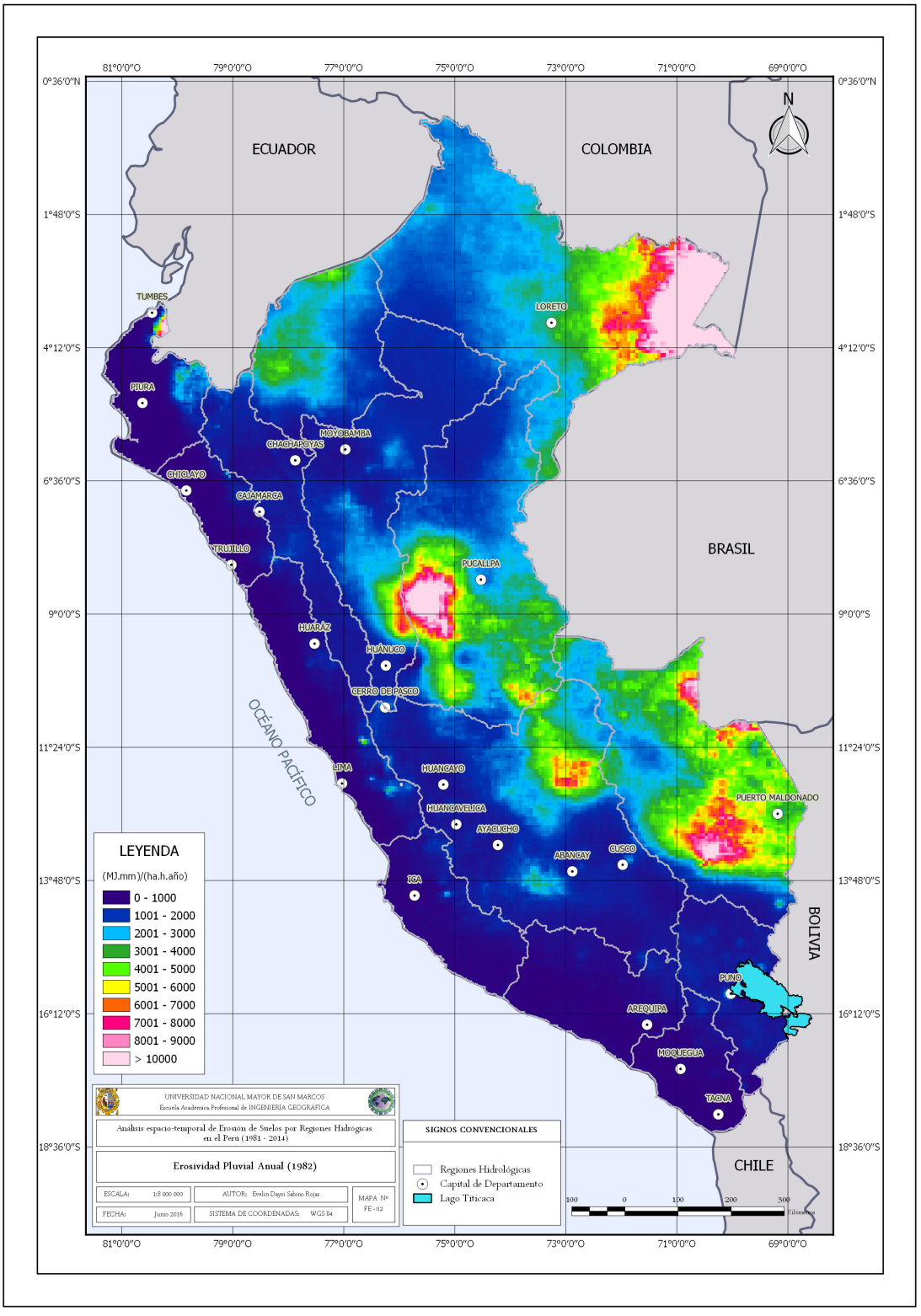


Figura 10.2: Erosión Pluvial Anual (1982)

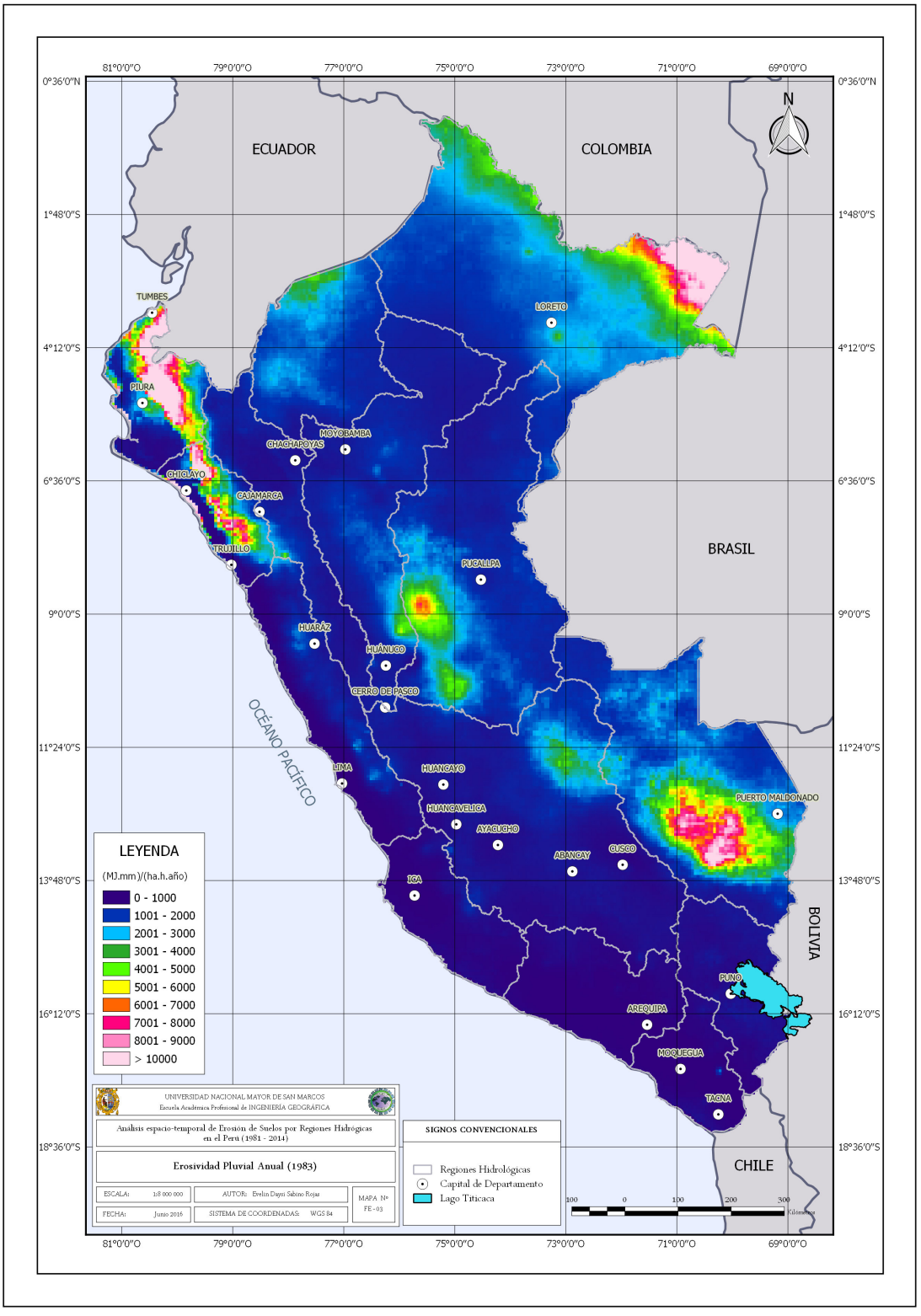


Figura 10.3: Erosión Pluvial Anual (1983)

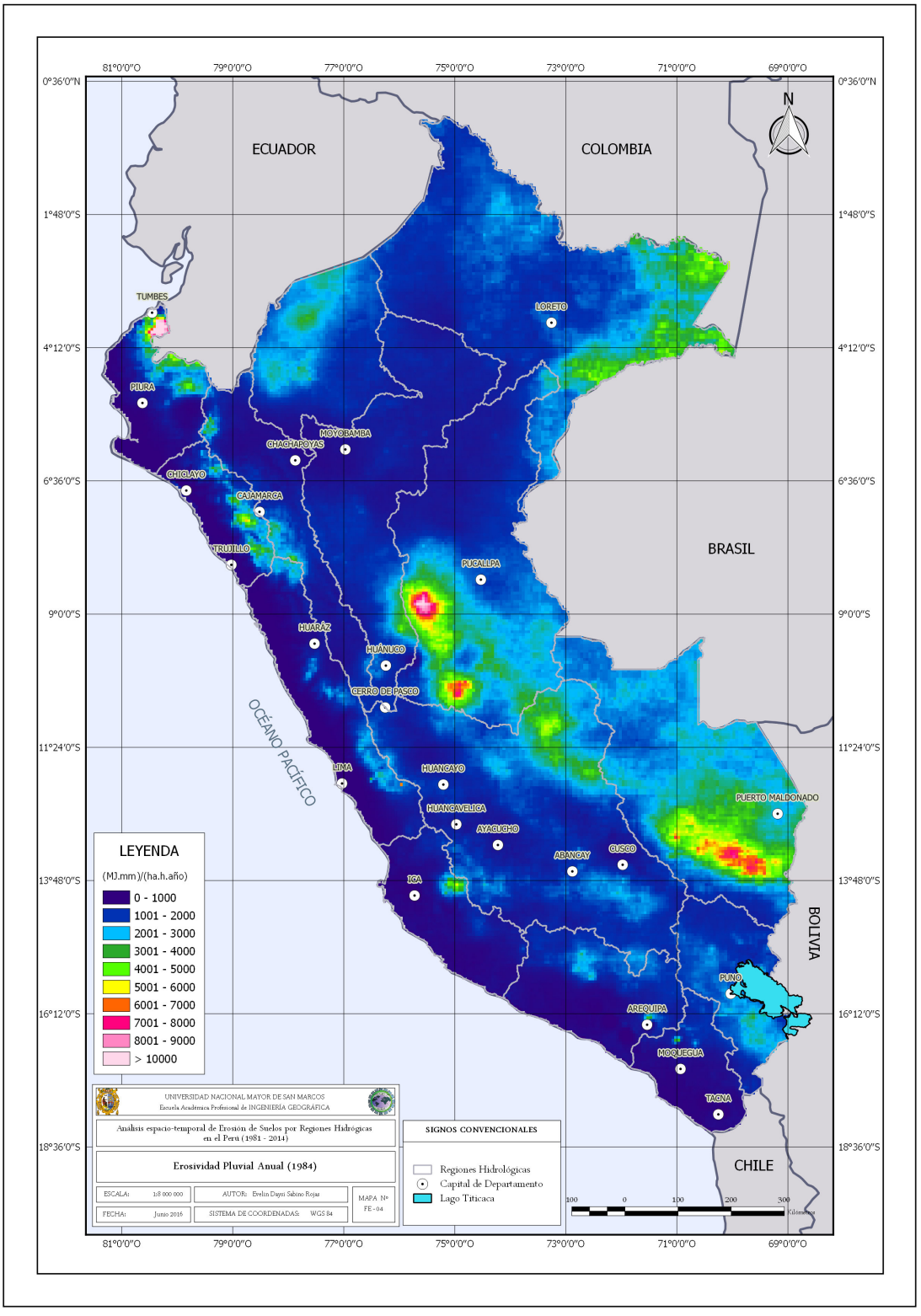


Figura 10.4: Erosión Pluvial Anual (1984)

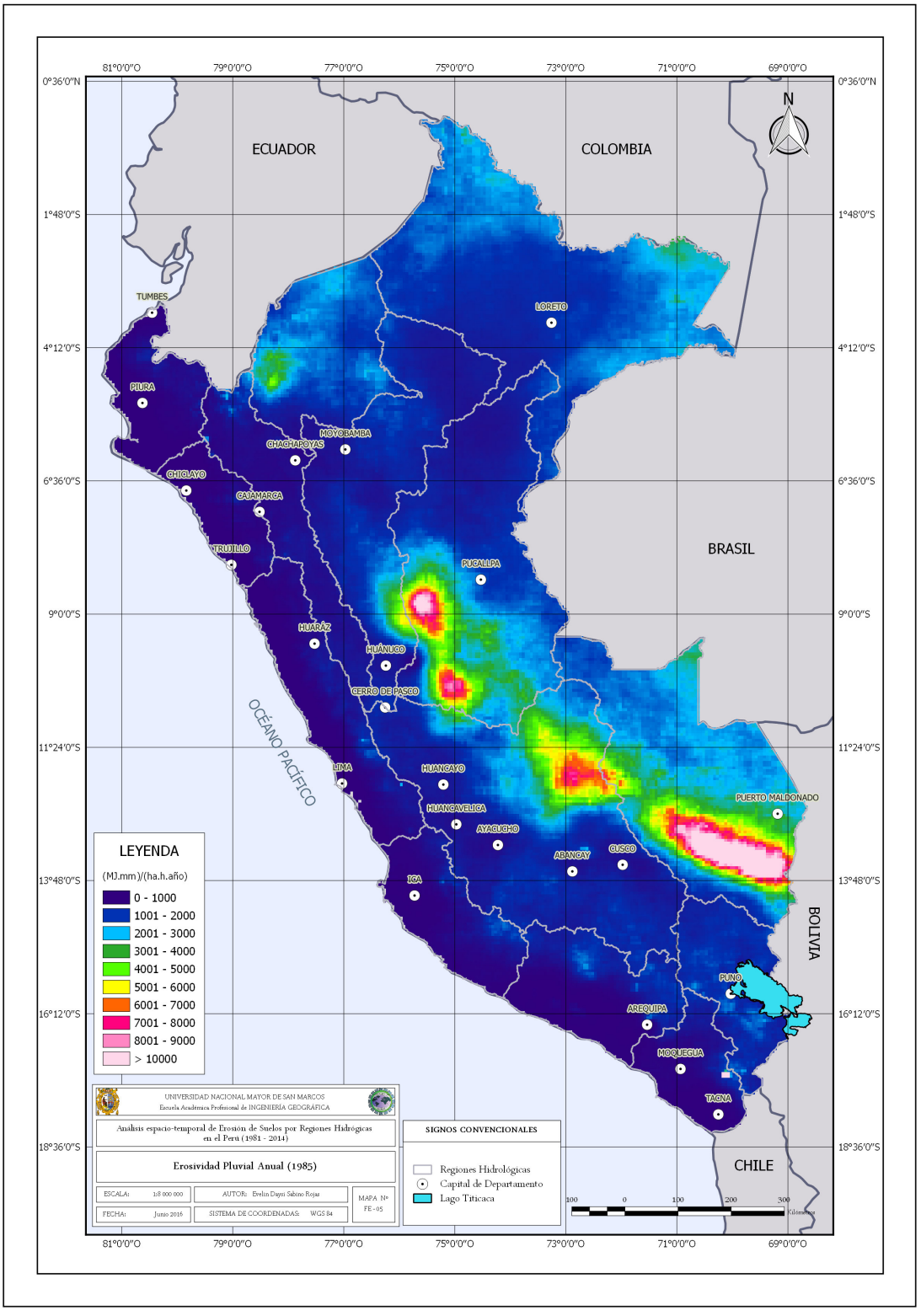


Figura 10.5: Erosión Pluvial Anual (1985)

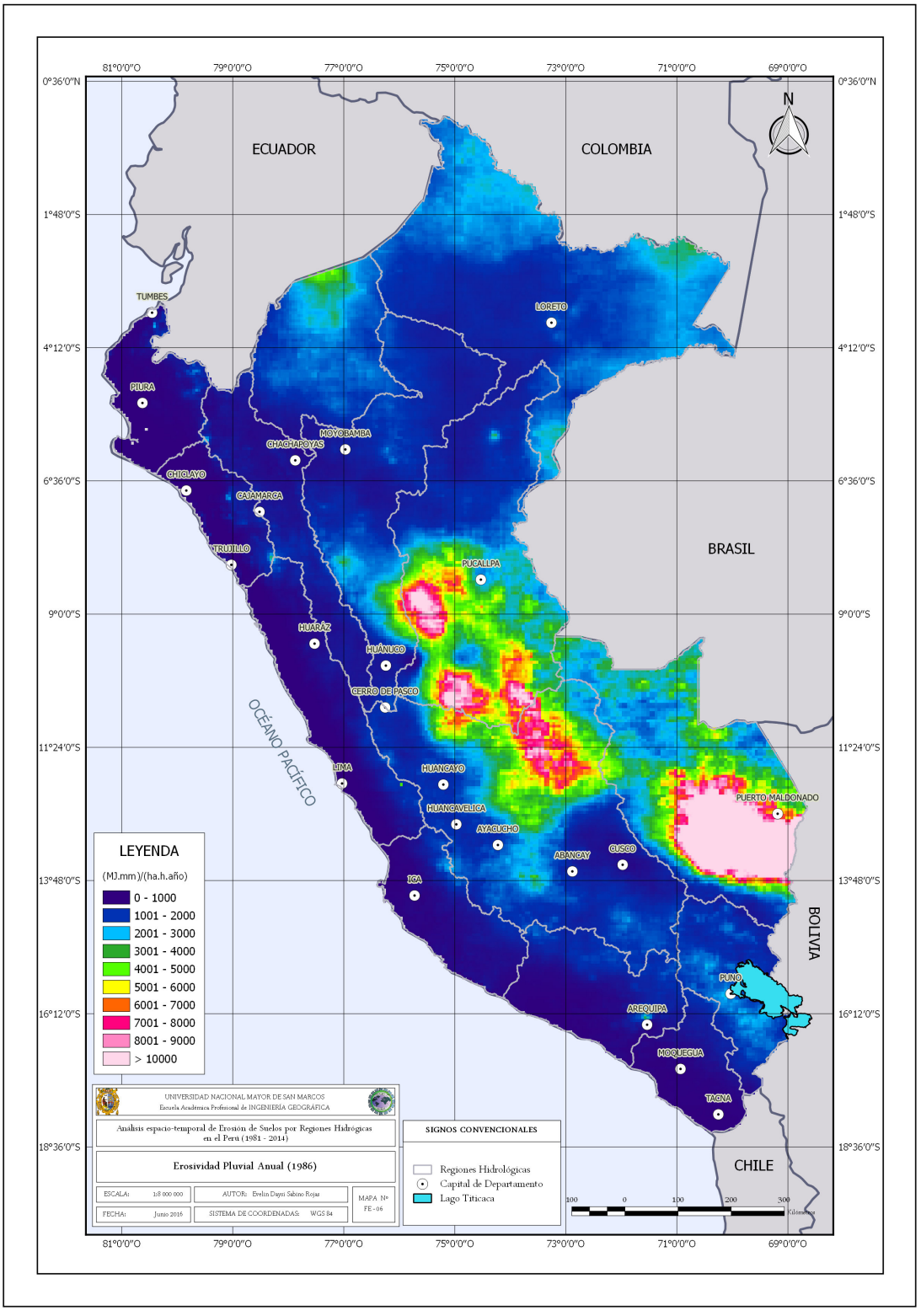


Figura 10.6: Erosión Pluvial Anual (1986)

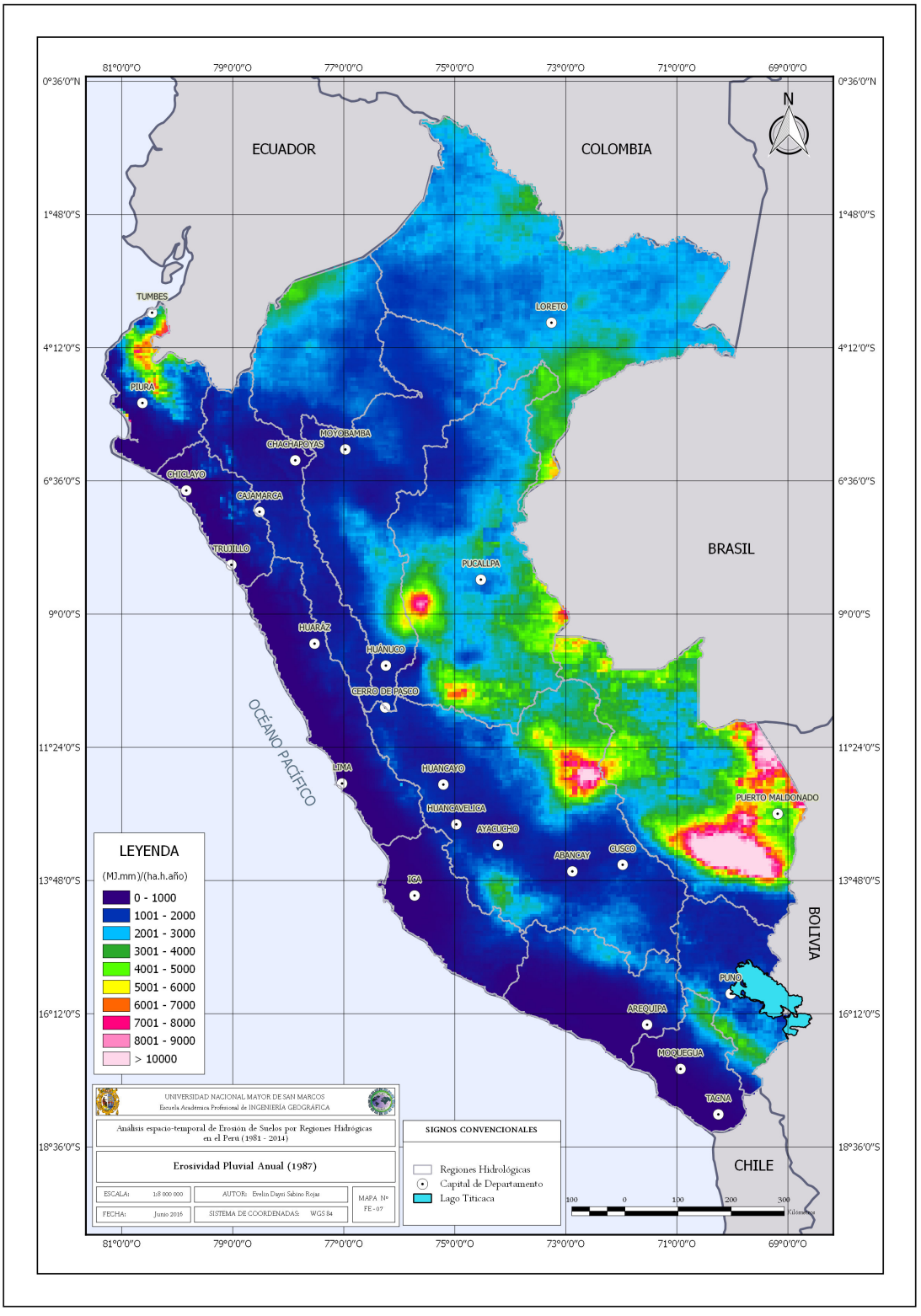


Figura 10.7: Erosión Pluvial Anual (1987)

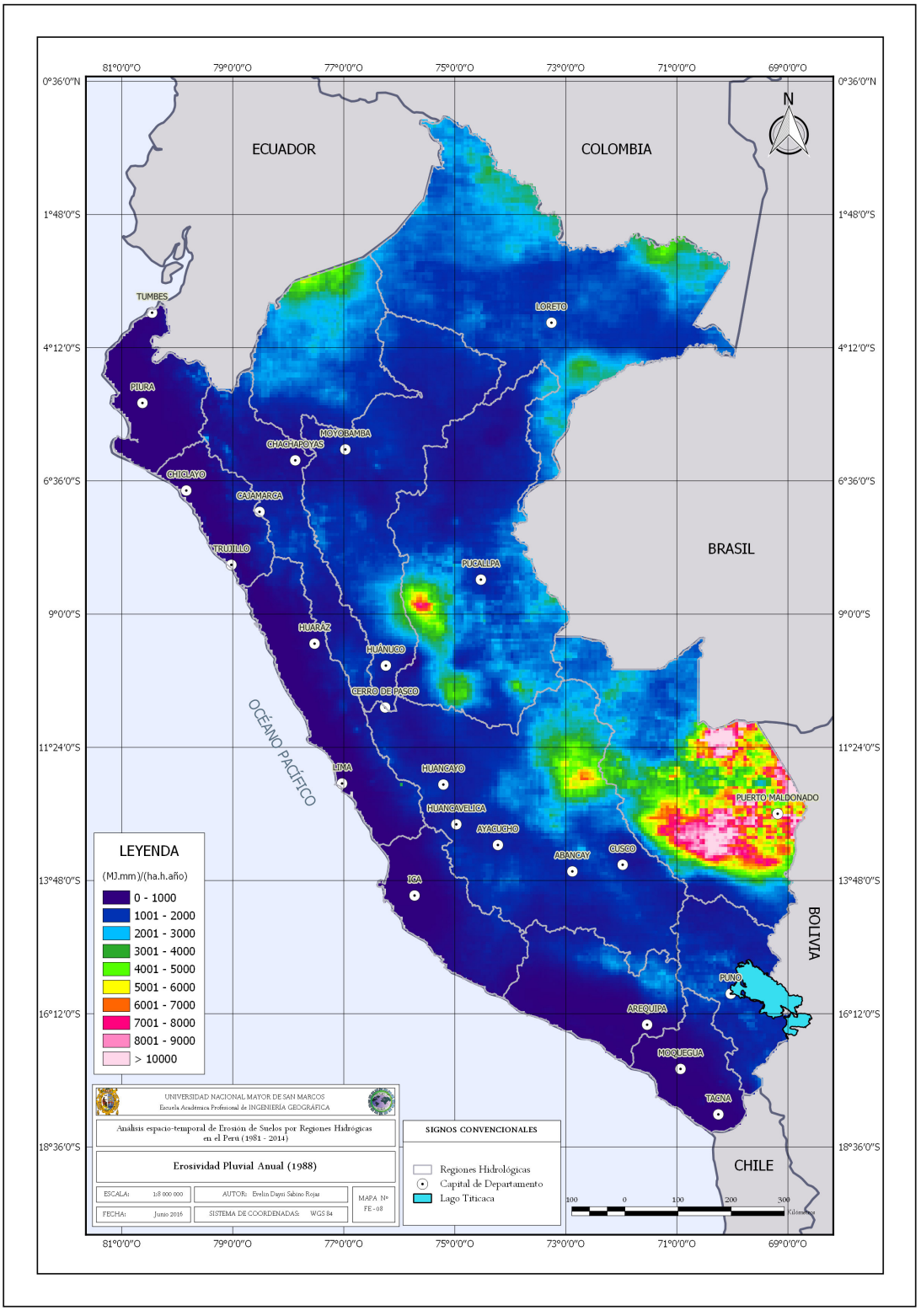


Figura 10.8: Erosión Pluvial Anual (1988)

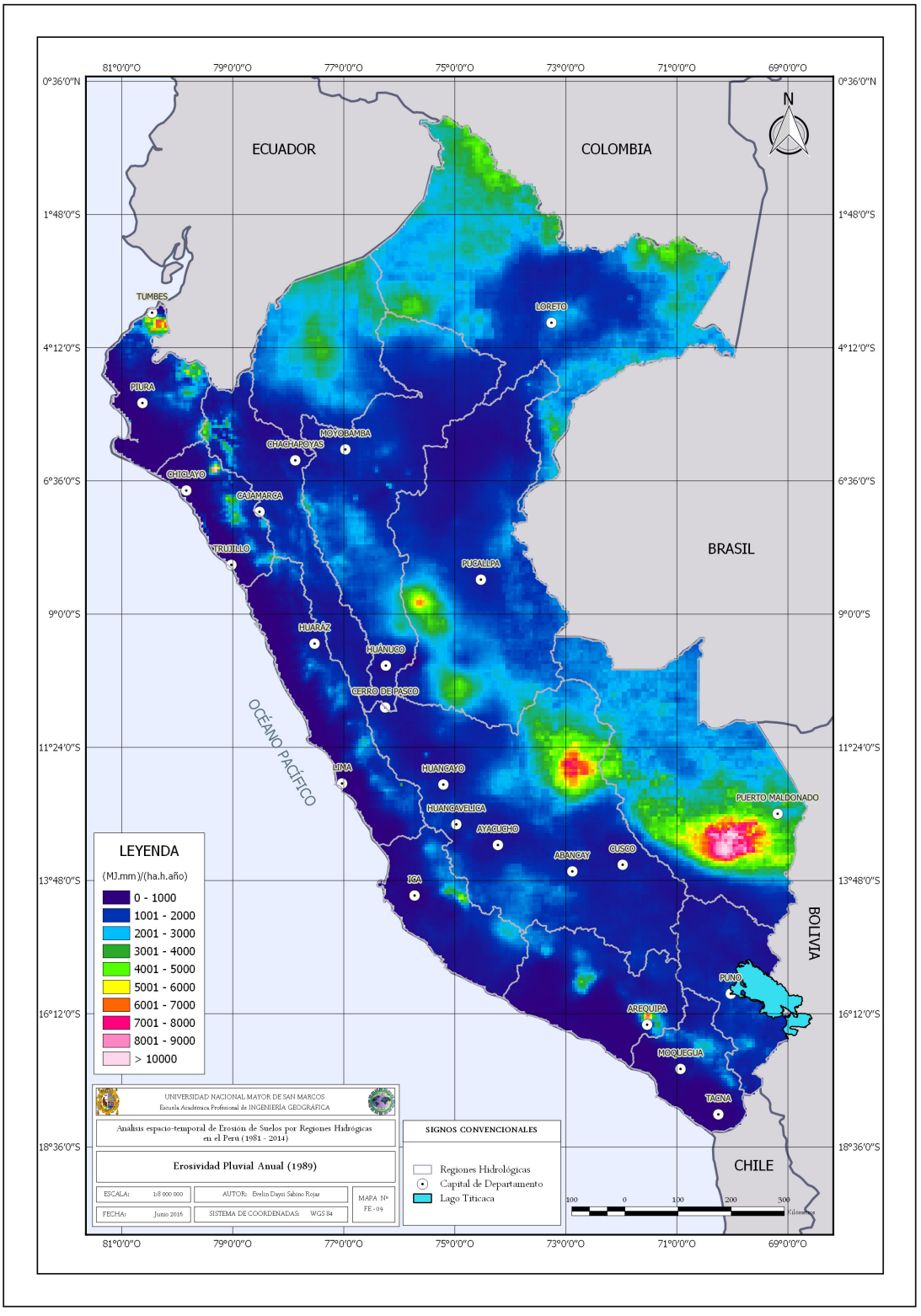


Figura 10.9: Erosión Pluvial Anual (1989)

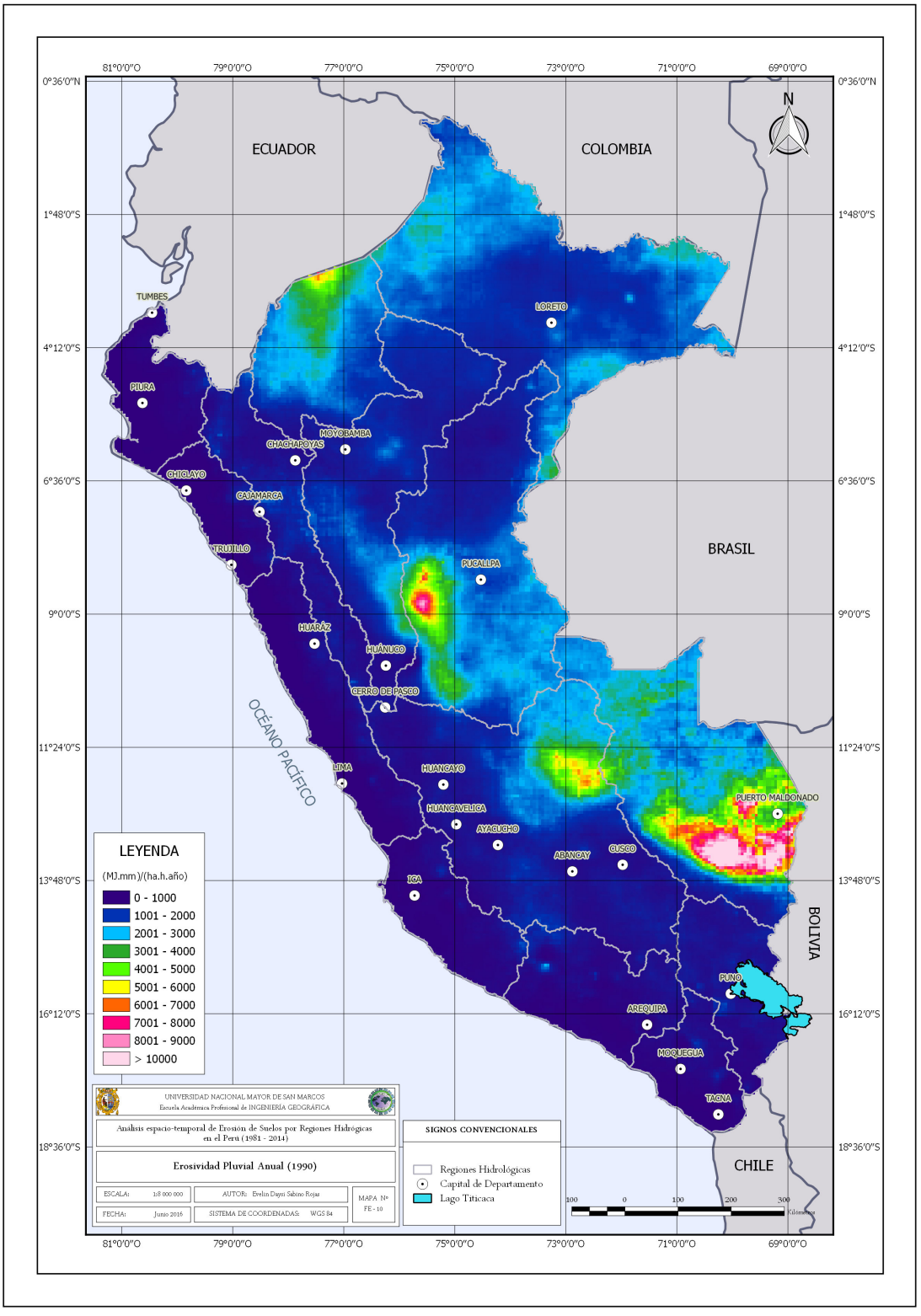


Figura 10.10: . Erosión Pluvial Anual (1990)

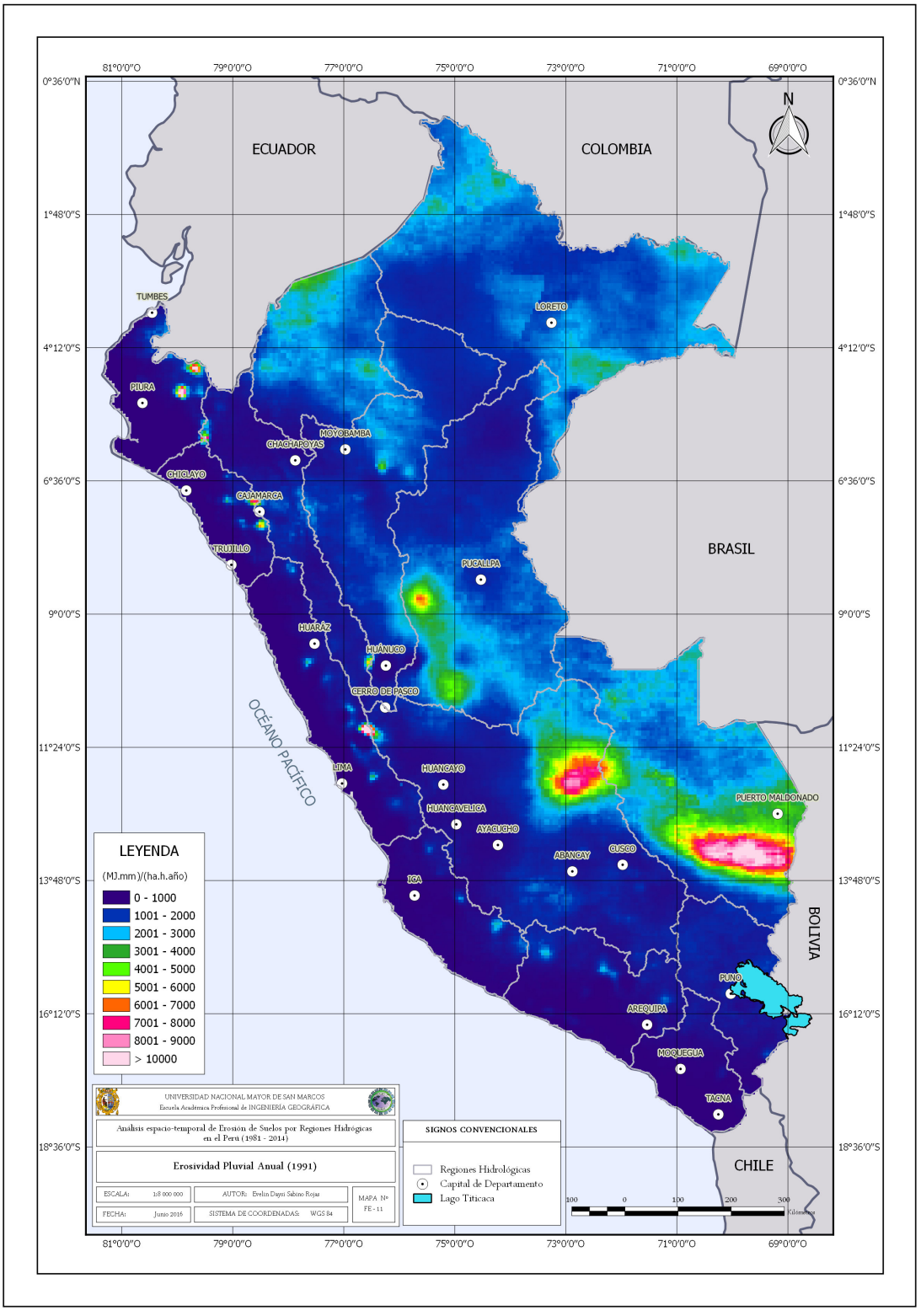


Figura 10.11: . Erosión Pluvial Anual (1991)

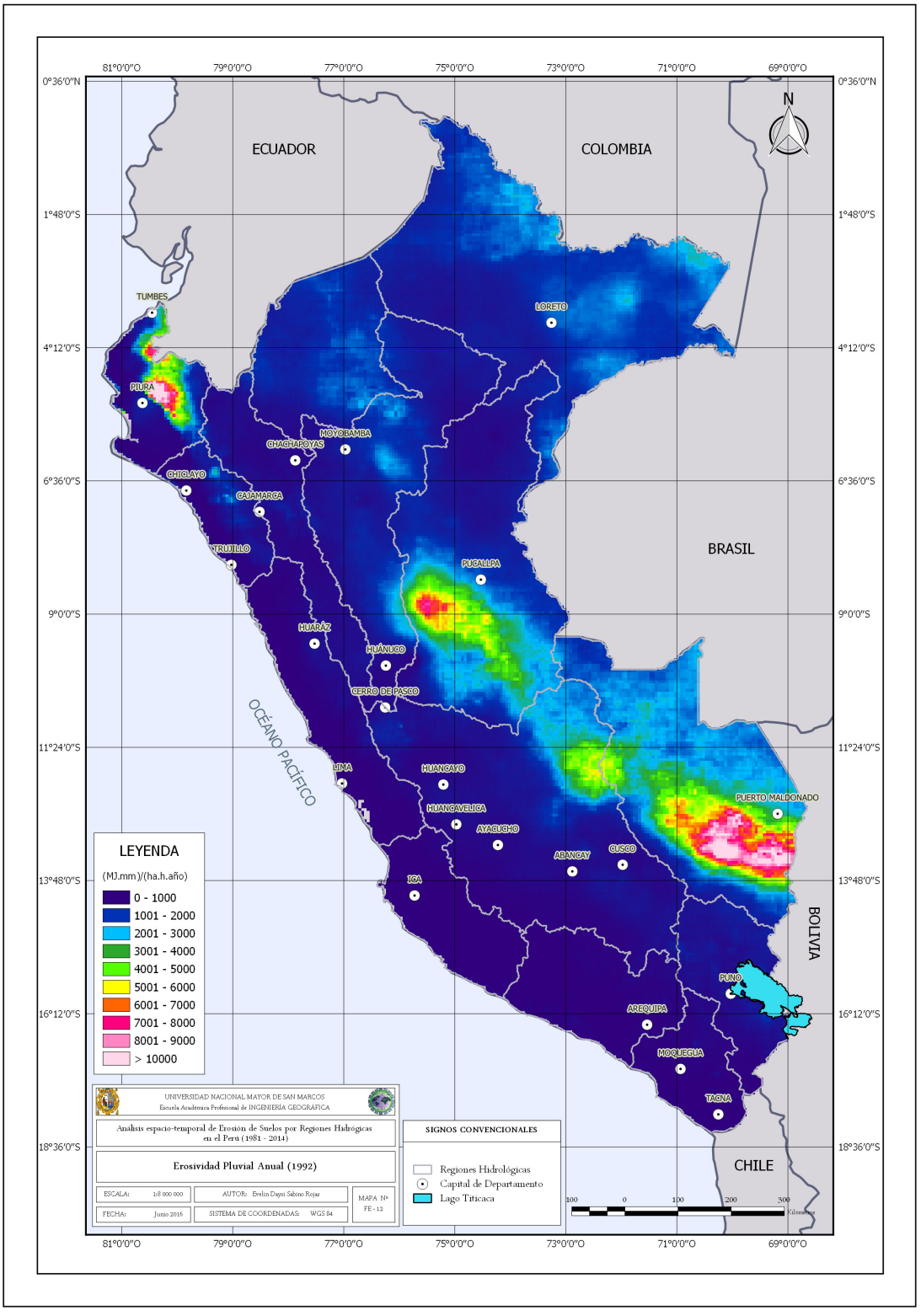


Figura 10.12: . Erosión Pluvial Anual (1992)

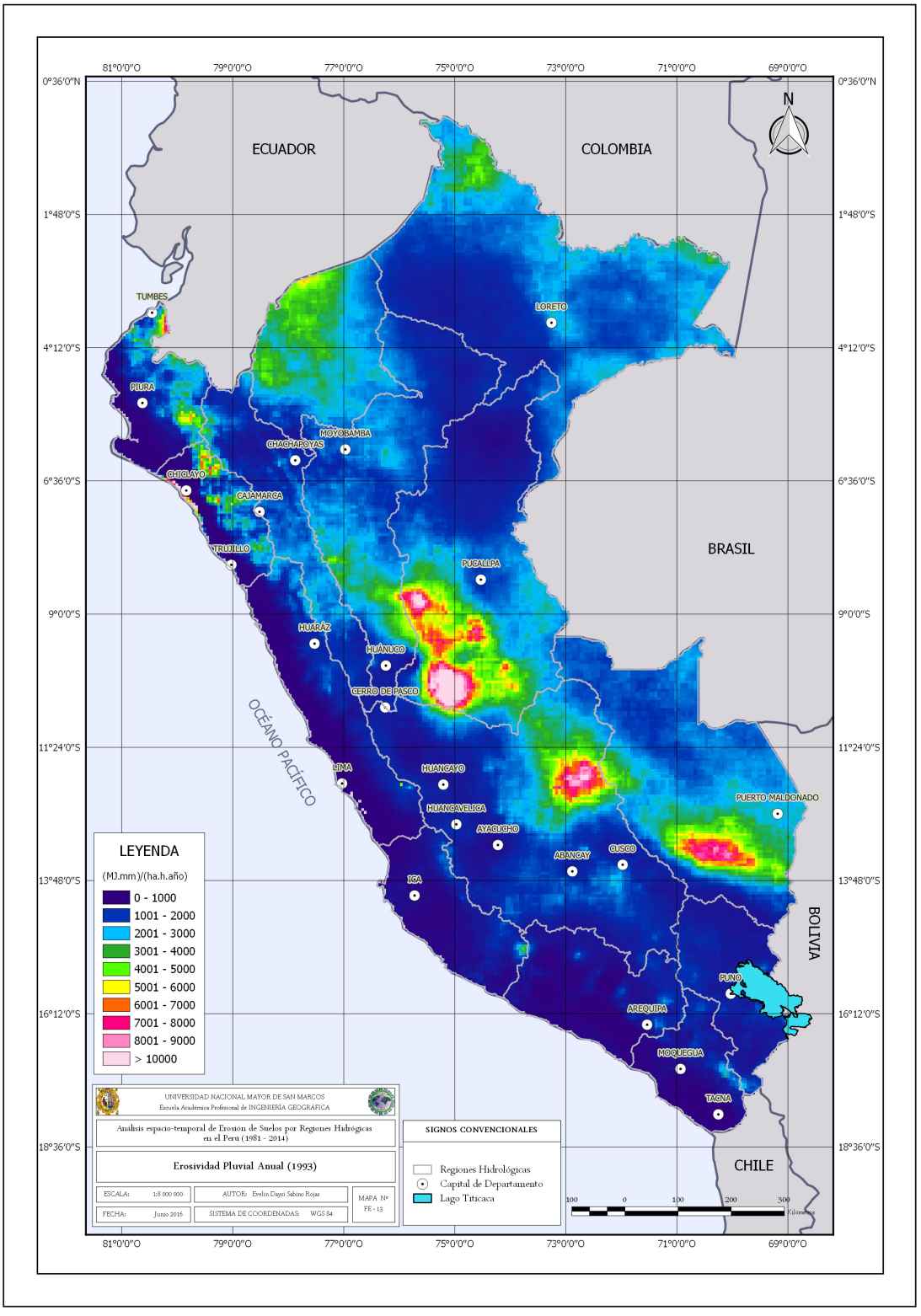


Figura 10.13: . Erosión Pluvial Anual (1993)

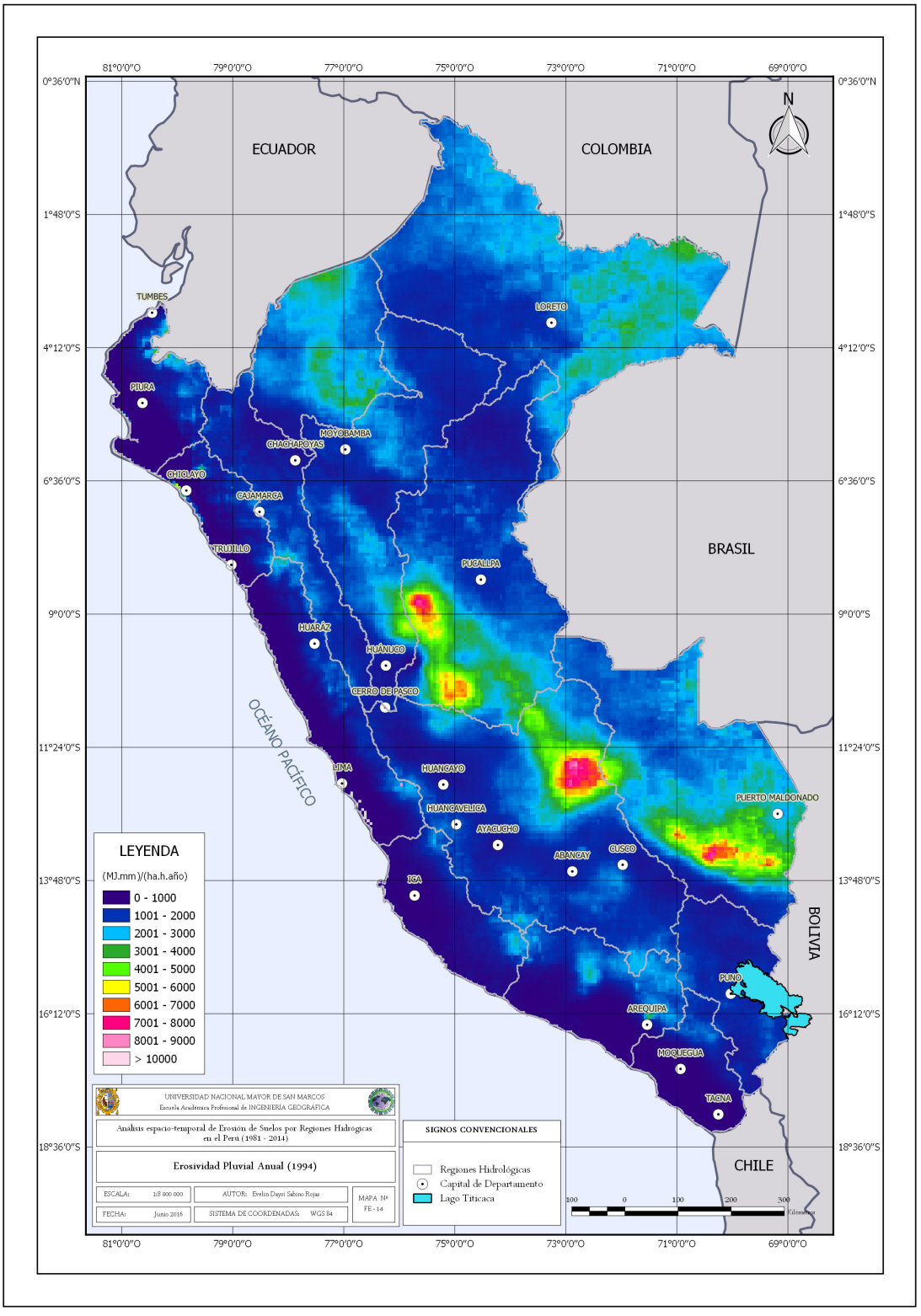


Figura 10.14: . Erosión Pluvial Anual (1994)

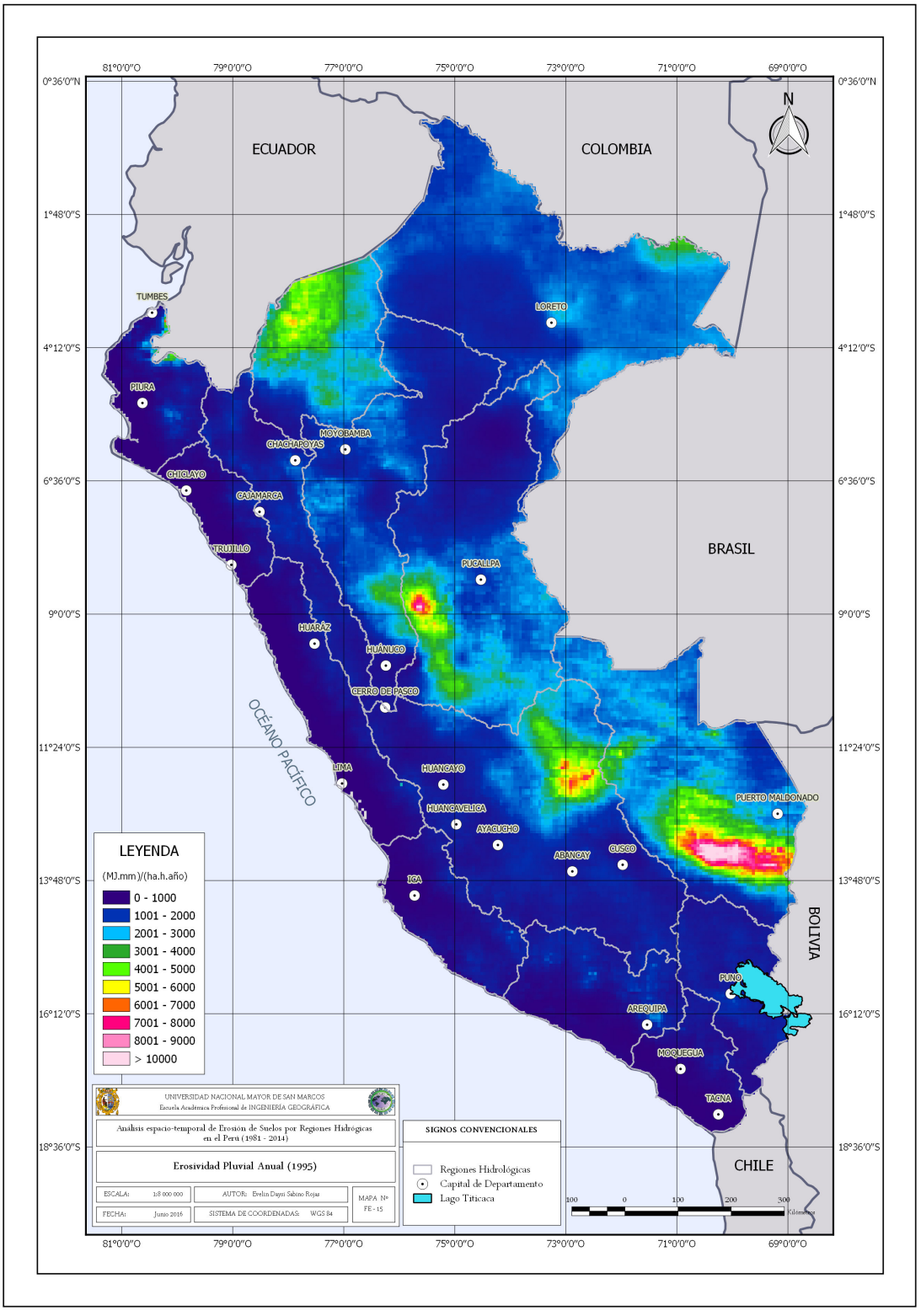


Figura 10.15: . Erosión Pluvial Anual (1995)

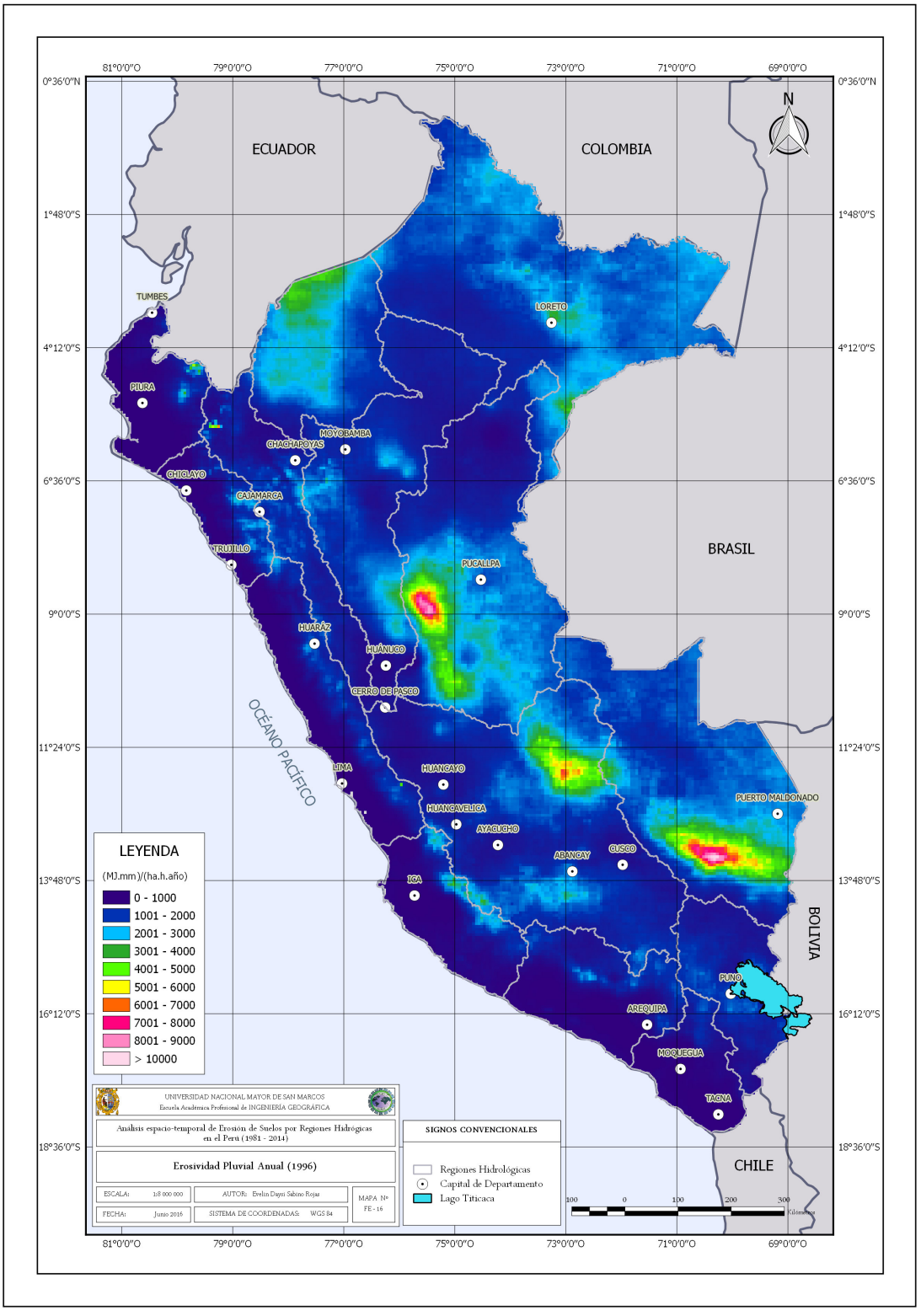


Figura 10.16: . Erosión Pluvial Anual (1996)

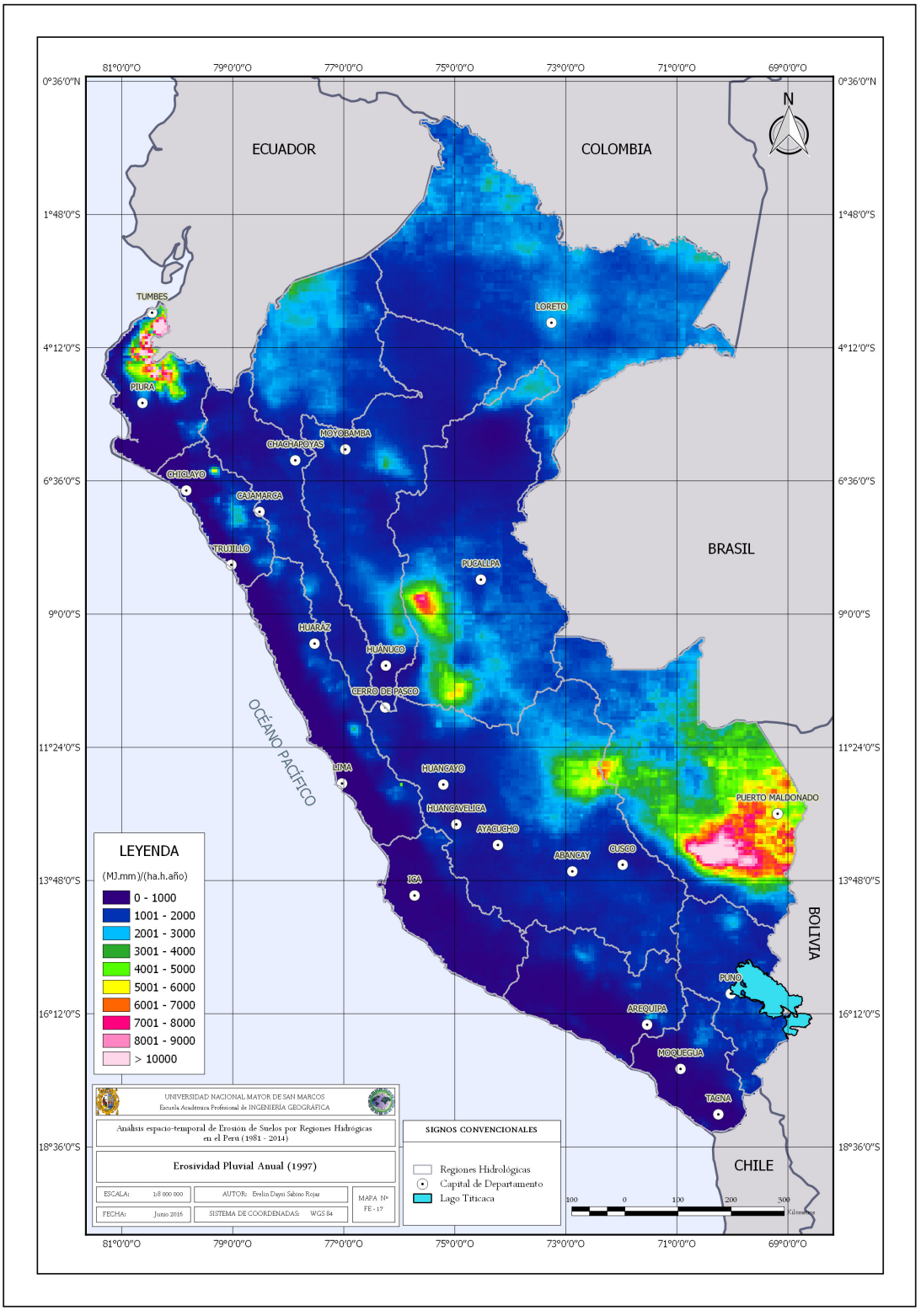


Figura 10.17: . Erosión Pluvial Anual (1997)

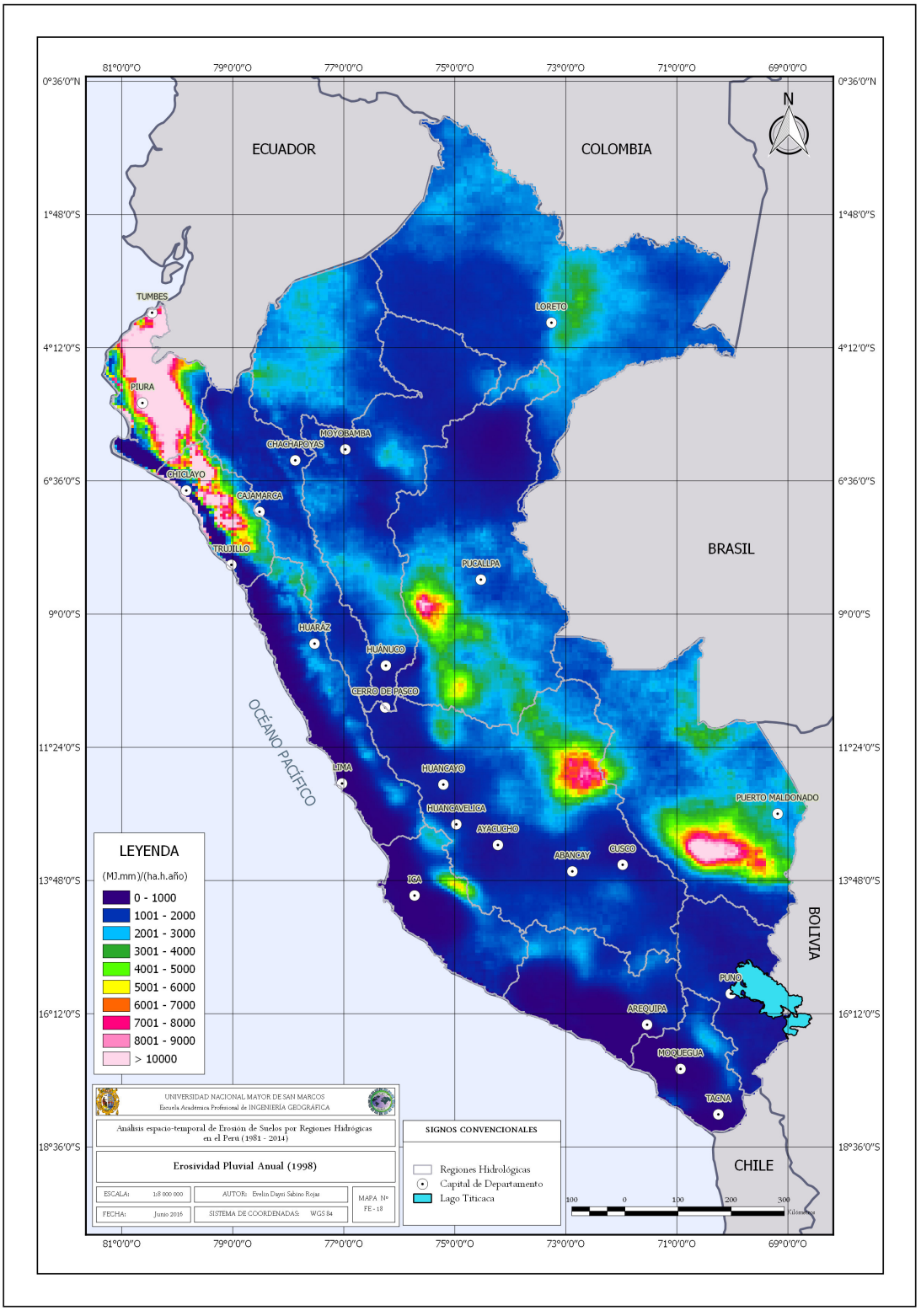


Figura 10.18: . Erosión Pluvial Anual (1998)

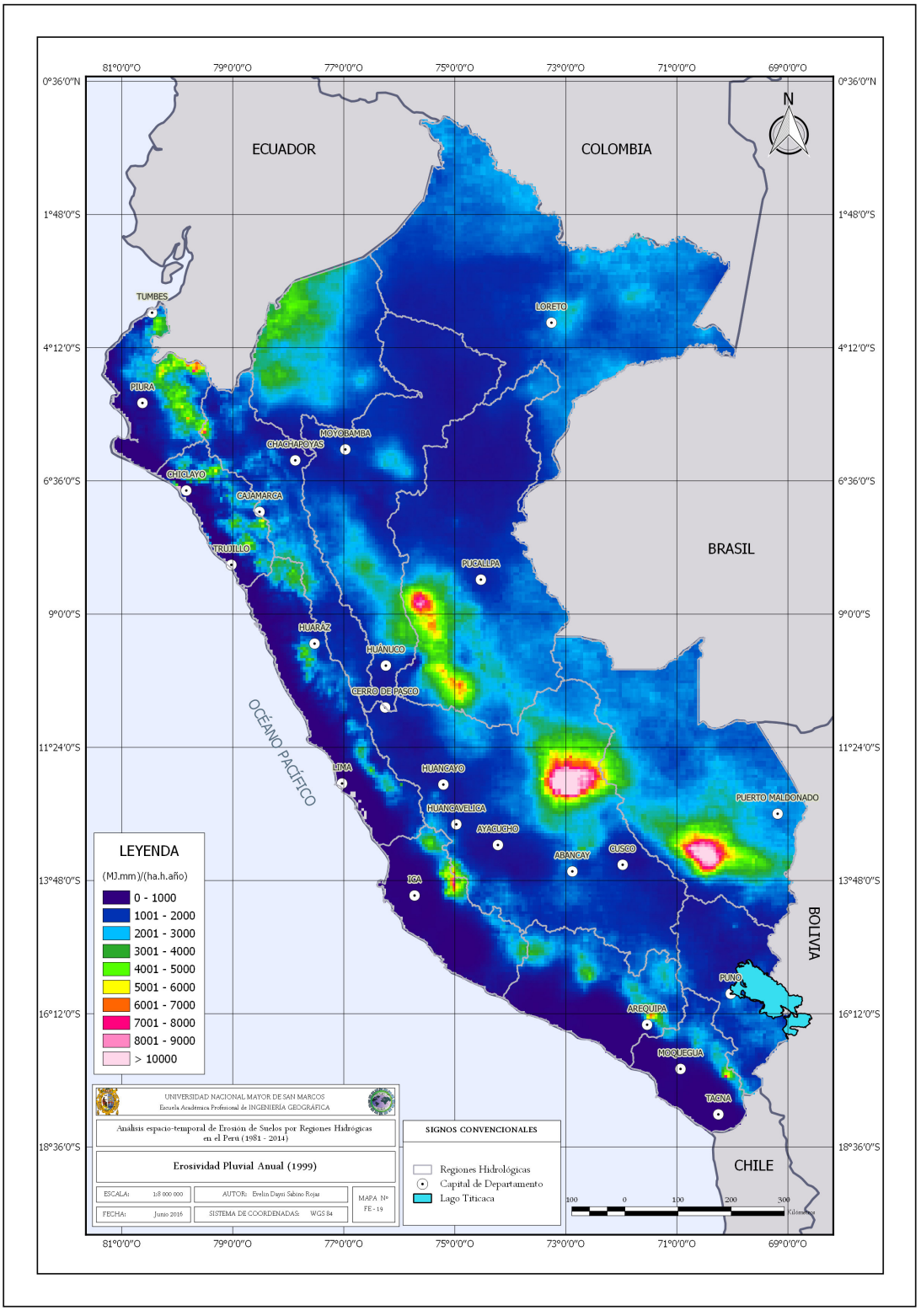


Figura 10.19: . Erosión Pluvial Anual (1999)

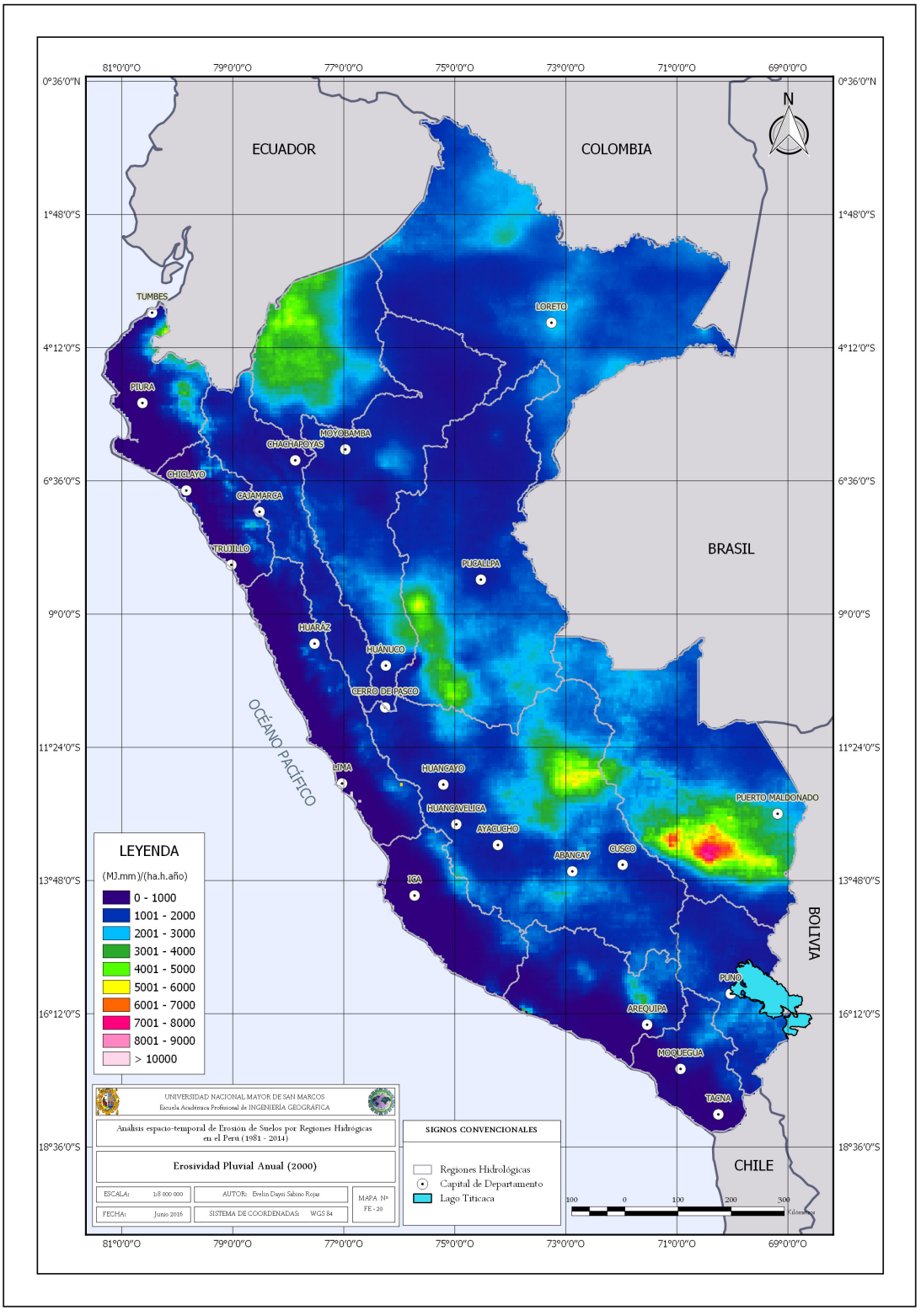


Figura 10.20: . Erosión Pluvial Anual (2000)

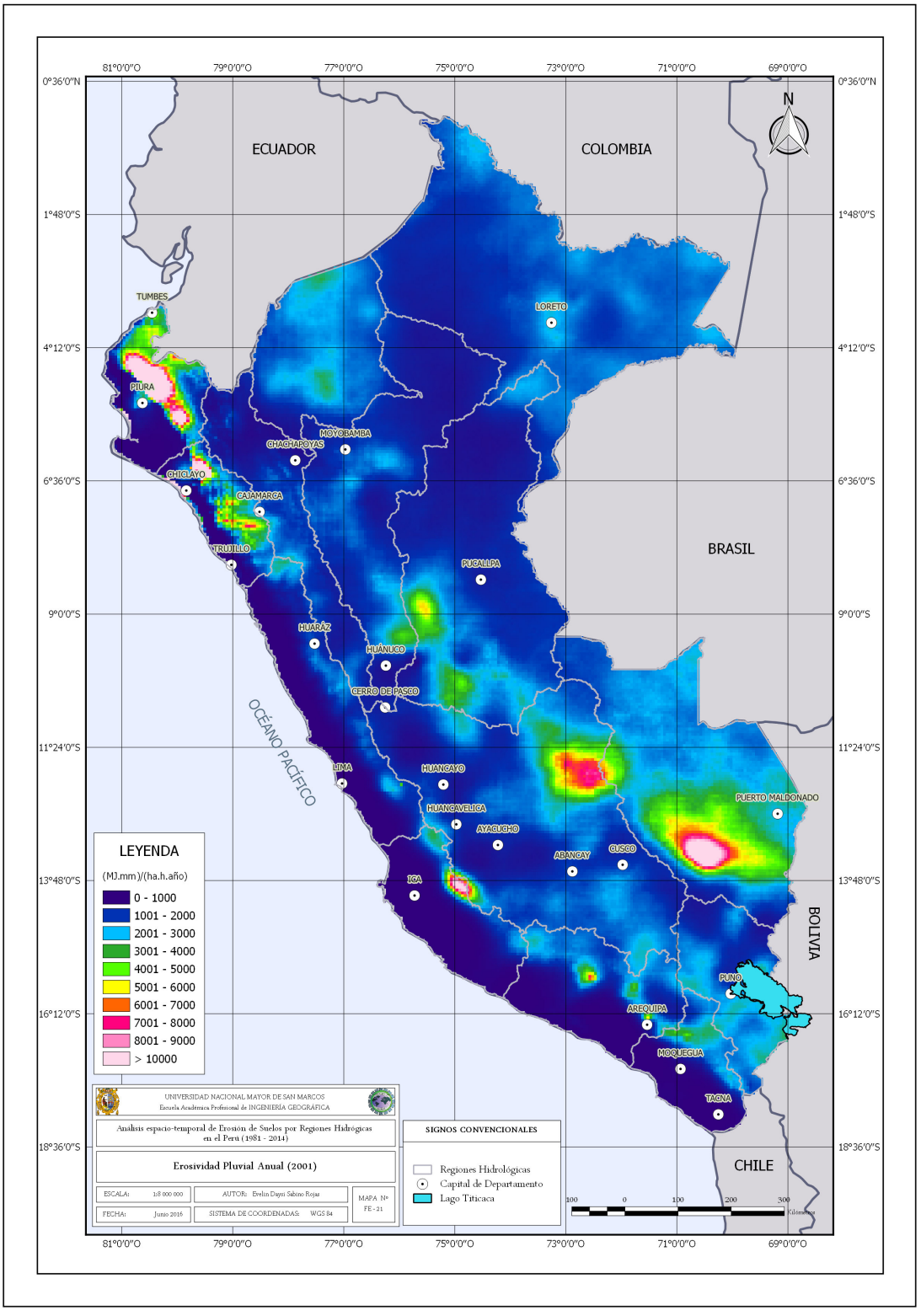


Figura 10.21: . Erosión Pluvial Anual (2001)

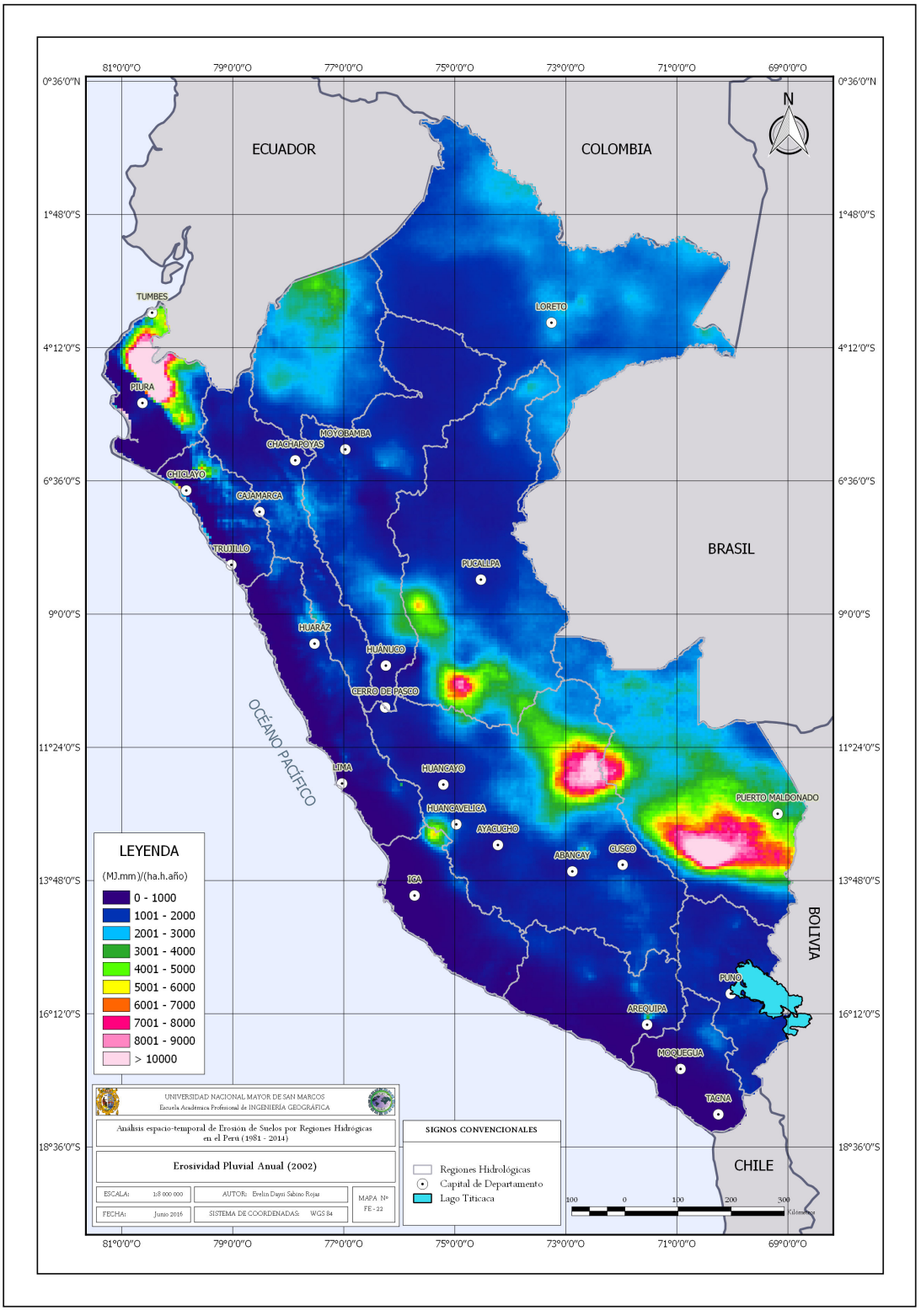


Figura 10.22: . Erosión Pluvial Anual (2002)

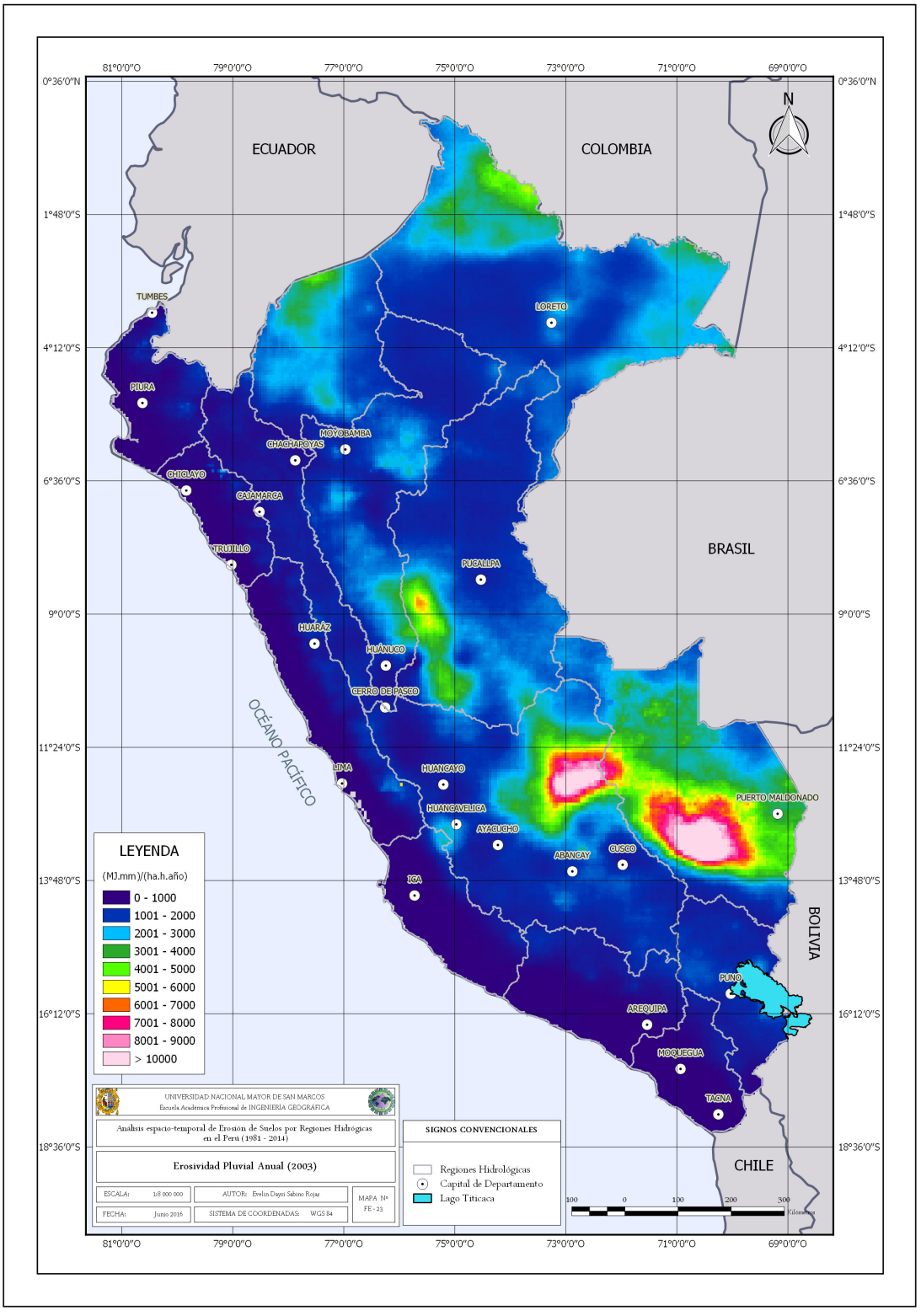


Figura 10.23: . Erosión Pluvial Anual (2003)

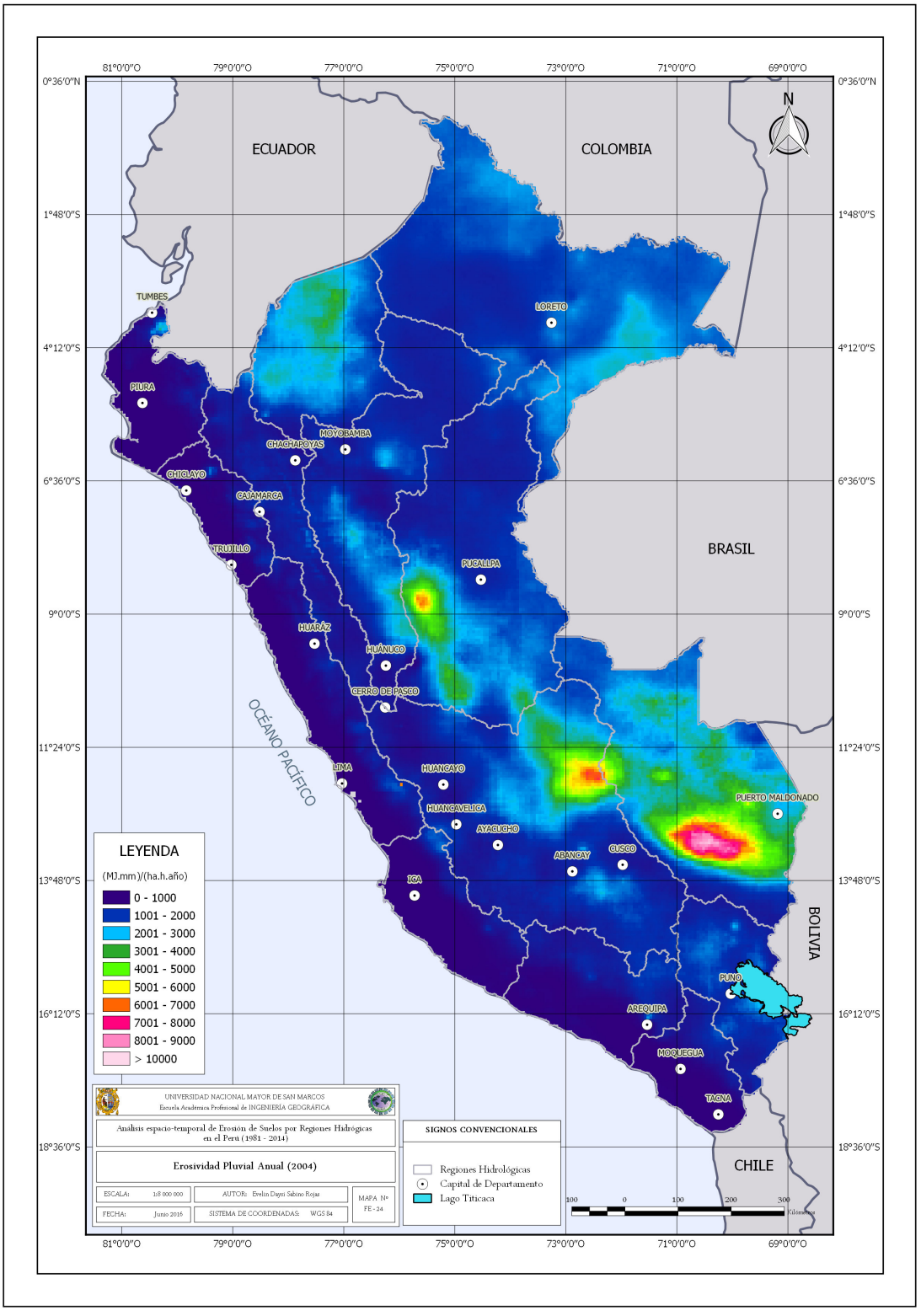


Figura 10.24: . Erosión Pluvial Anual (2004)

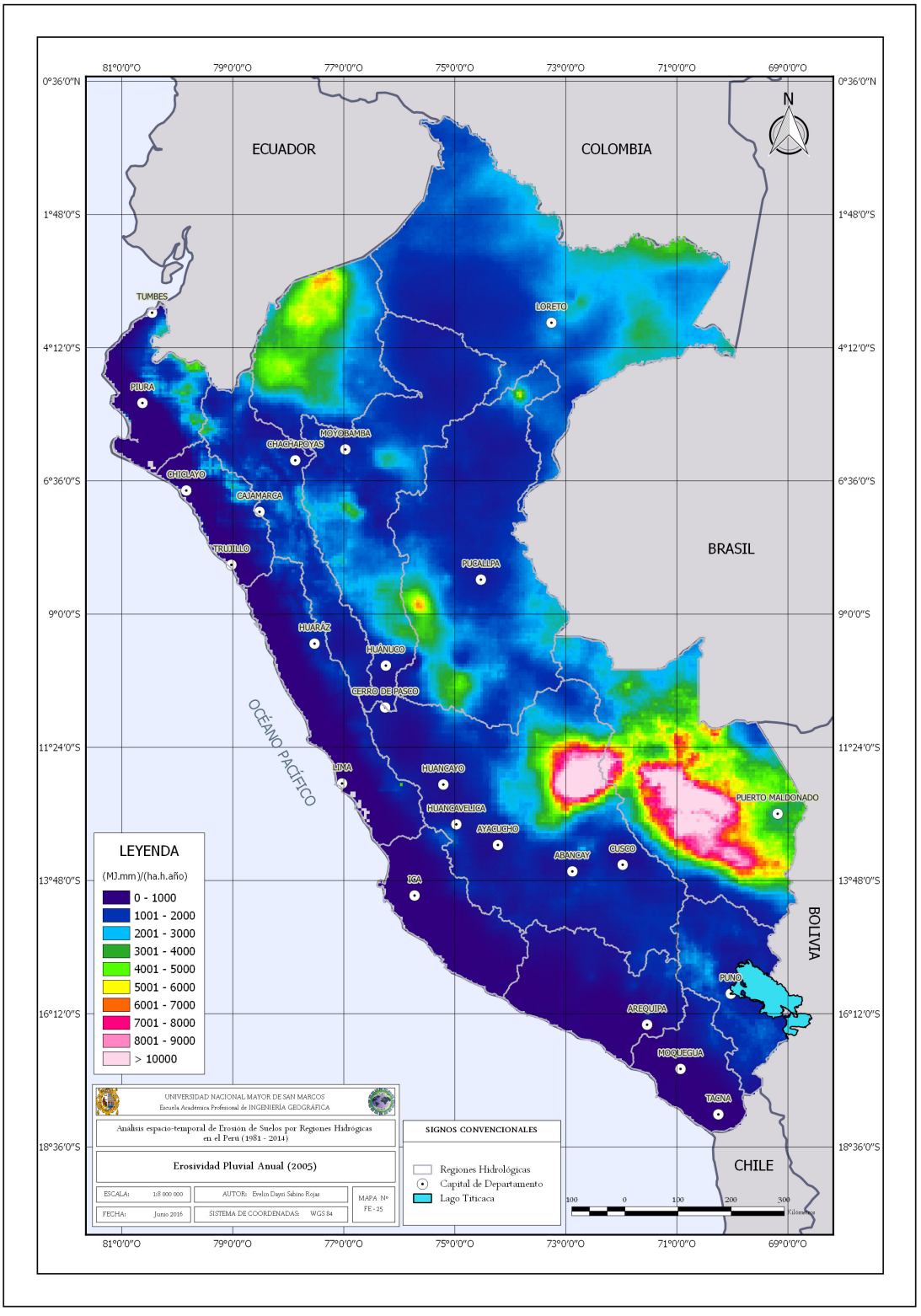


Figura 10.25: . Erosión Pluvial Anual (2005)

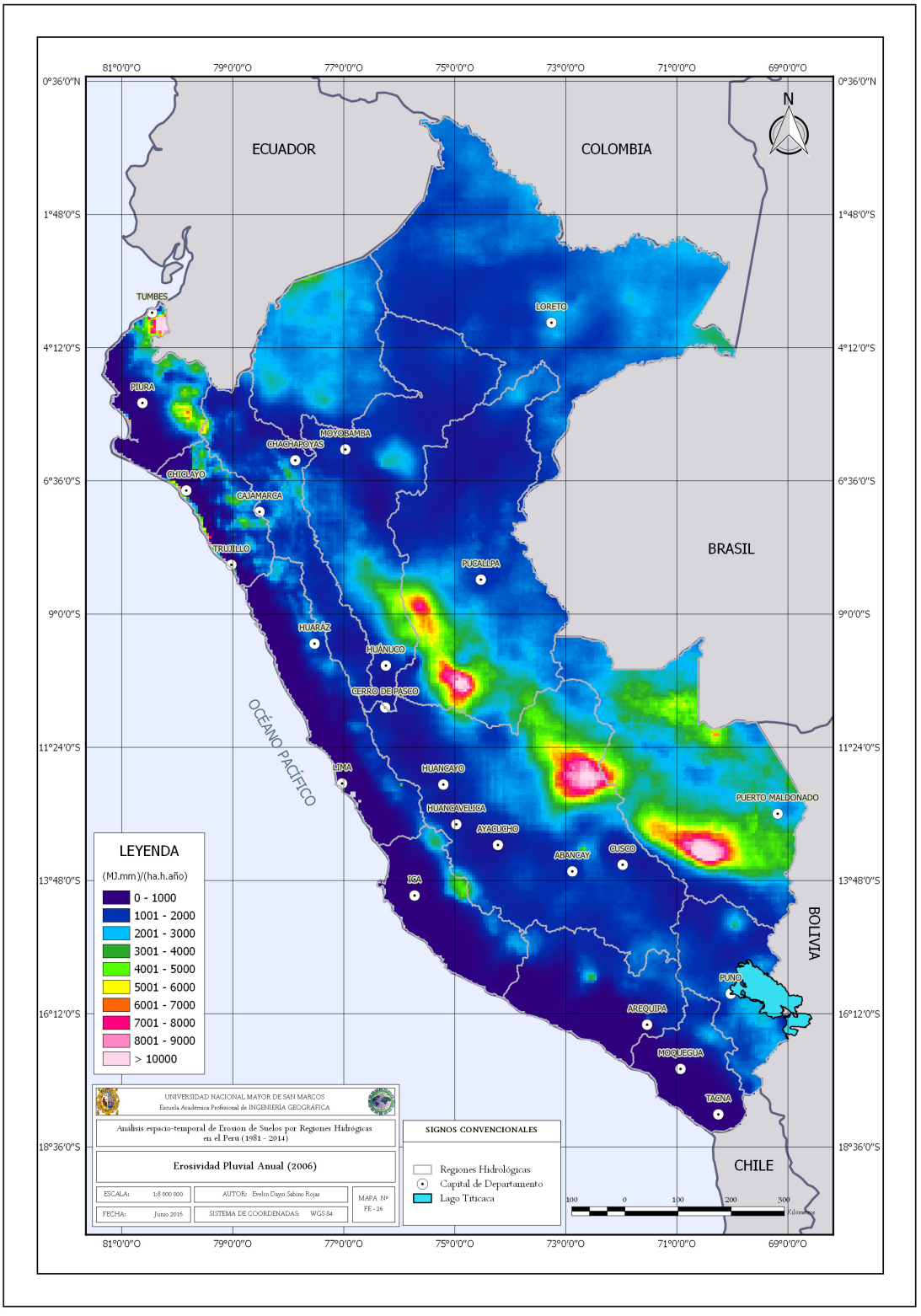


Figura 10.26: . Erosión Pluvial Anual (2006)

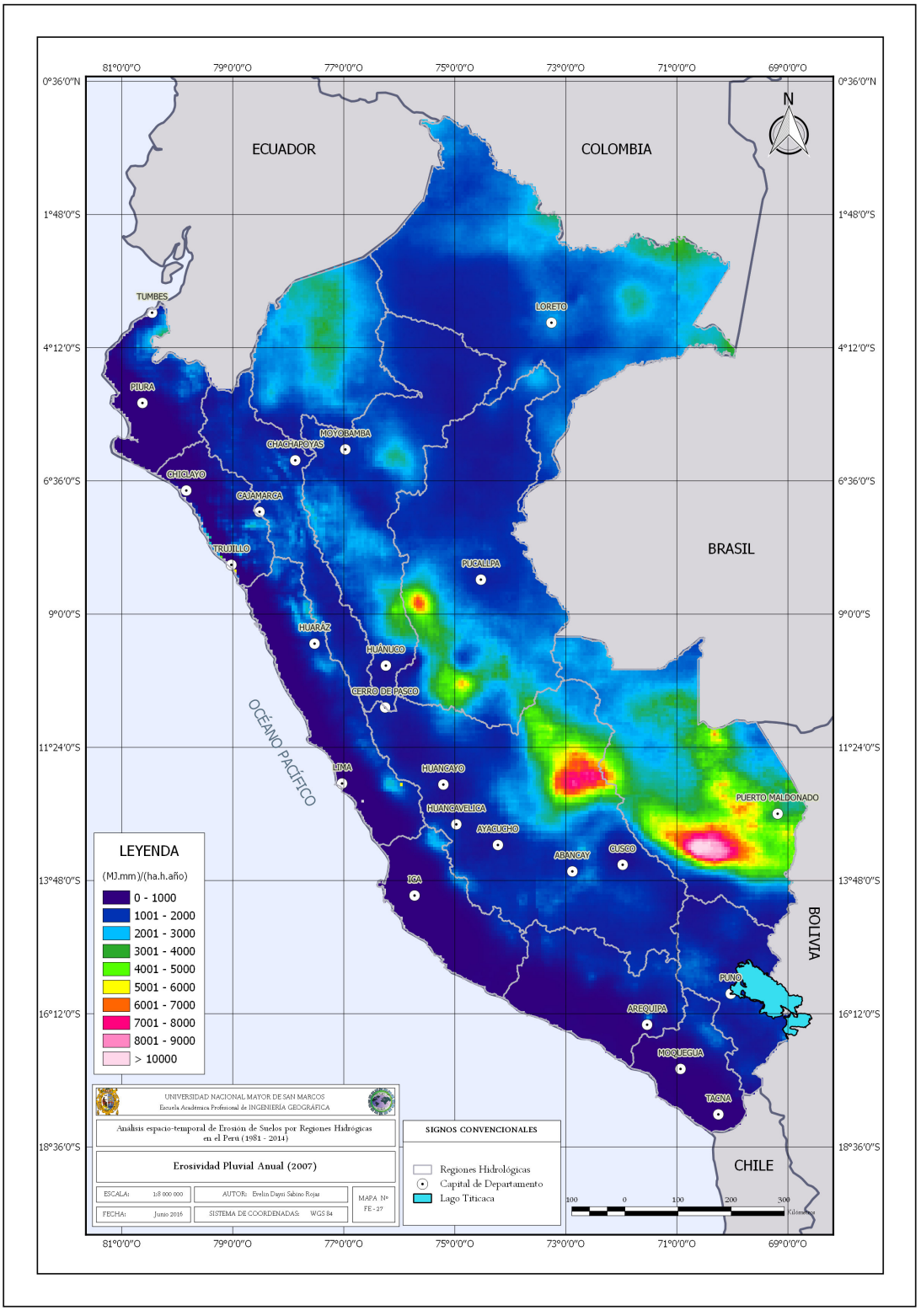


Figura 10.27: . Erosión Pluvial Anual (2007)

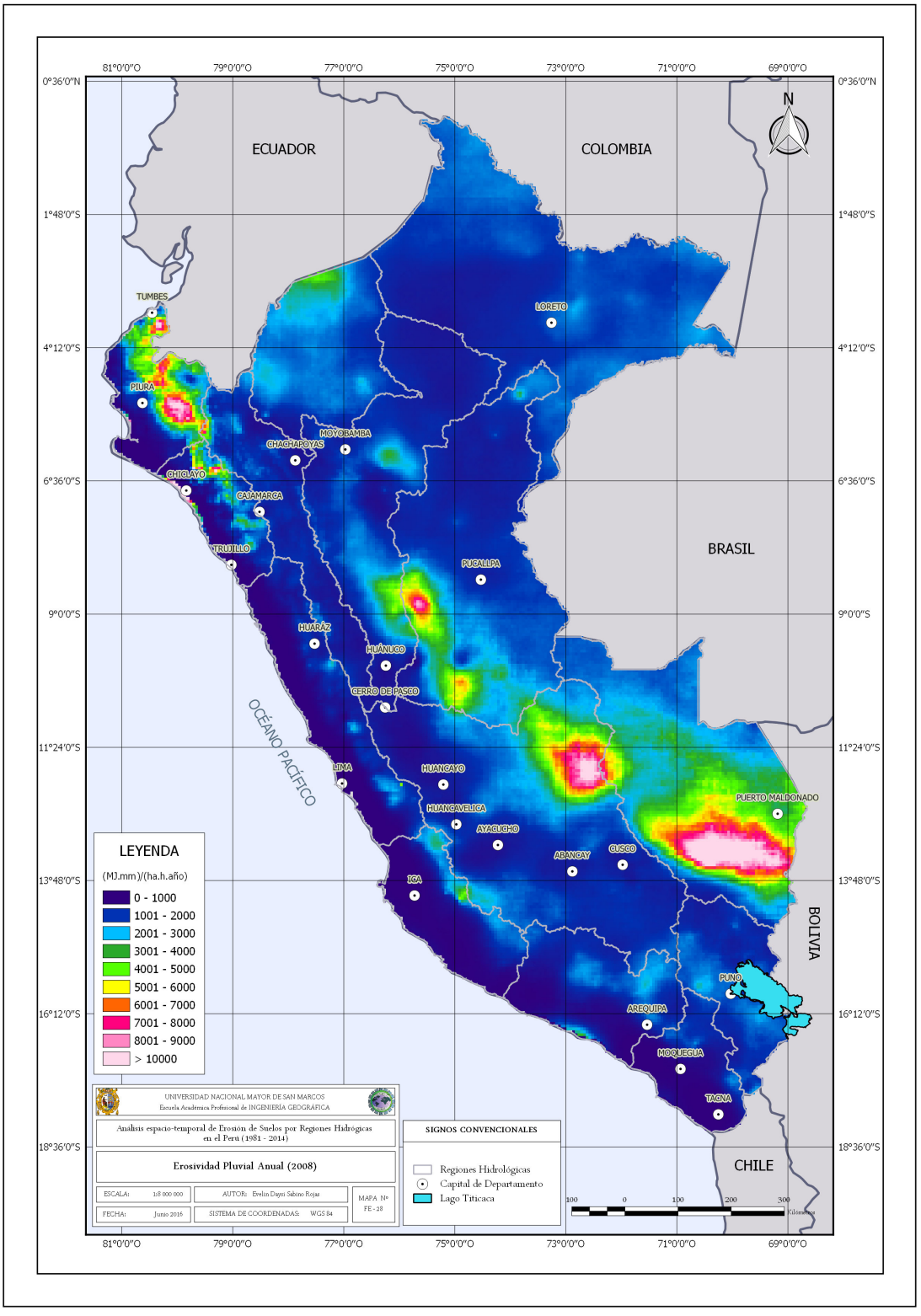


Figura 10.28: . Erosión Pluvial Anual (2008)

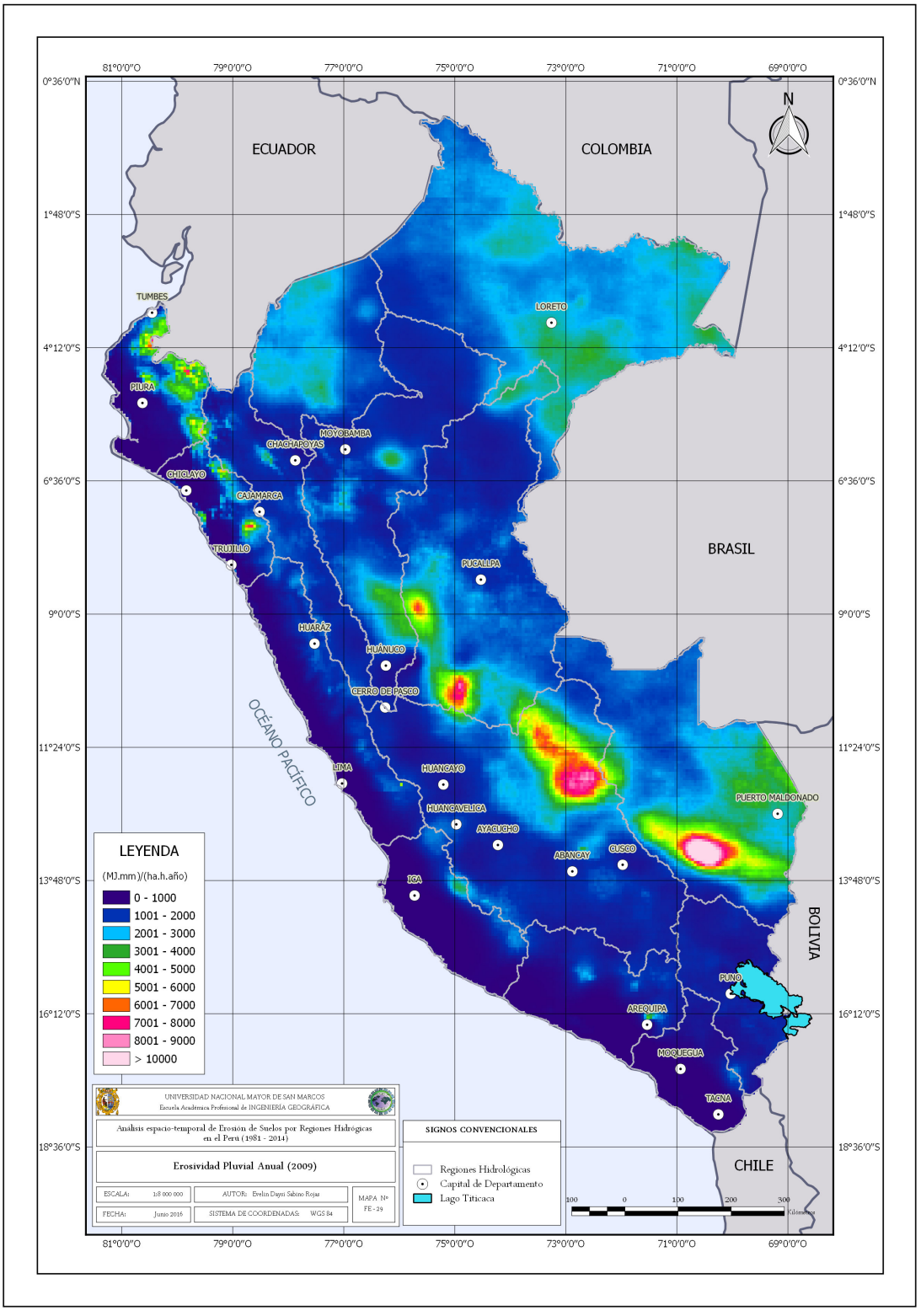


Figura 10.29: . Erosión Pluvial Anual (2009)

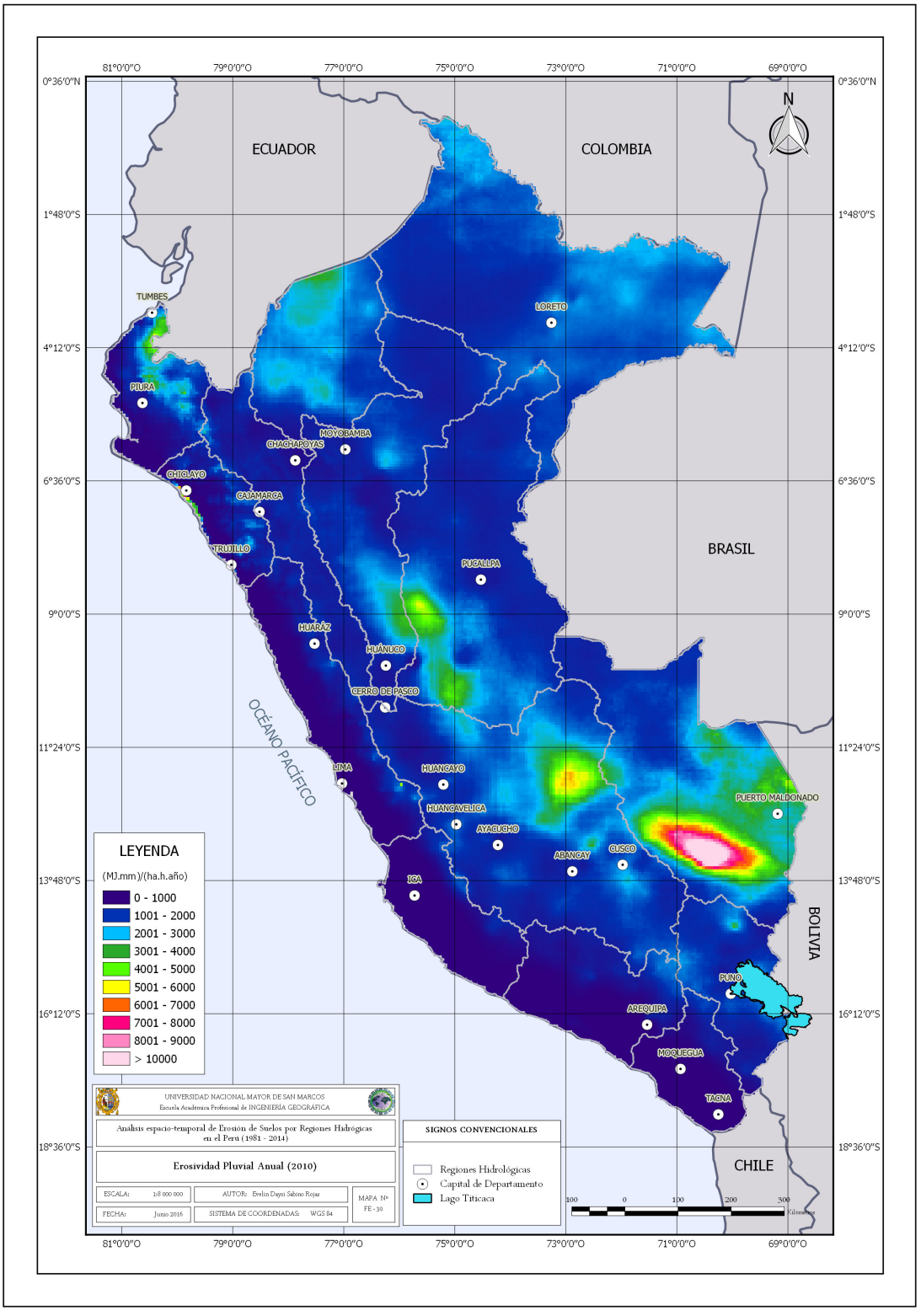


Figura 10.30: . Erosión Pluvial Anual (2010)

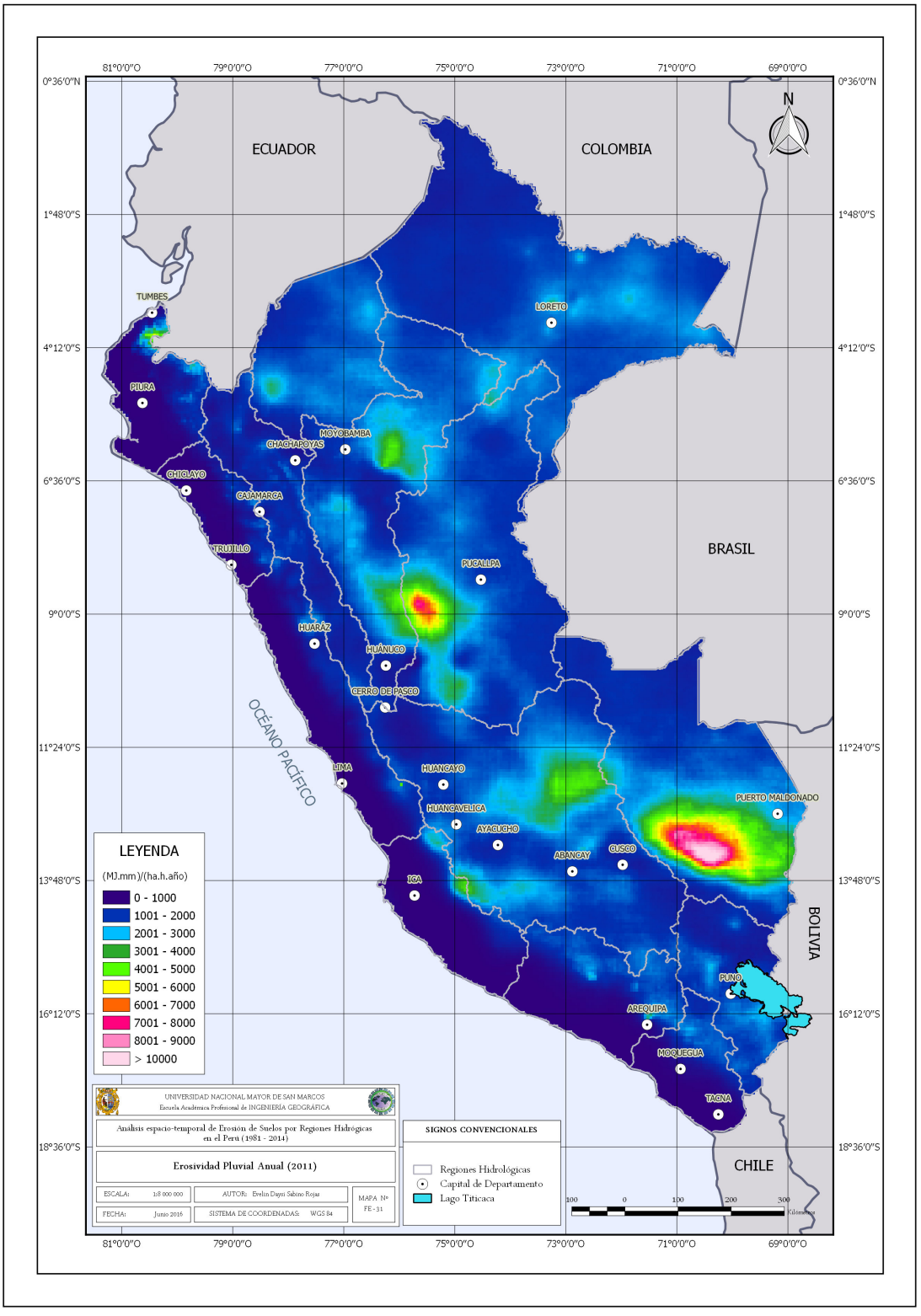


Figura 10.31: . Erosión Pluvial Anual (2011)

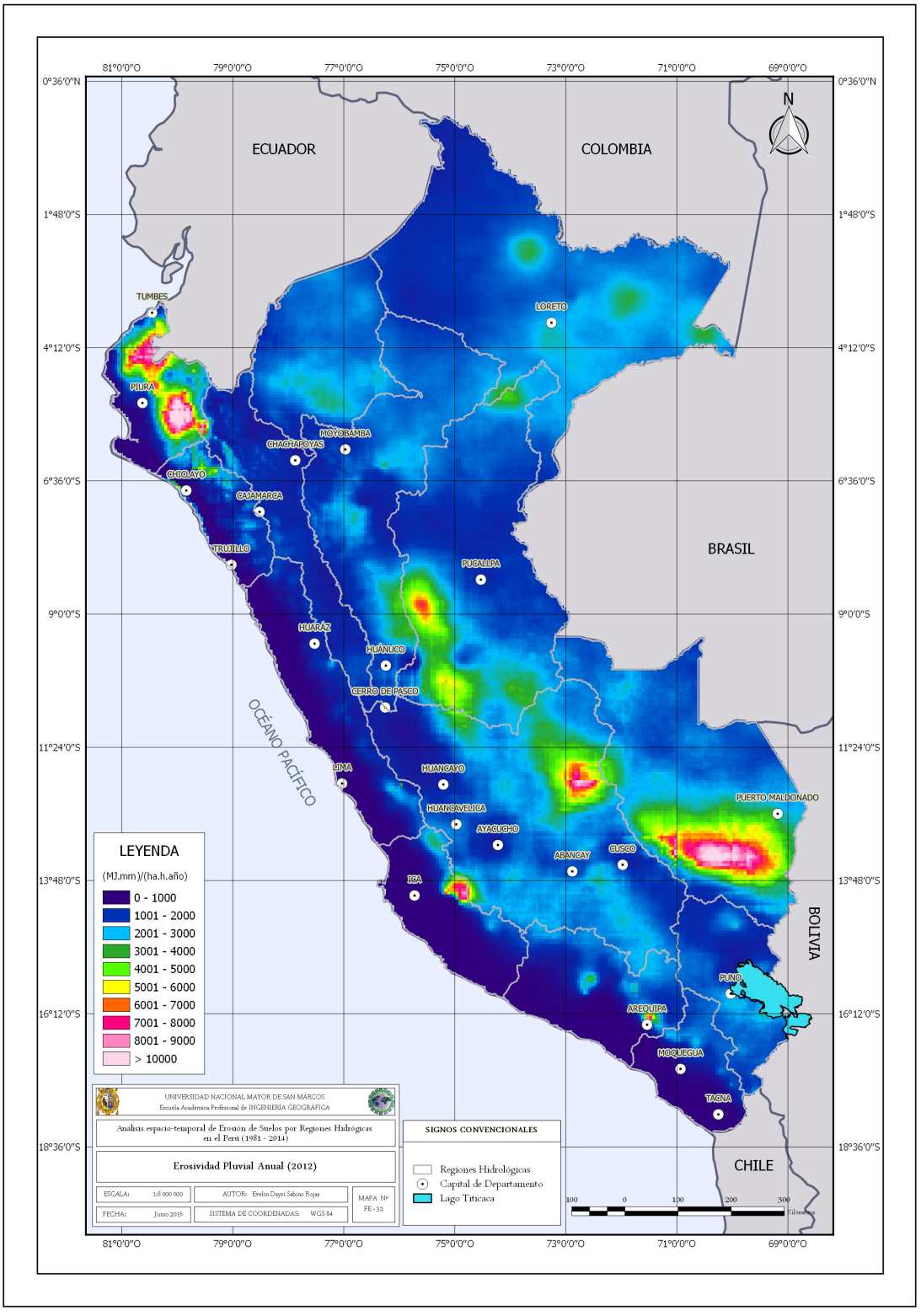


Figura 10.32: . Erosión Pluvial Anual (2012)

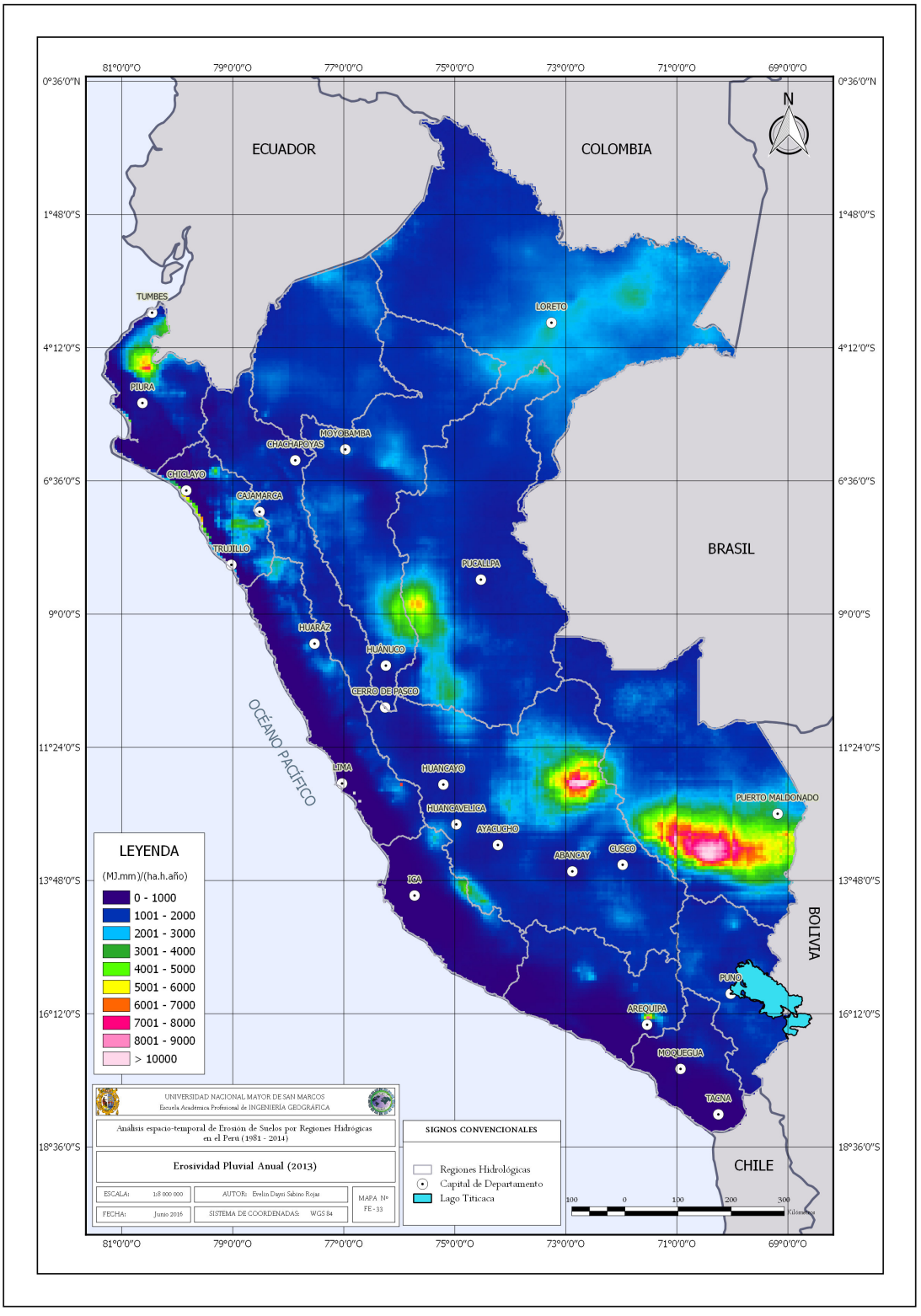


Figura 10.33: . Erosión Pluvial Anual (2013)

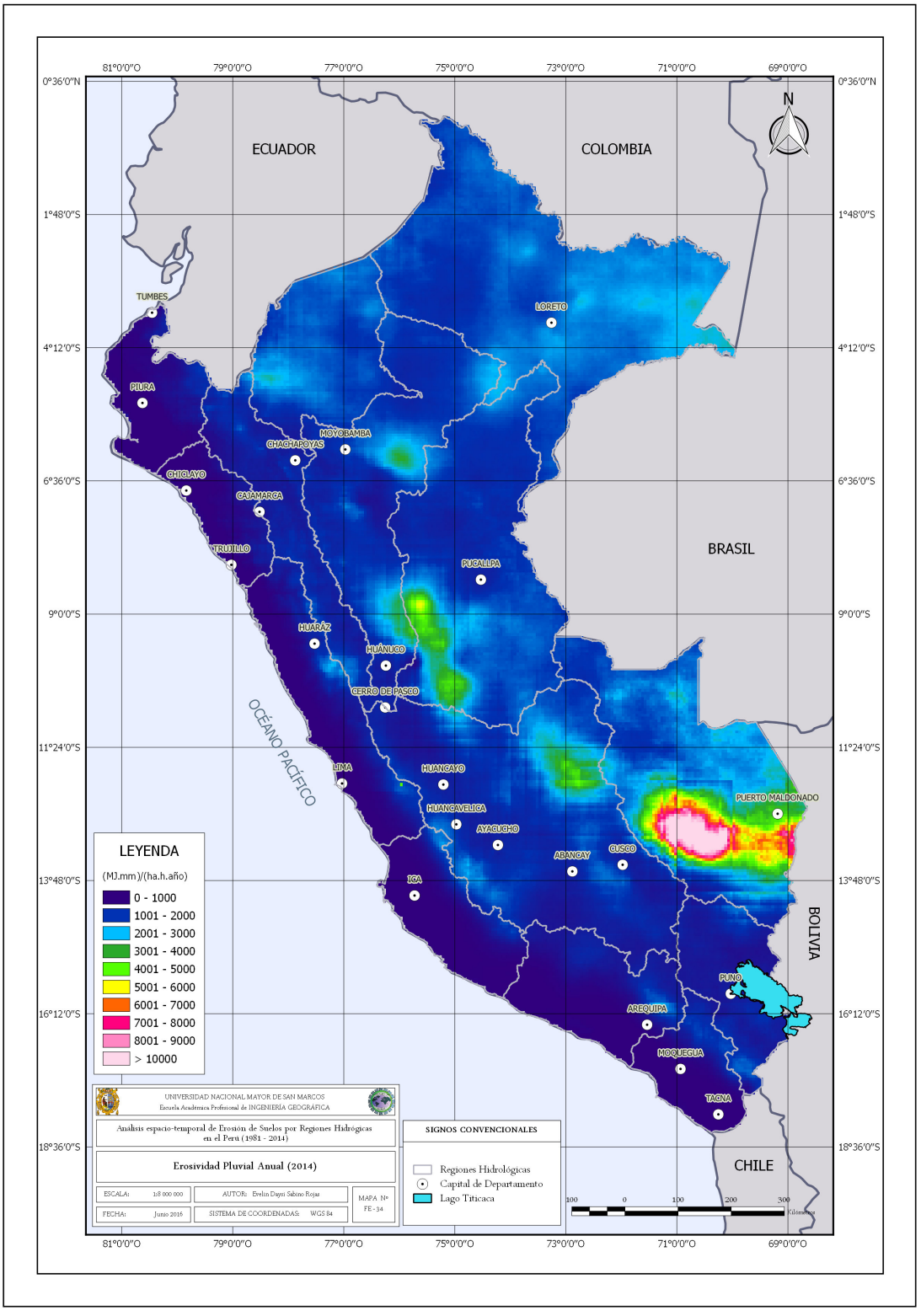


Figura 10.34: . Erosión Pluvial Anual (2014)

Capítulo 11

Apéndice 2

Mapas del Factor de Topográfico, Factor de Erodabilidad, Factor de cobertura Vegetal y Factor de Prácticas de Conservación

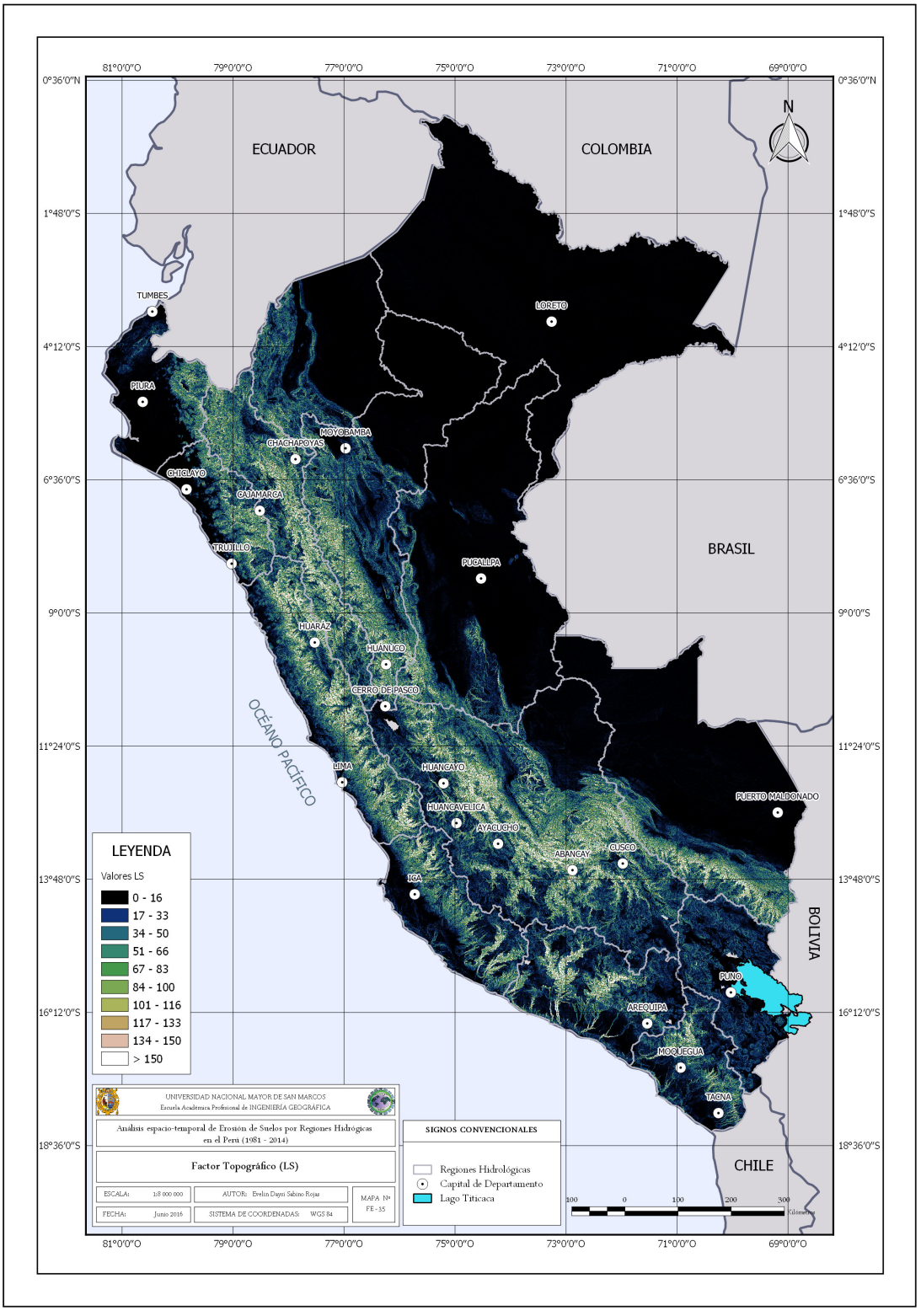


Figura 11.1: . Factor Topográfico (LS)

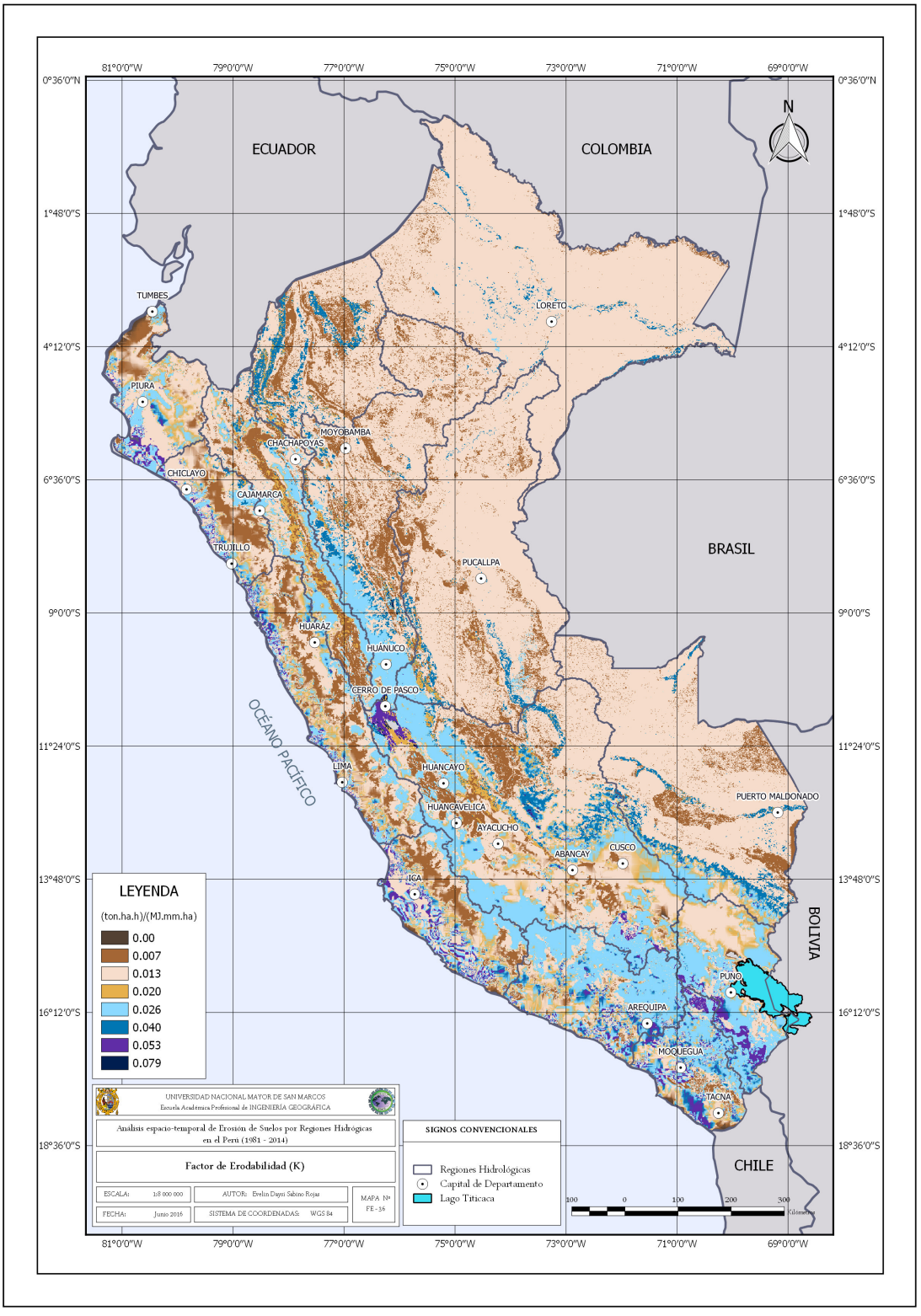


Figura 11.2: . Factor Erodabilidad (K)

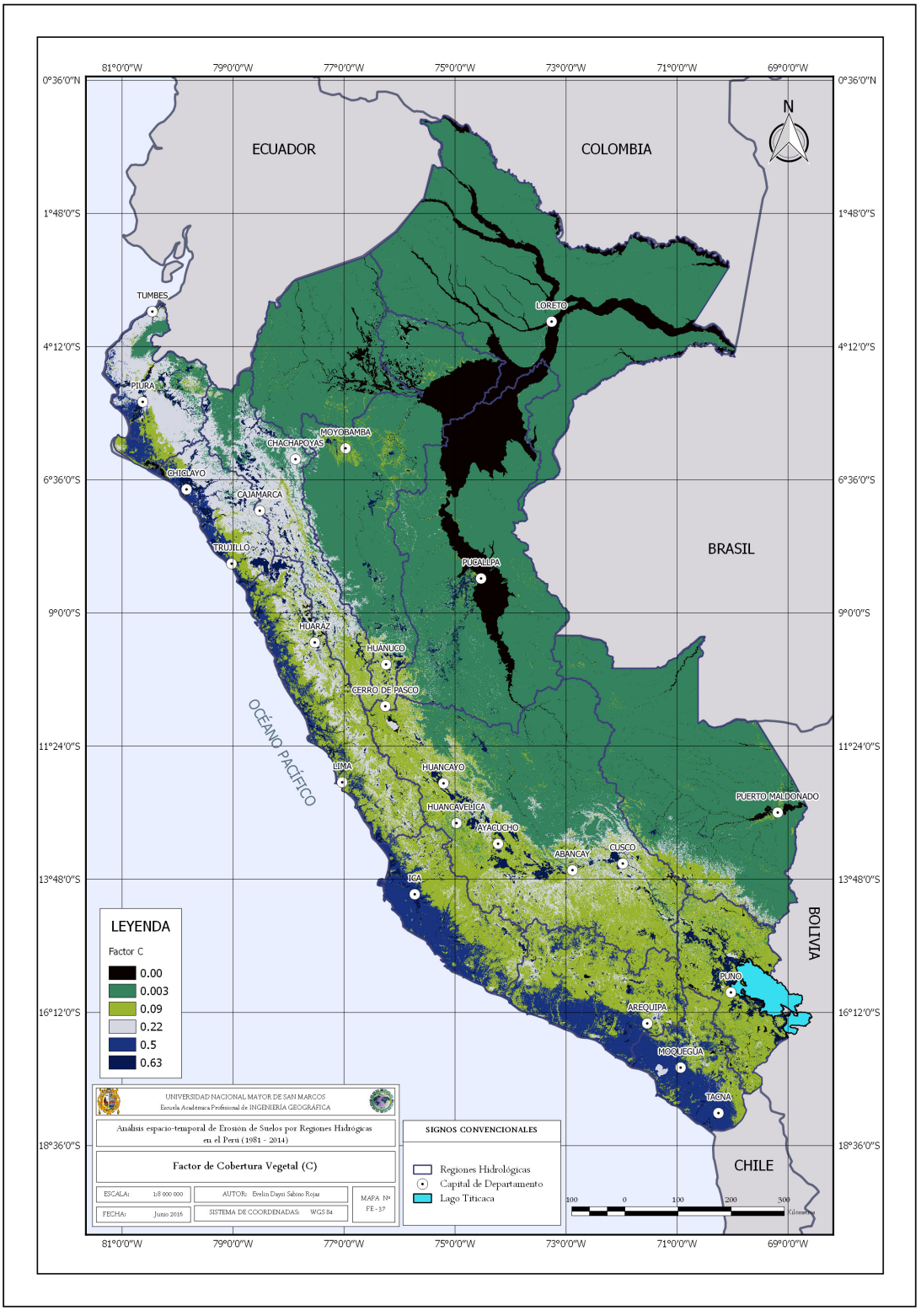


Figura 11.3: . Factor de Cobertura Vegetal (C)

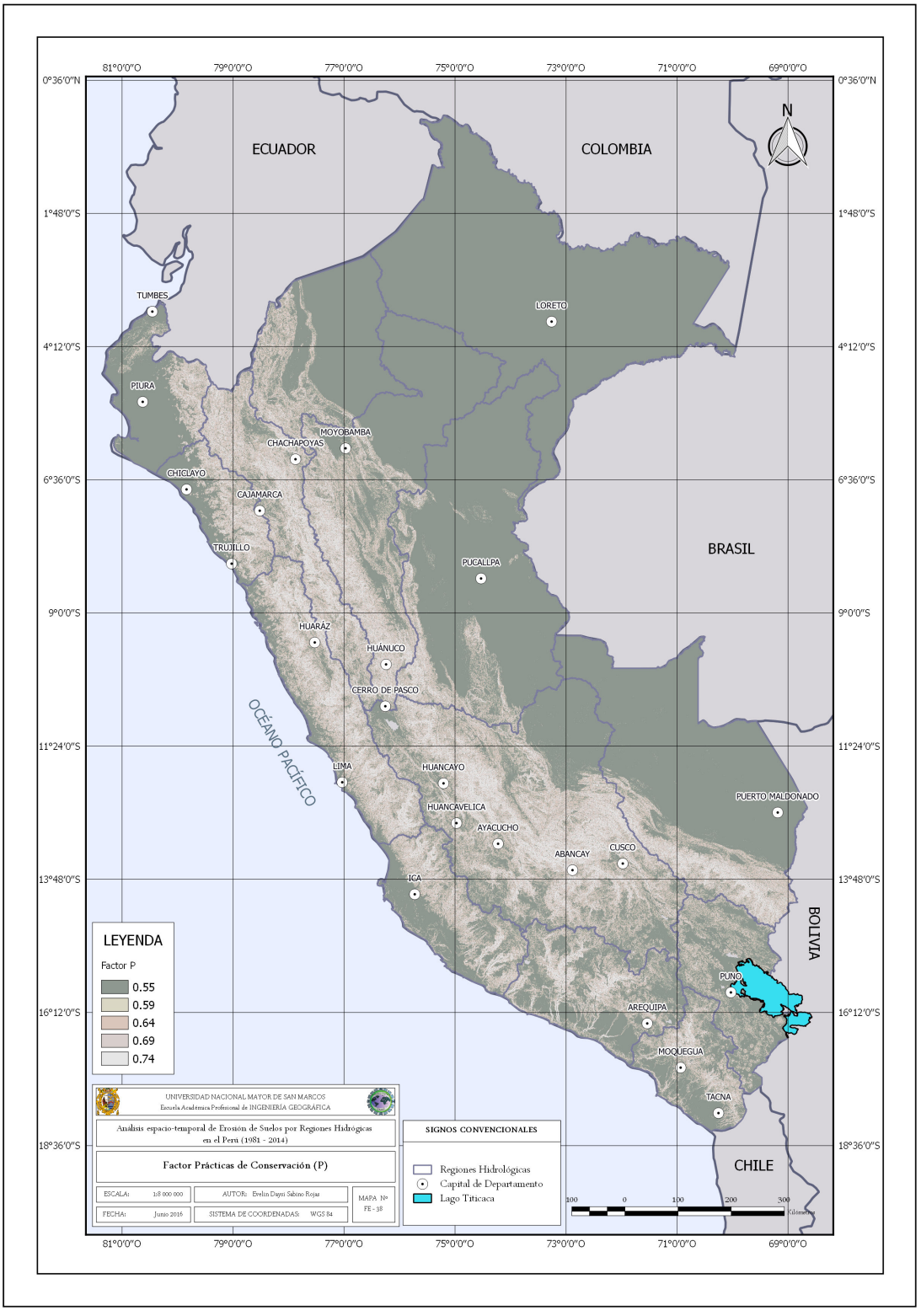


Figura 11.4: . Factor Prácticas de Conservación (P)

Capítulo 12

Apéndice 3

Mapas de los resultados de Erosión de Suelos del Perú para el periodo de estudio de 1981 hasta el 2014

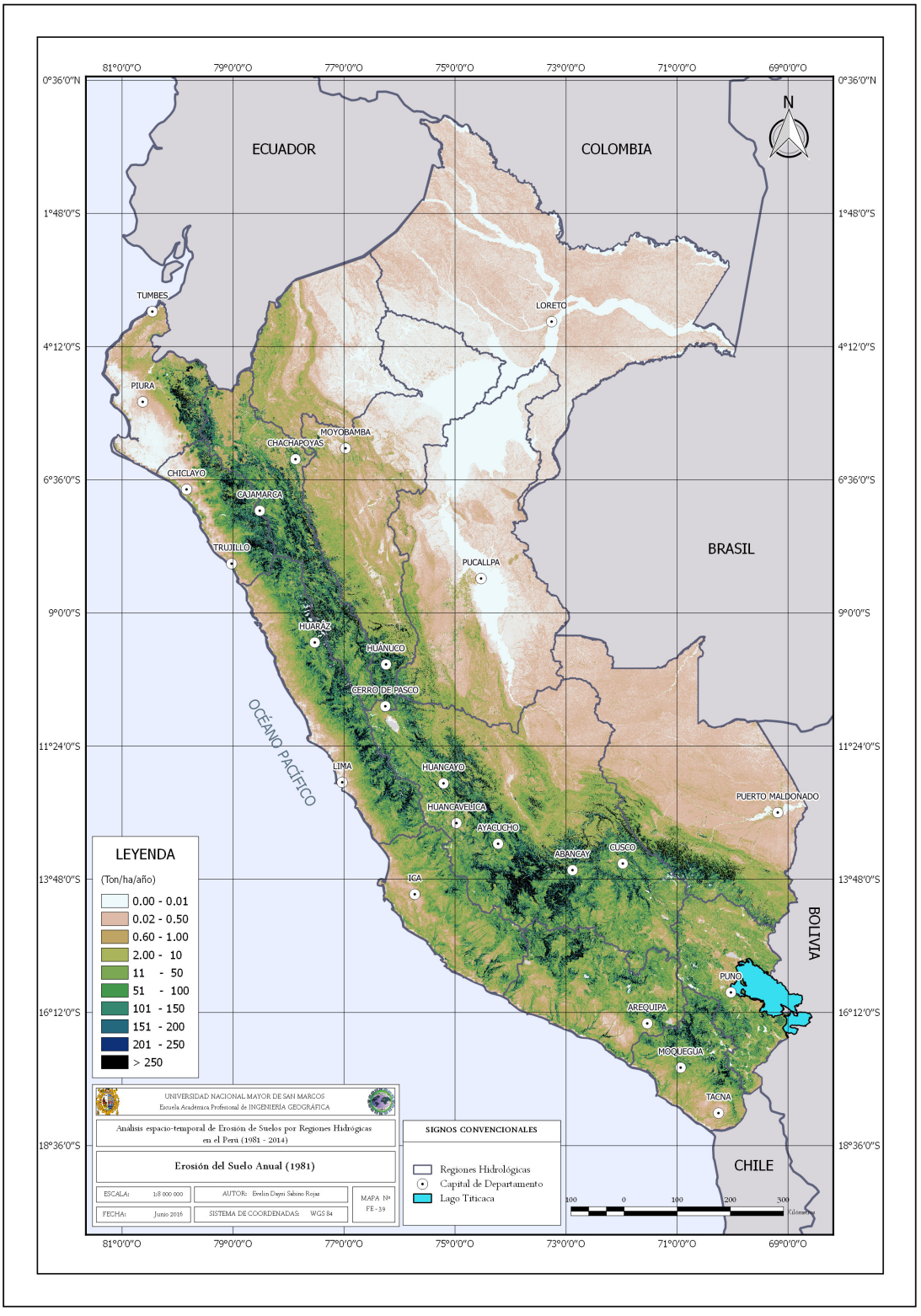


Figura 12.1: . Erosión de Suelo Anual (1981)

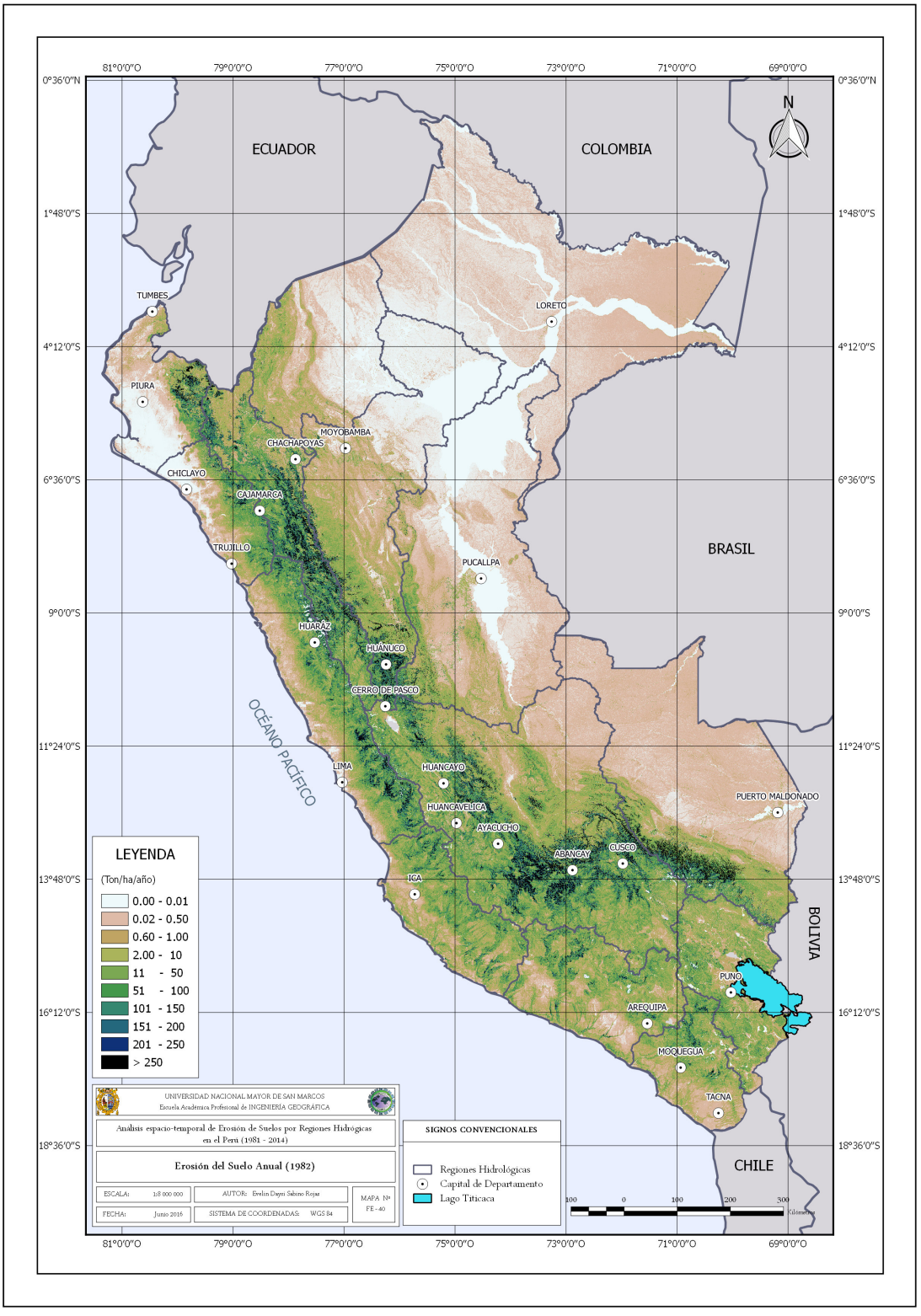


Figura 12.2: . Erosión de Suelo Anual (1982)

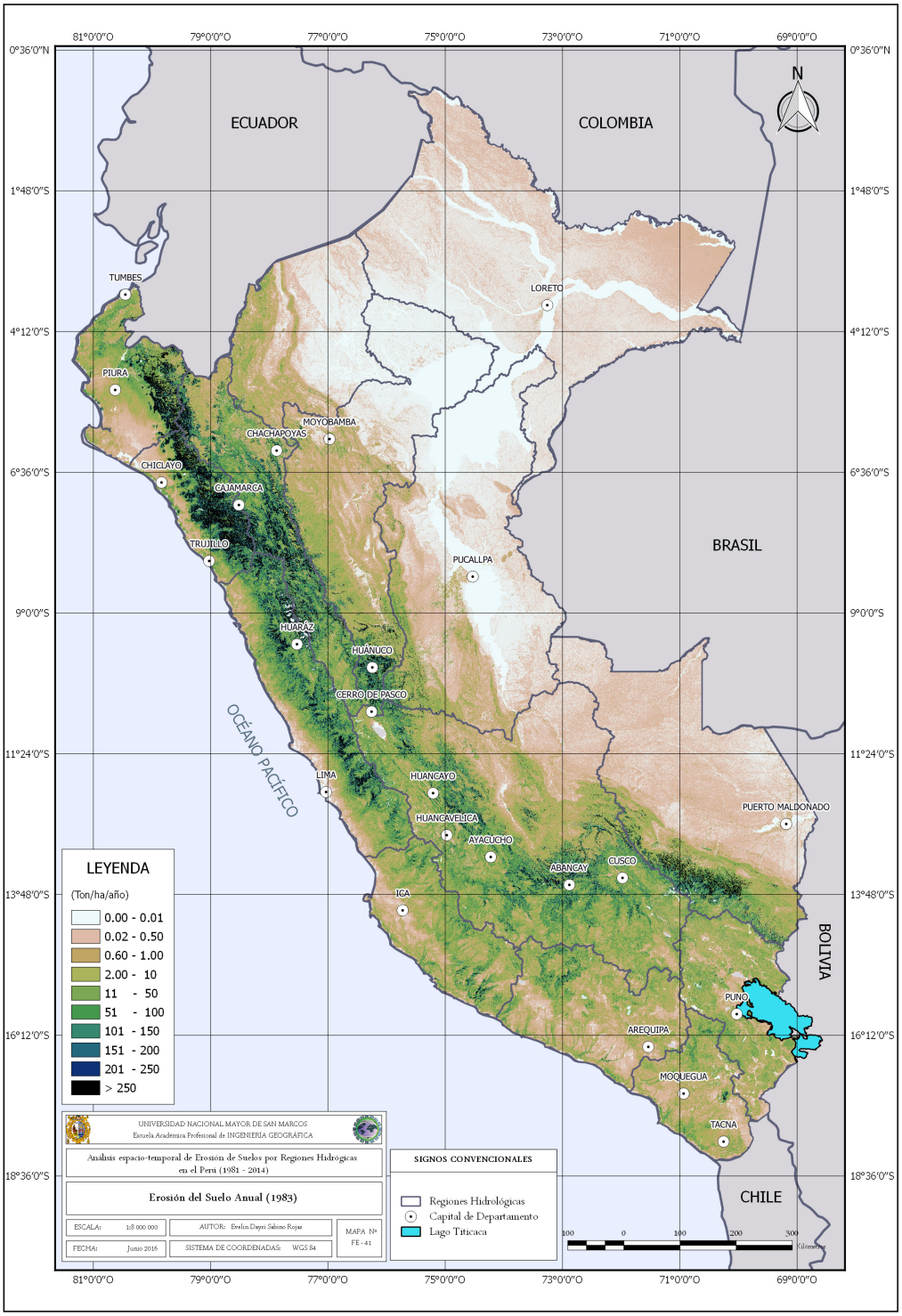


Figura 12.3: . Erosión de Suelo Anual (1983)

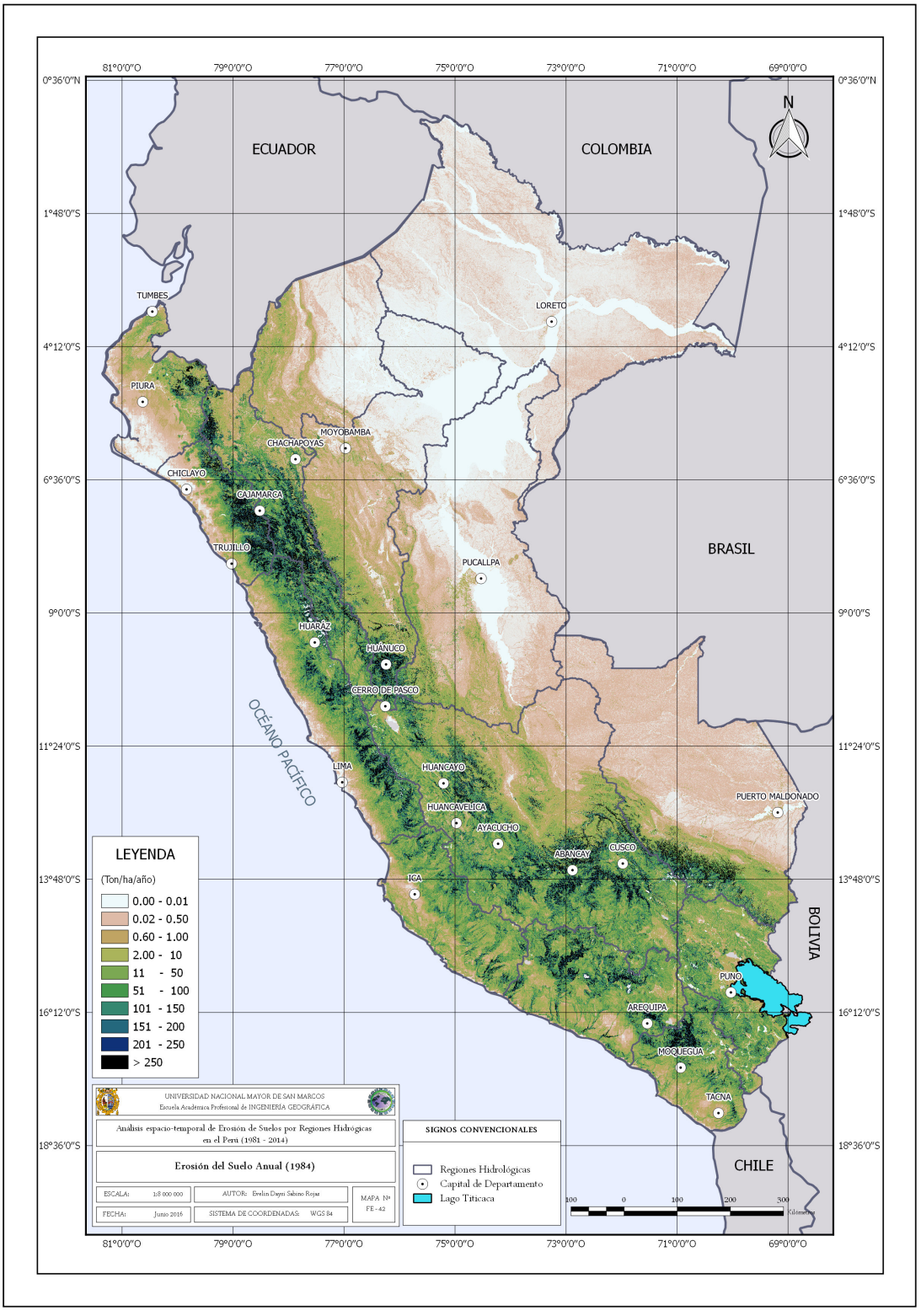


Figura 12.4: . Erosión de Suelo Anual (1984)

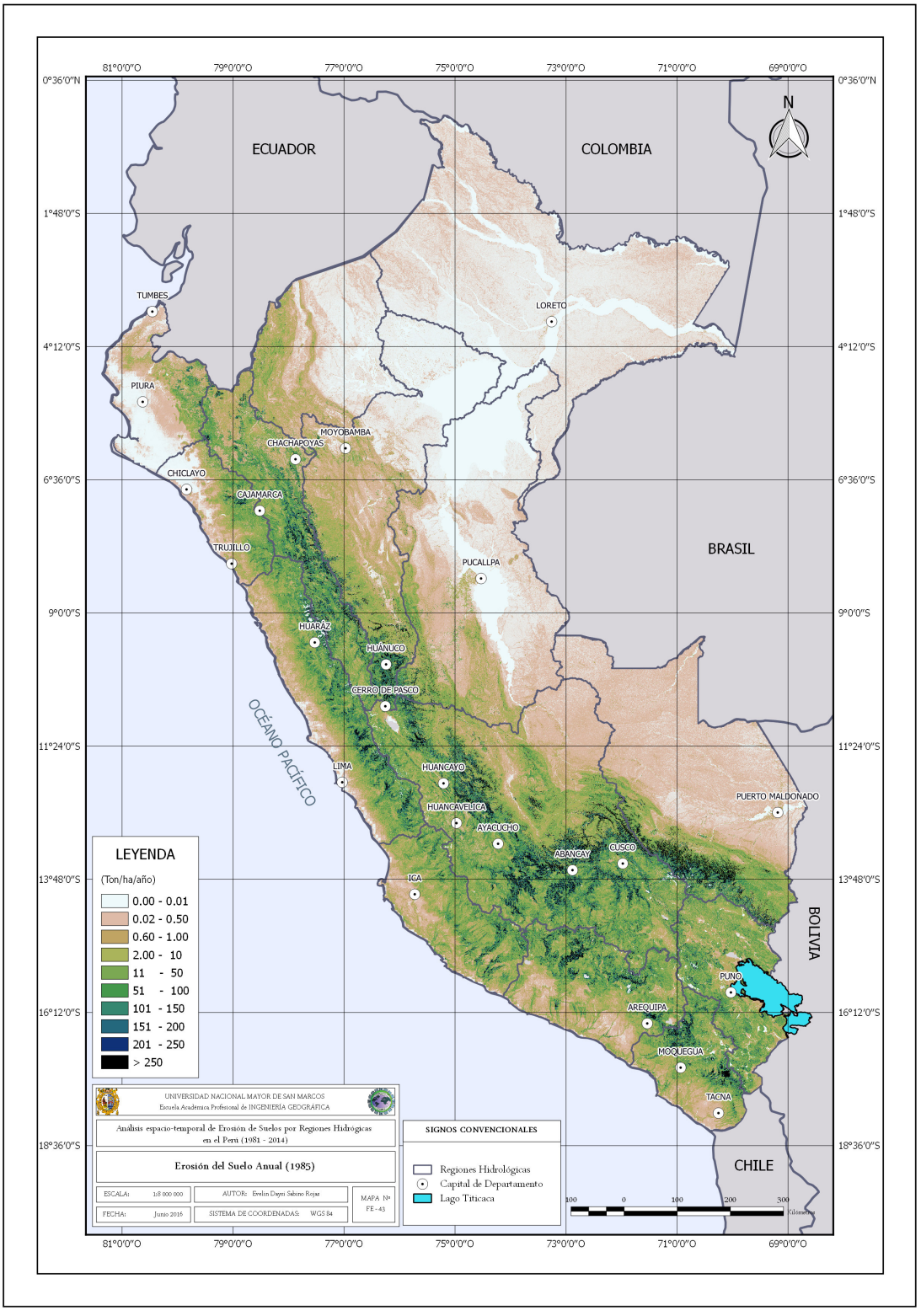


Figura 12.5: . Erosión de Suelo Anual (1985)

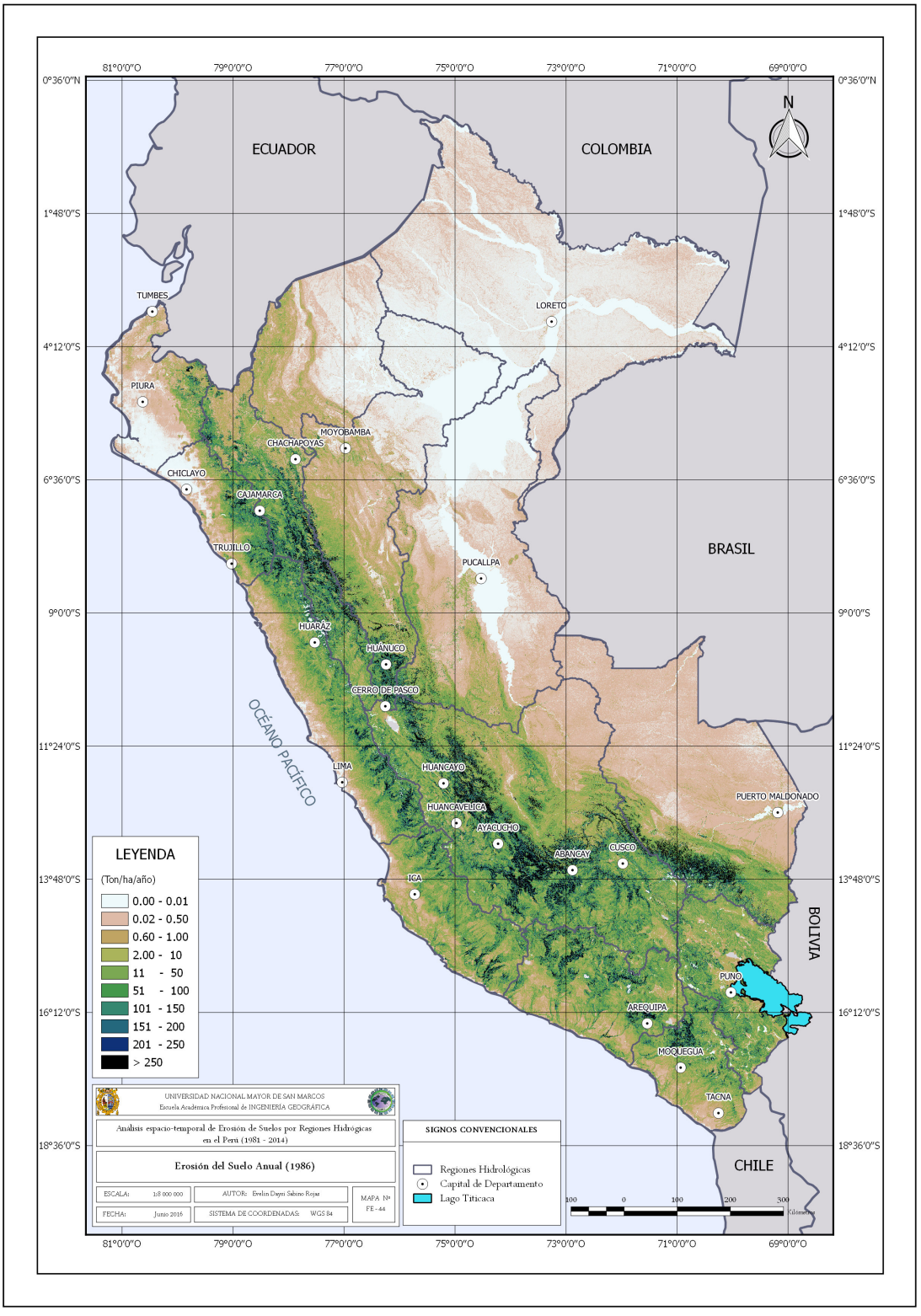


Figura 12.6: . Erosión de Suelo Anual (1986)

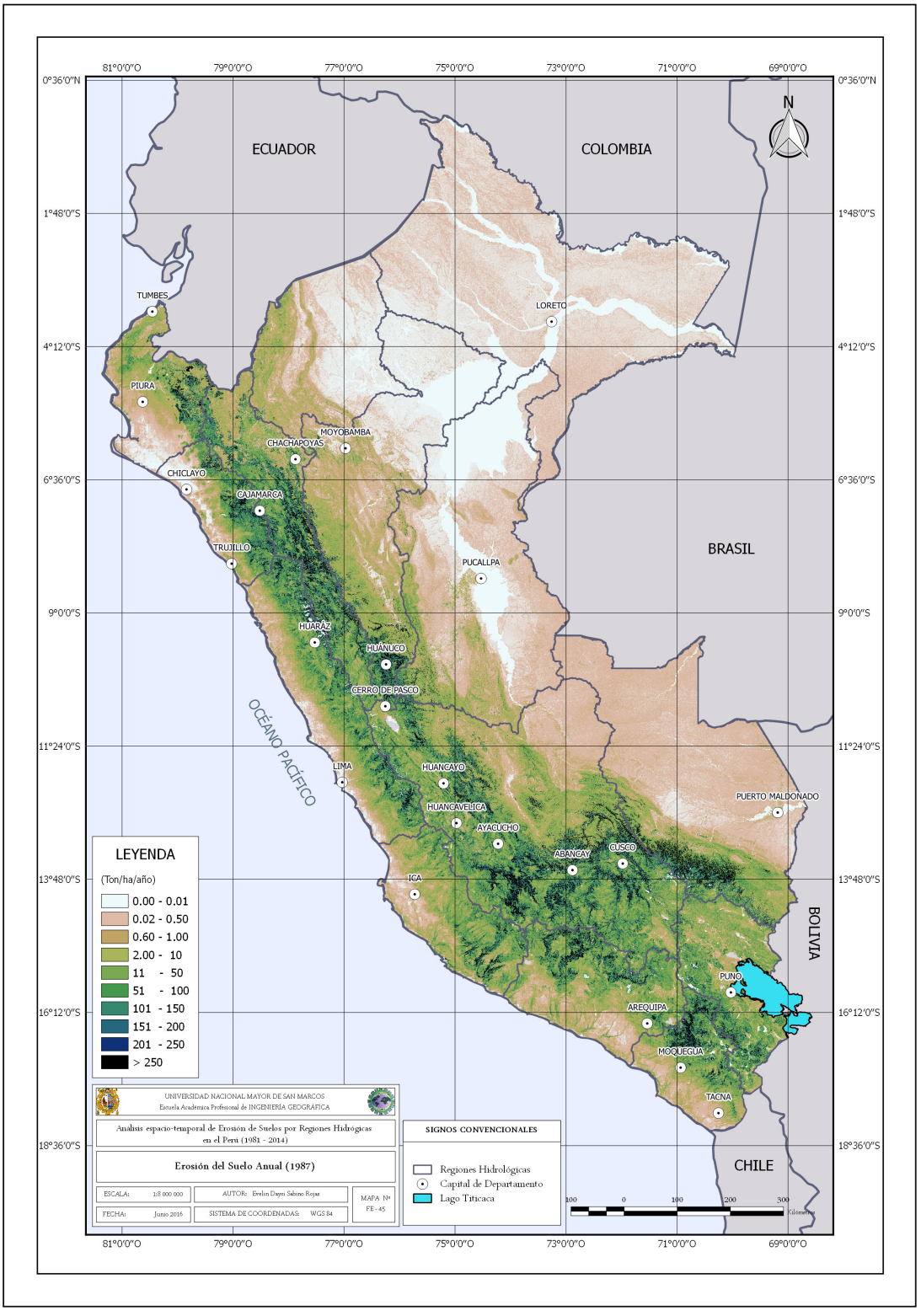


Figura 12.7: . Erosión de Suelo Anual (1987)

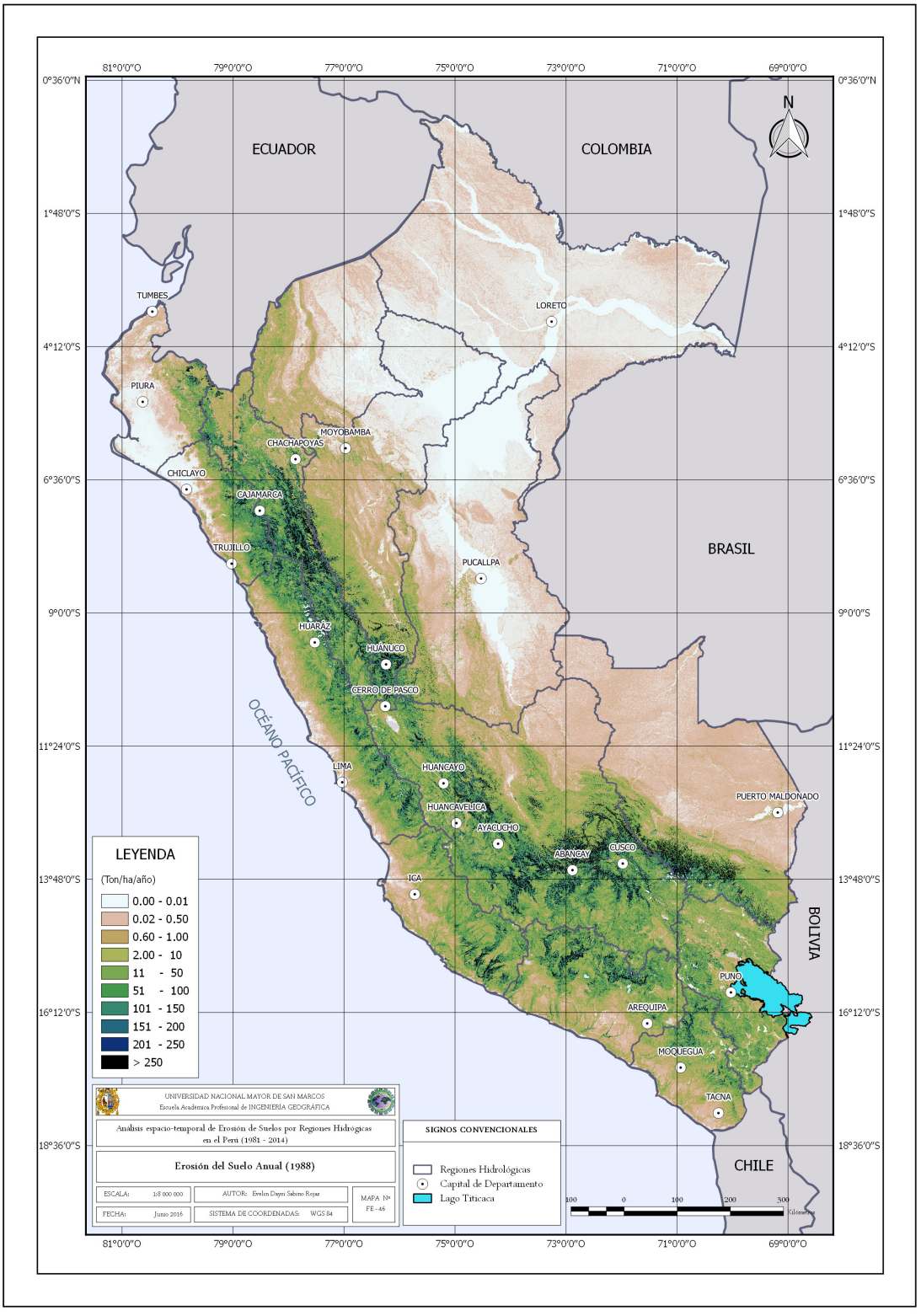


Figura 12.8: . Erosión de Suelo Anual (1988)

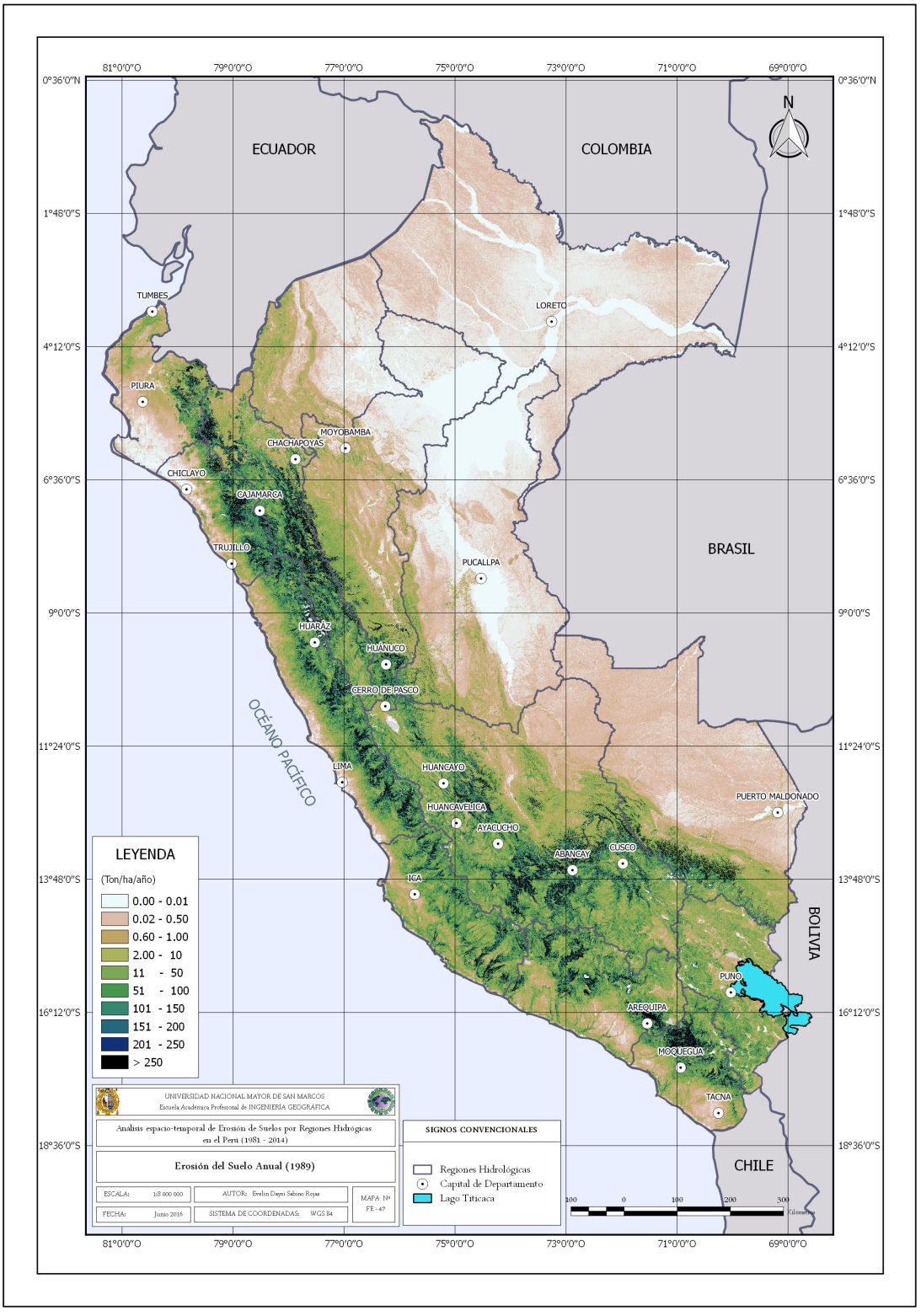


Figura 12.9: . Erosión de Suelo Anual (1989)

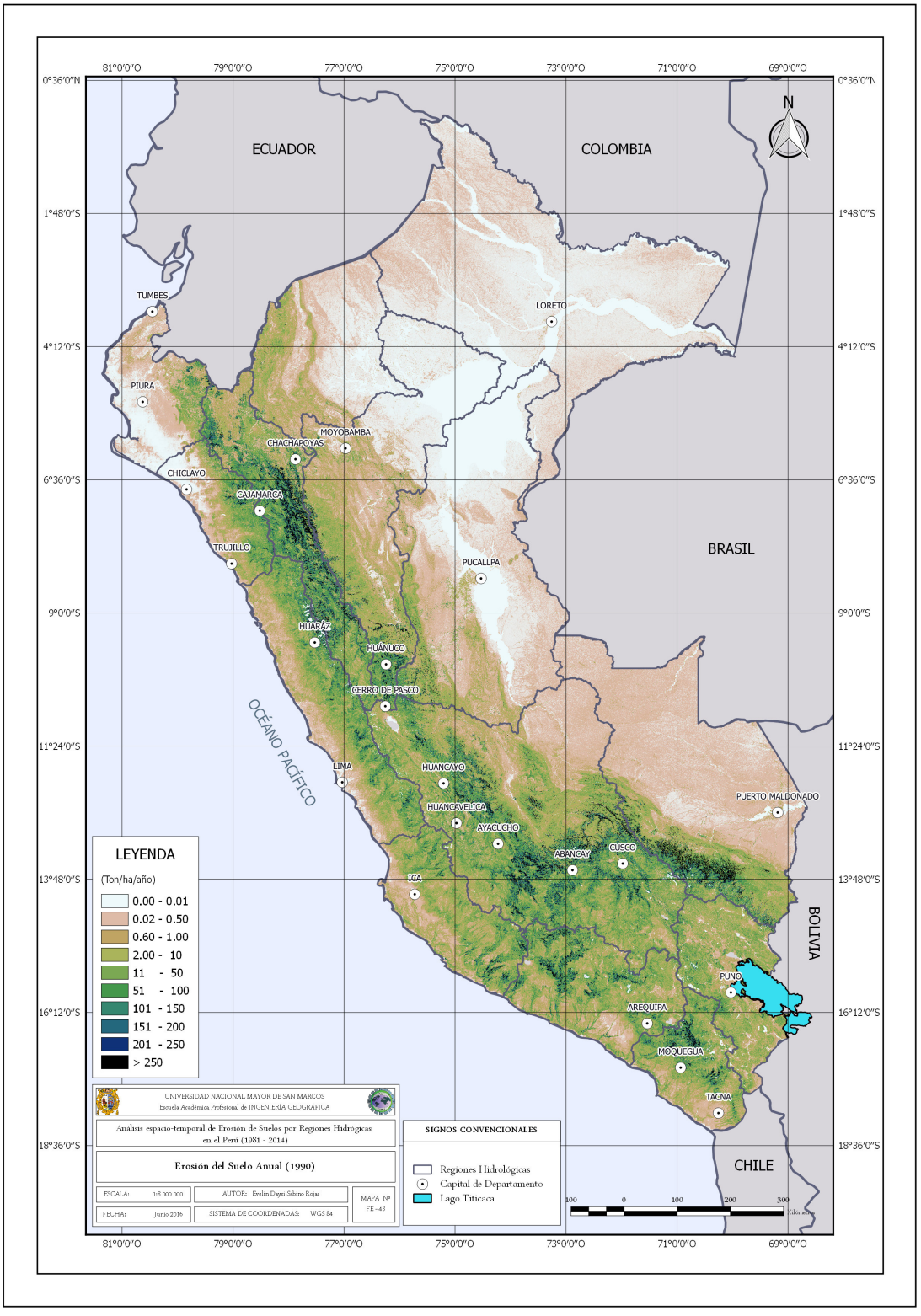


Figura 12.10: . Erosión de Suelo Anual (1990)

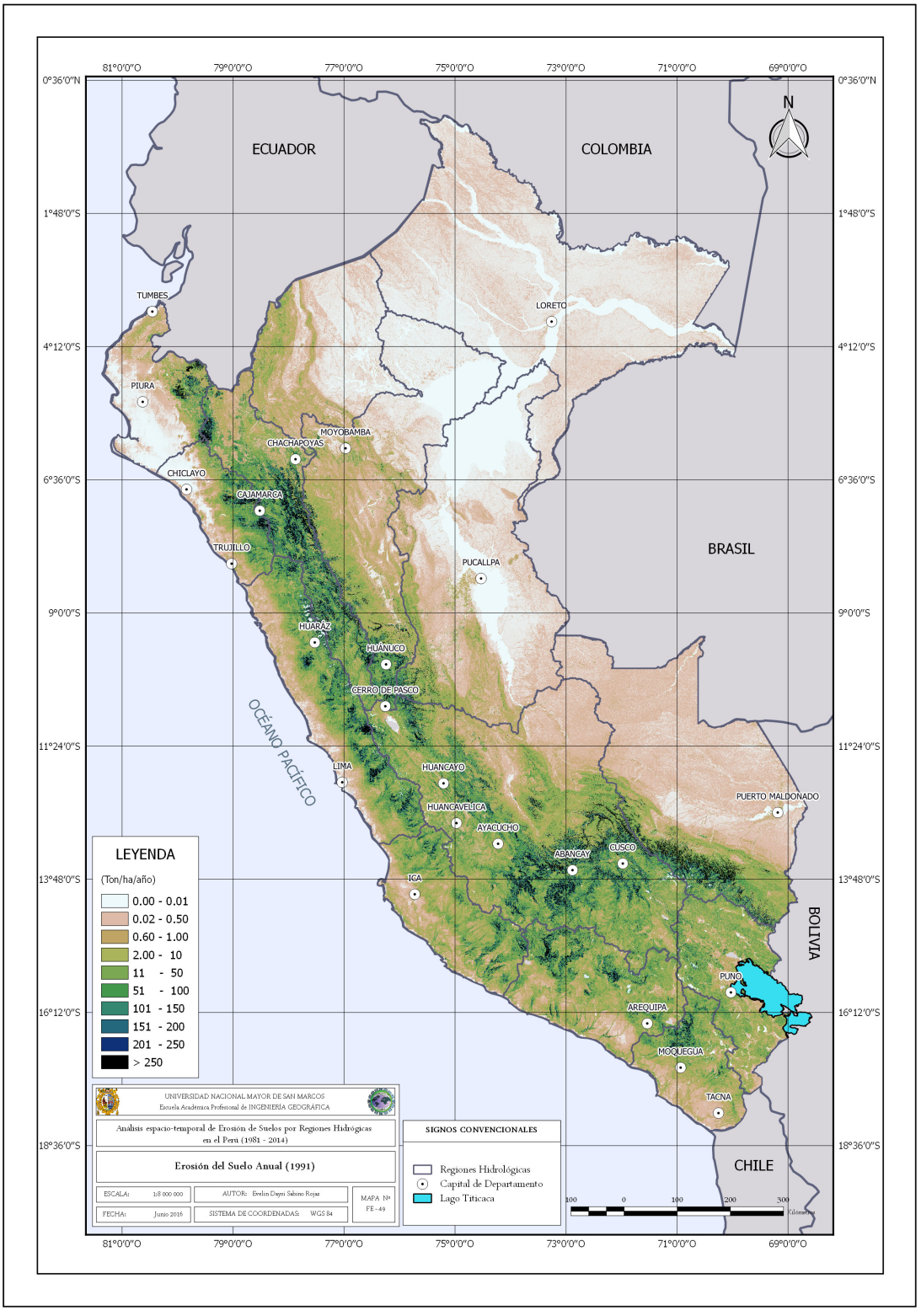


Figura 12.11: . Erosión de Suelo Anual (1991)

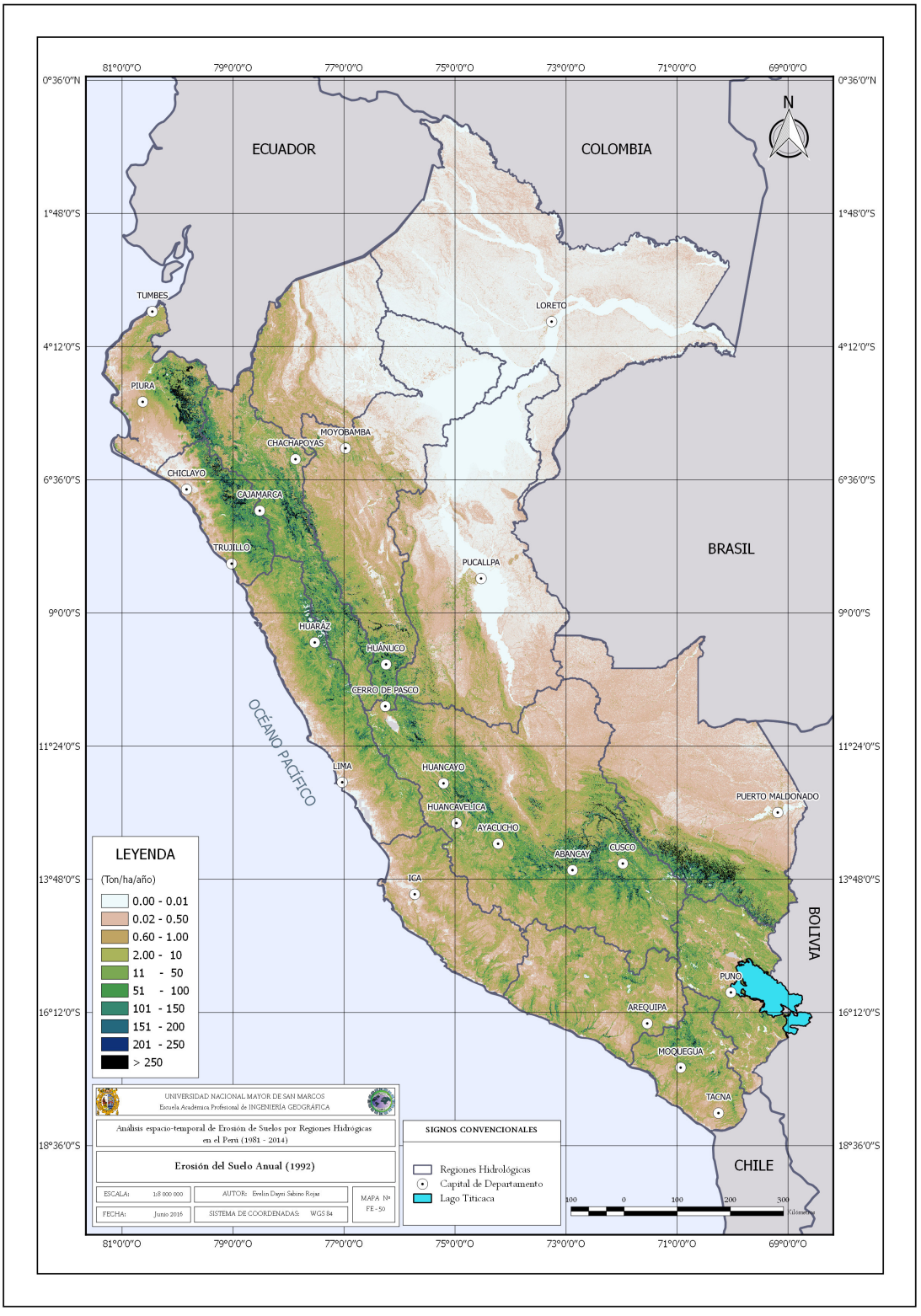


Figura 12.12: . Erosión de Suelo Anual (1992)

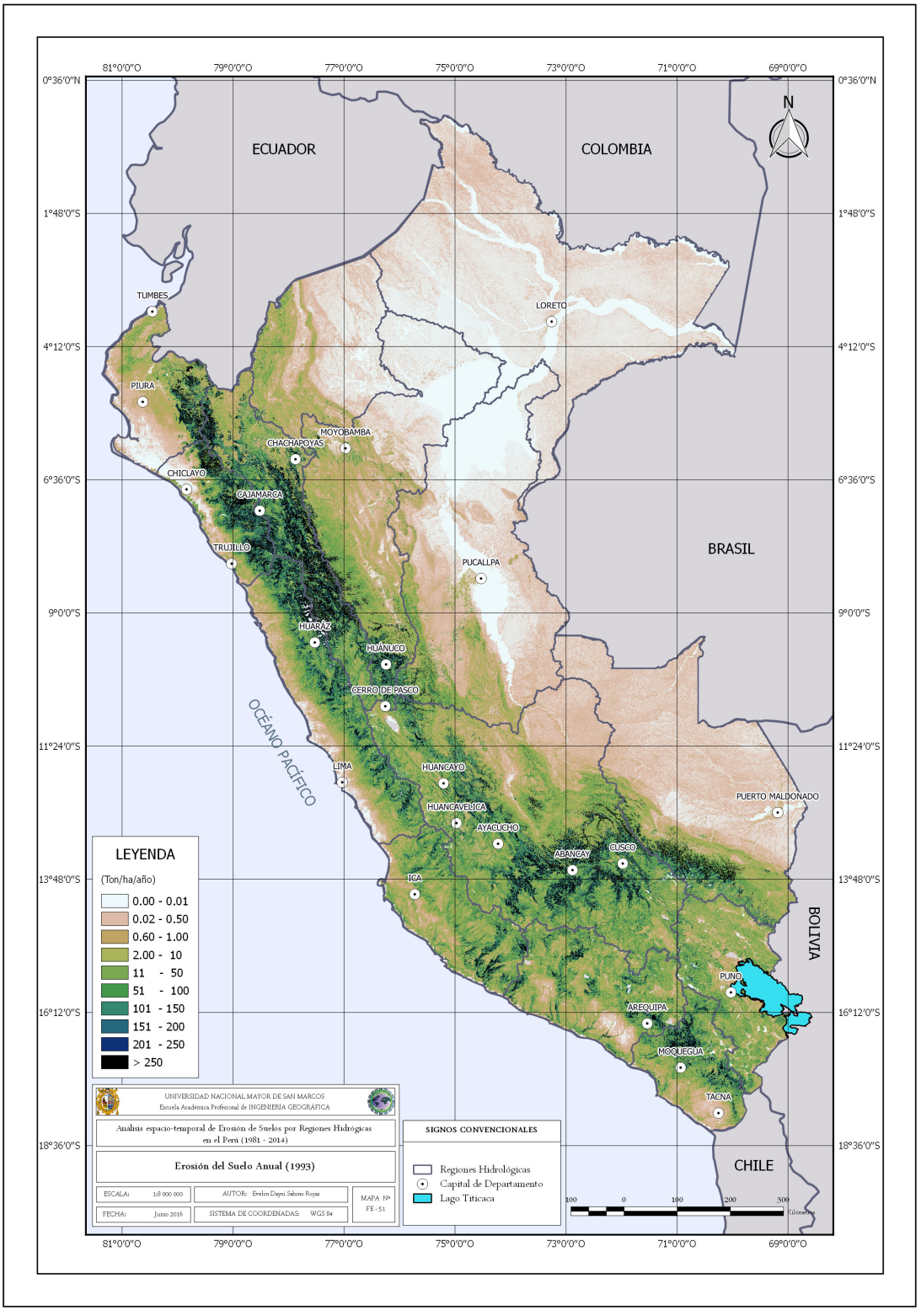


Figura 12.13: . Erosión de Suelo Anual (1993)

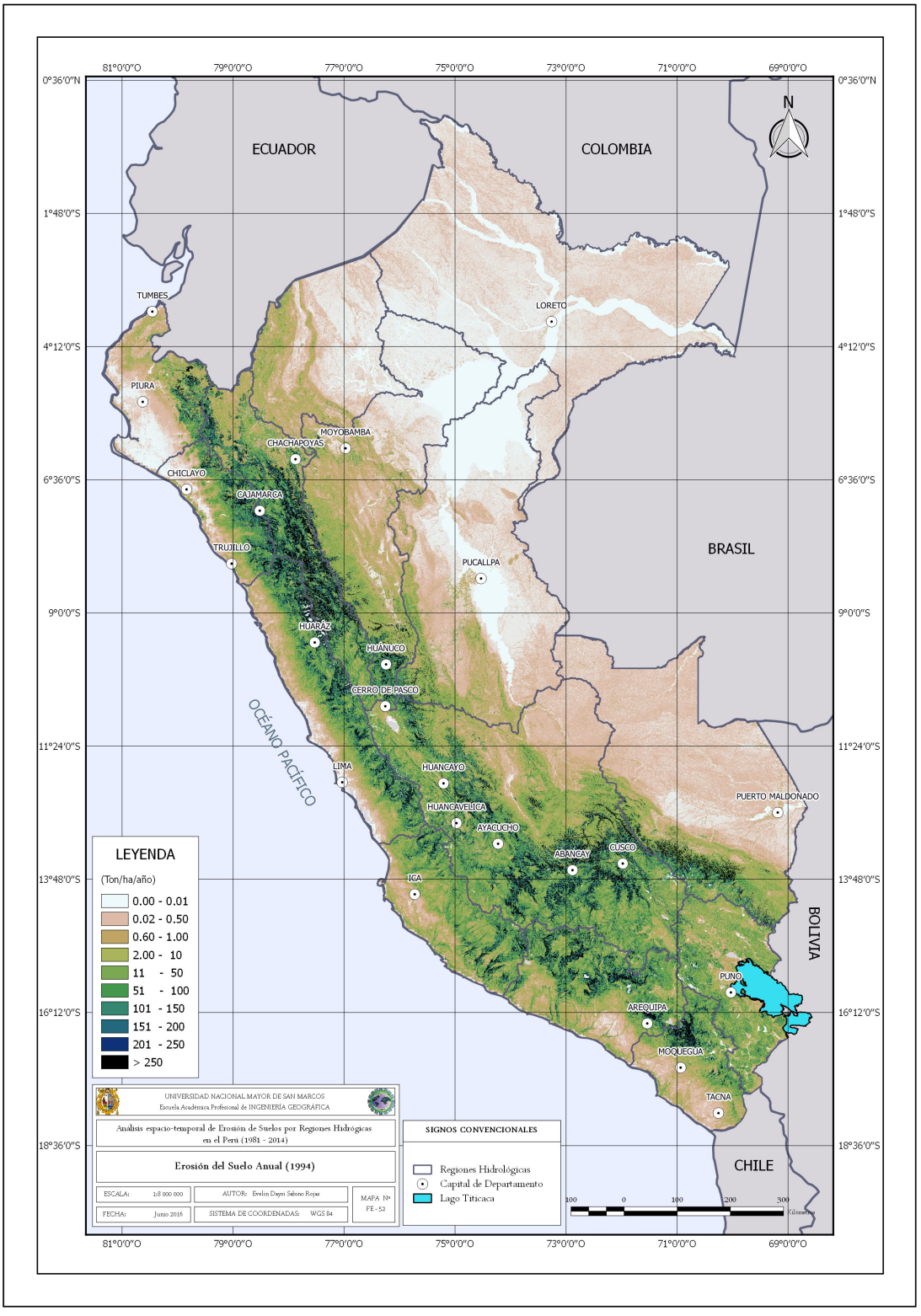


Figura 12.14: . Erosión de Suelo Anual (1994)

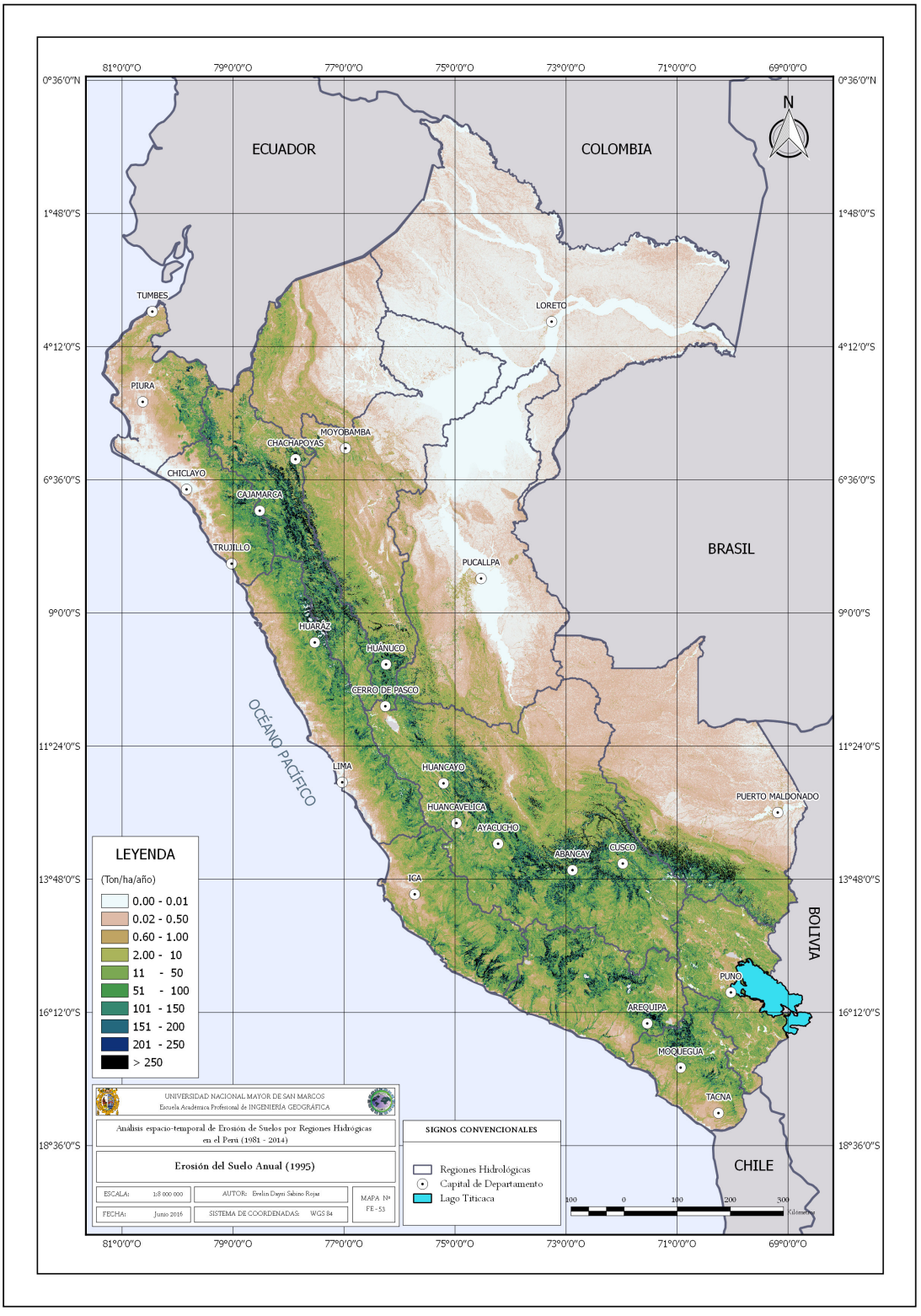


Figura 12.15: . Erosión de Suelo Anual (1995)

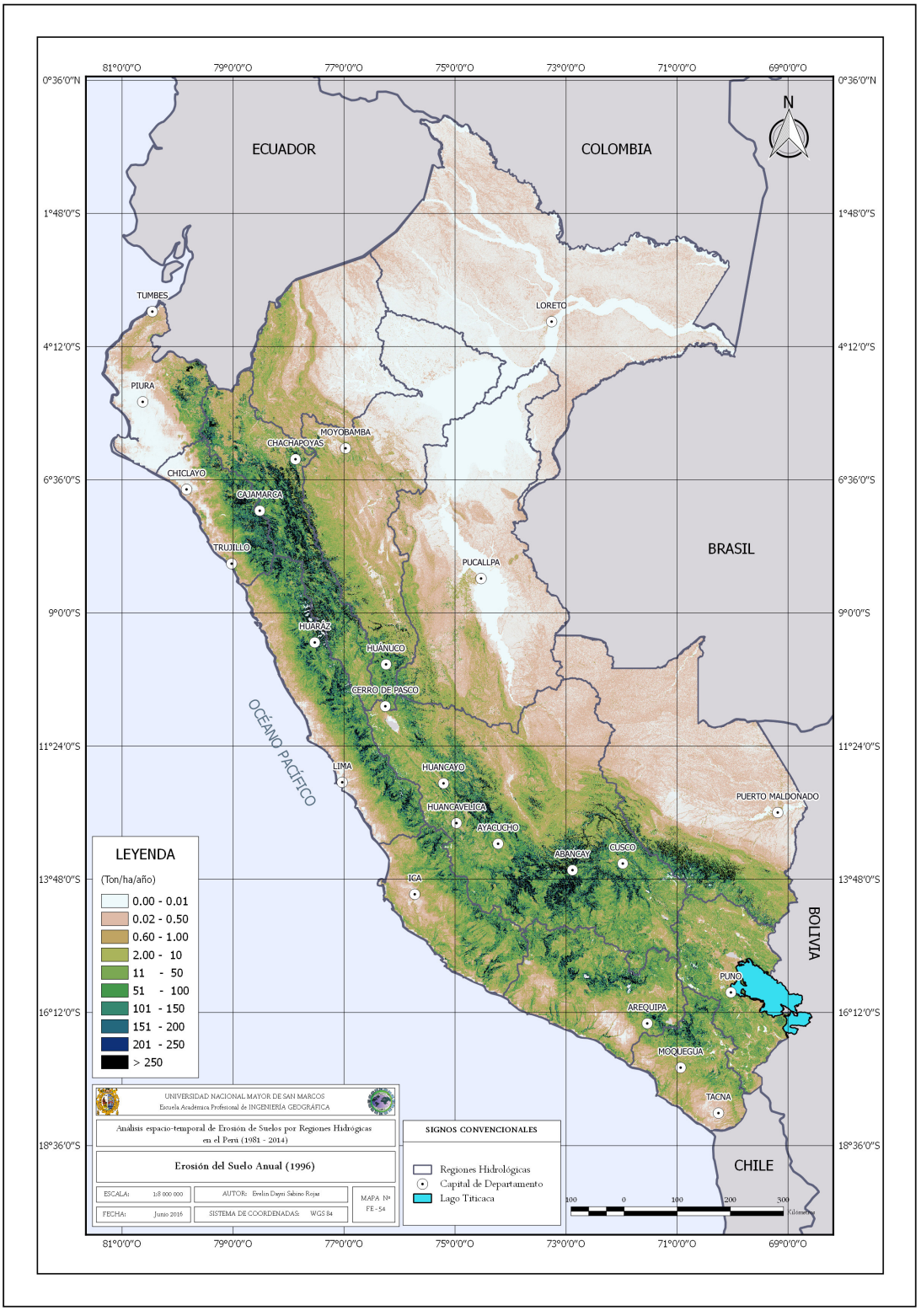


Figura 12.16: . Erosión de Suelo Anual (1996)

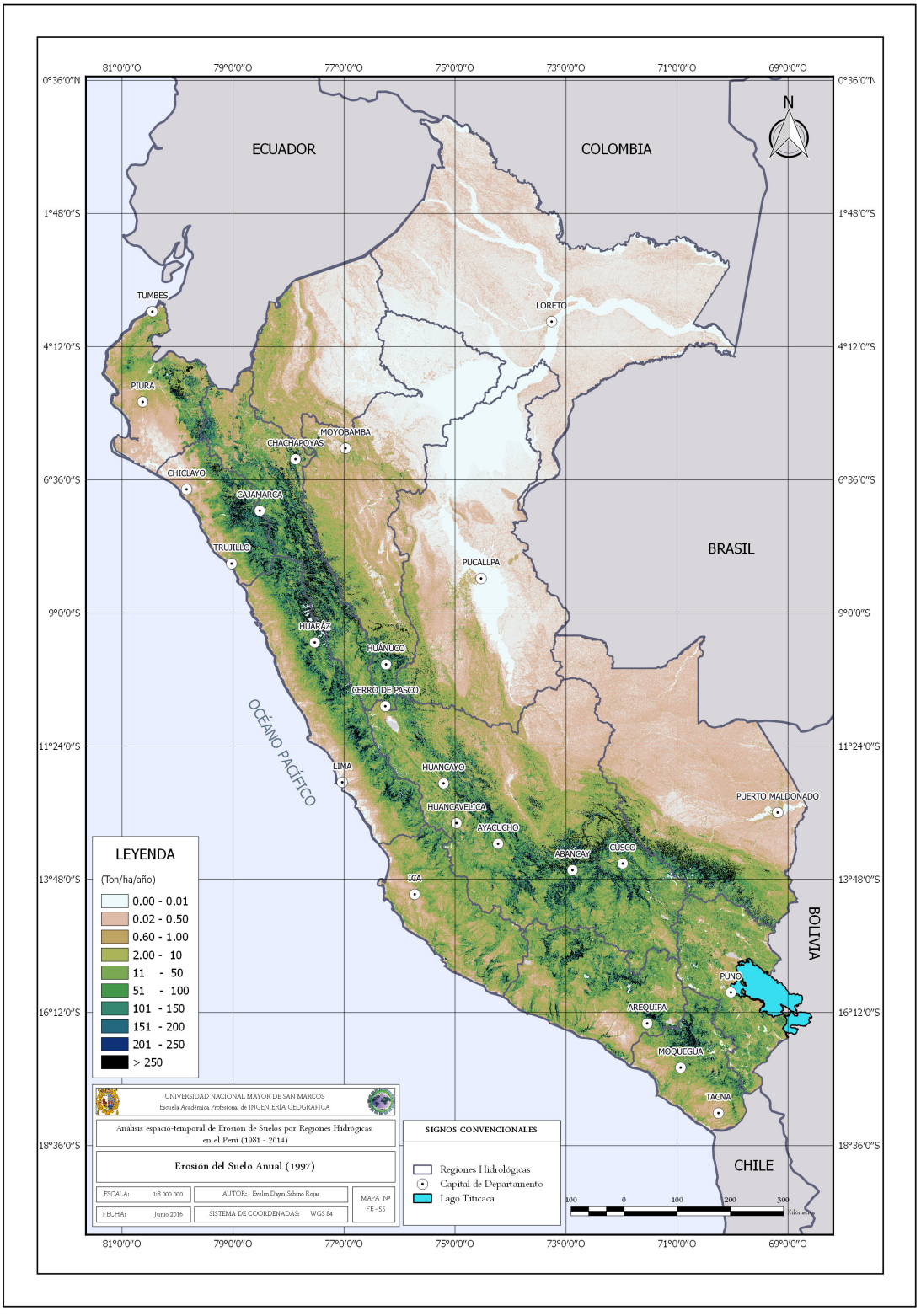


Figura 12.17: . Erosión de Suelo Anual (1997)

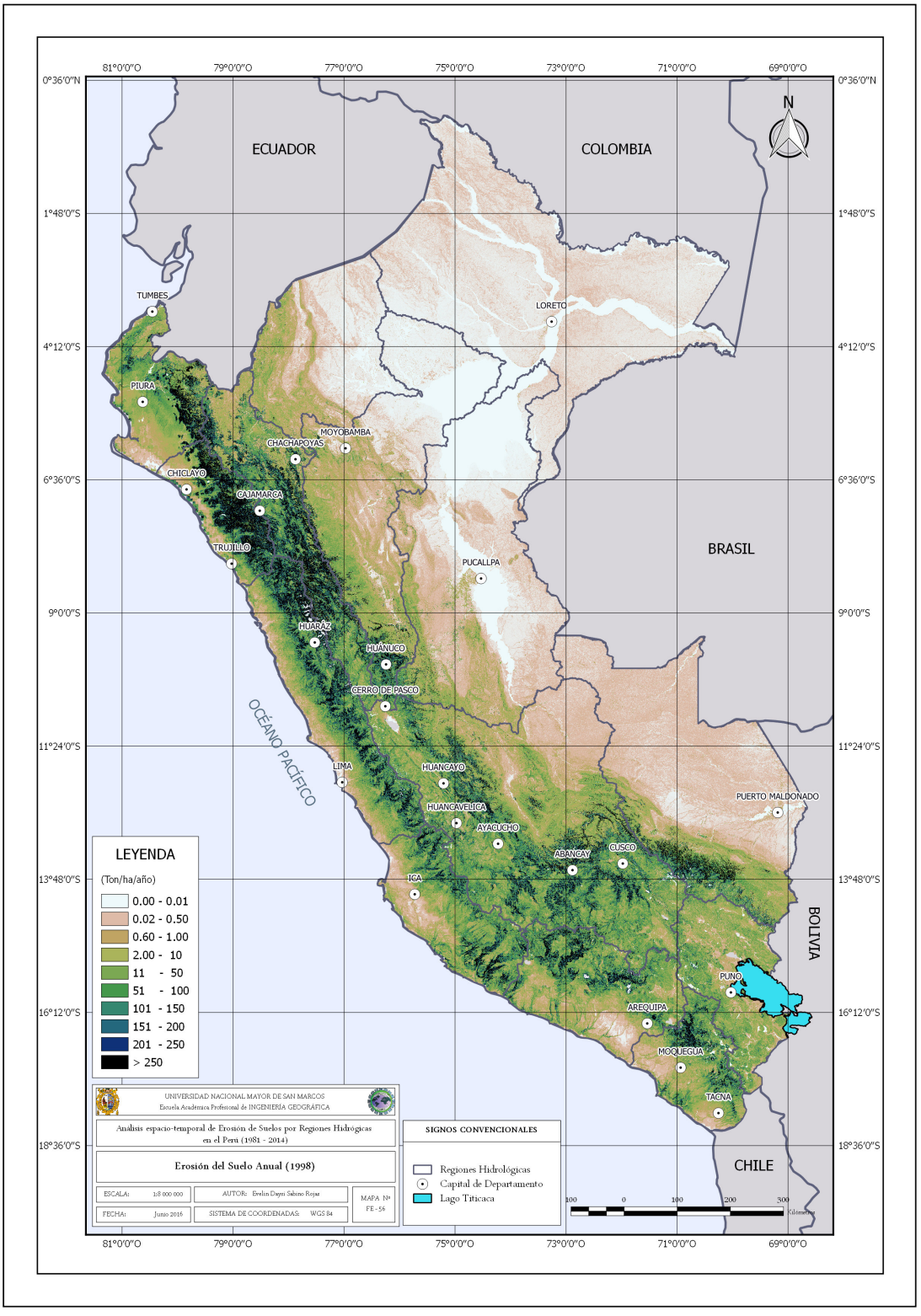


Figura 12.18: . Erosión de Suelo Anual (1998)

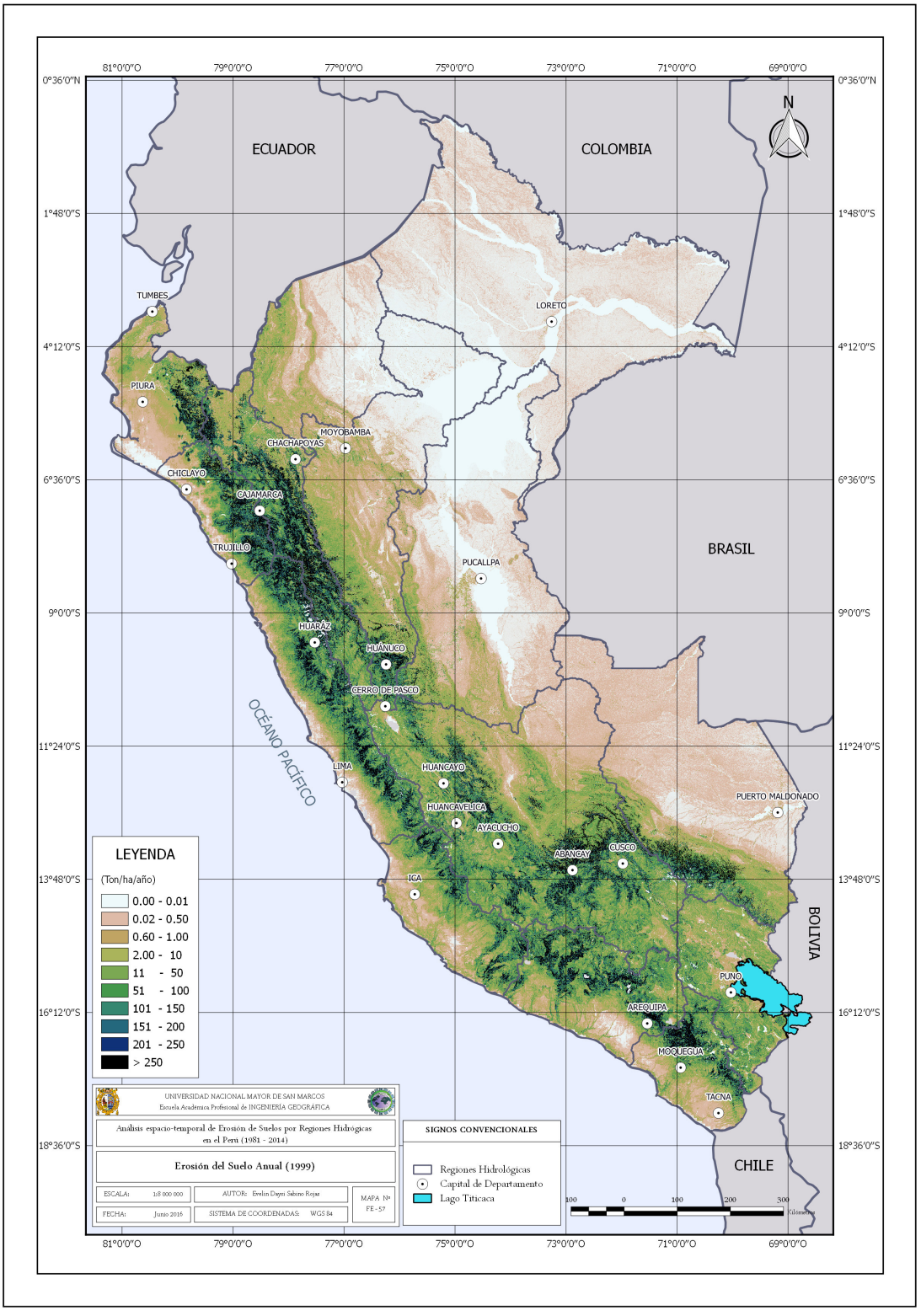


Figura 12.19: . Erosión de Suelo Anual (1999)

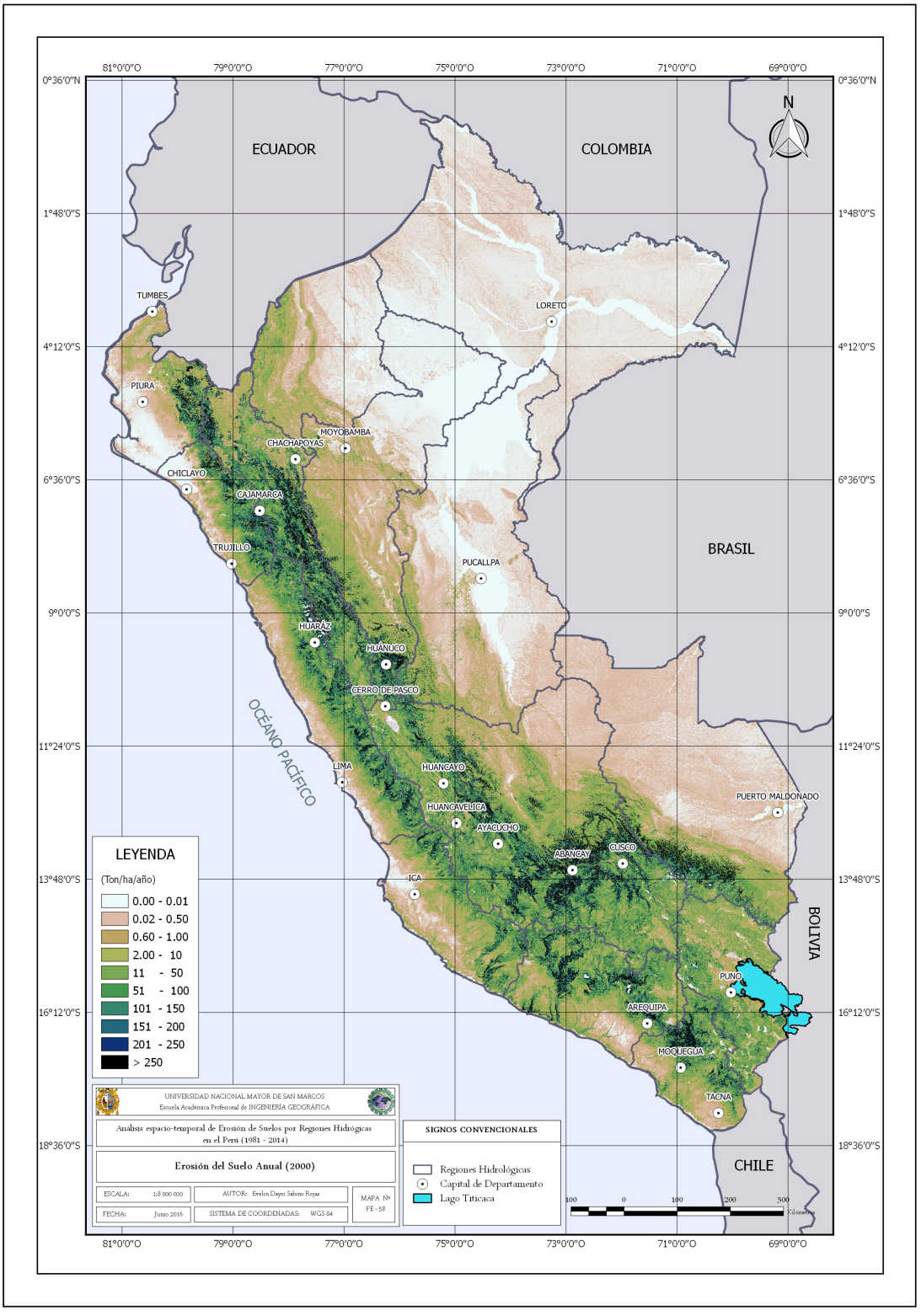


Figura 12.20: . Erosión de Suelo Anual (2000)

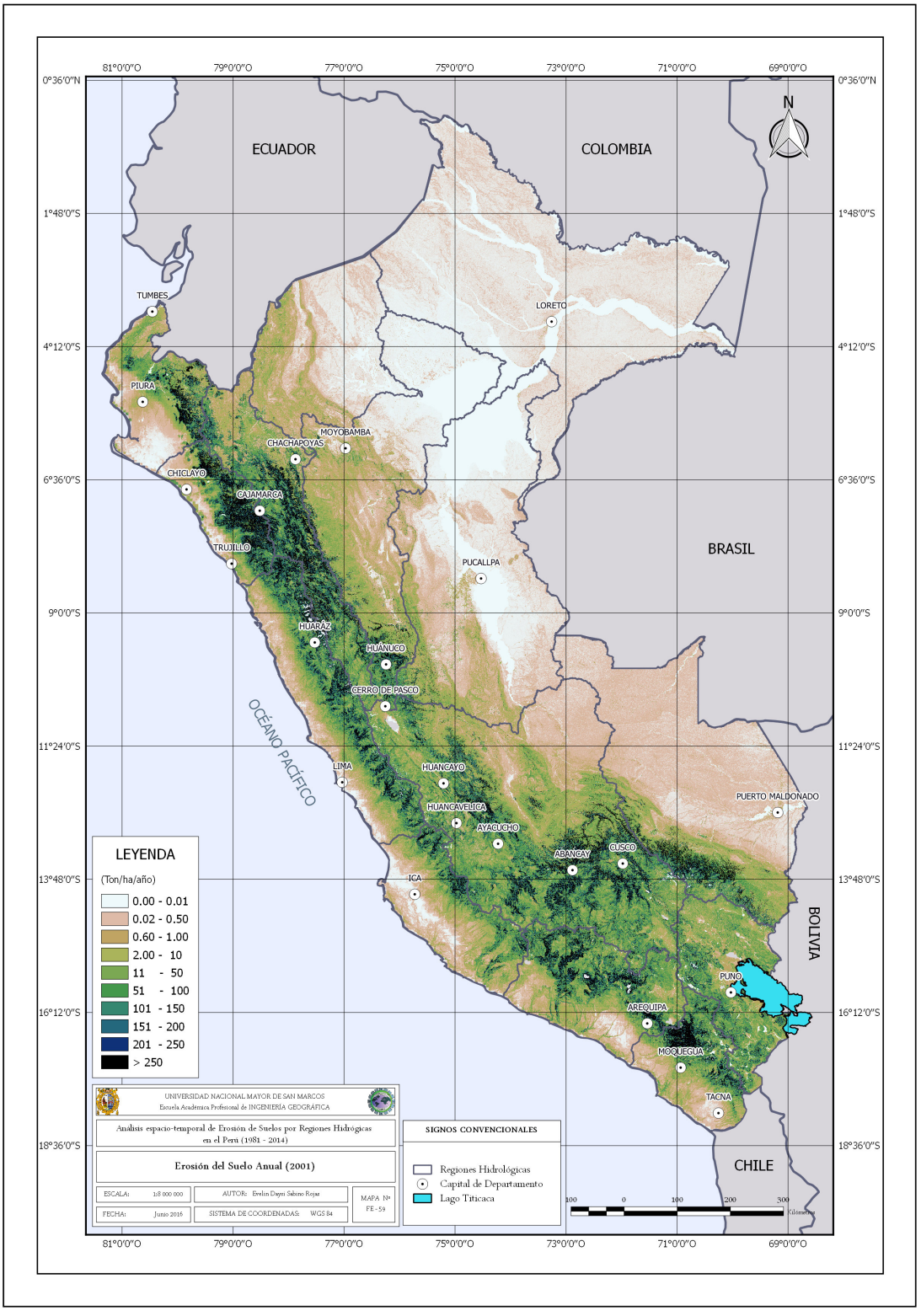


Figura 12.21: . Erosión de Suelo Anual (2001)

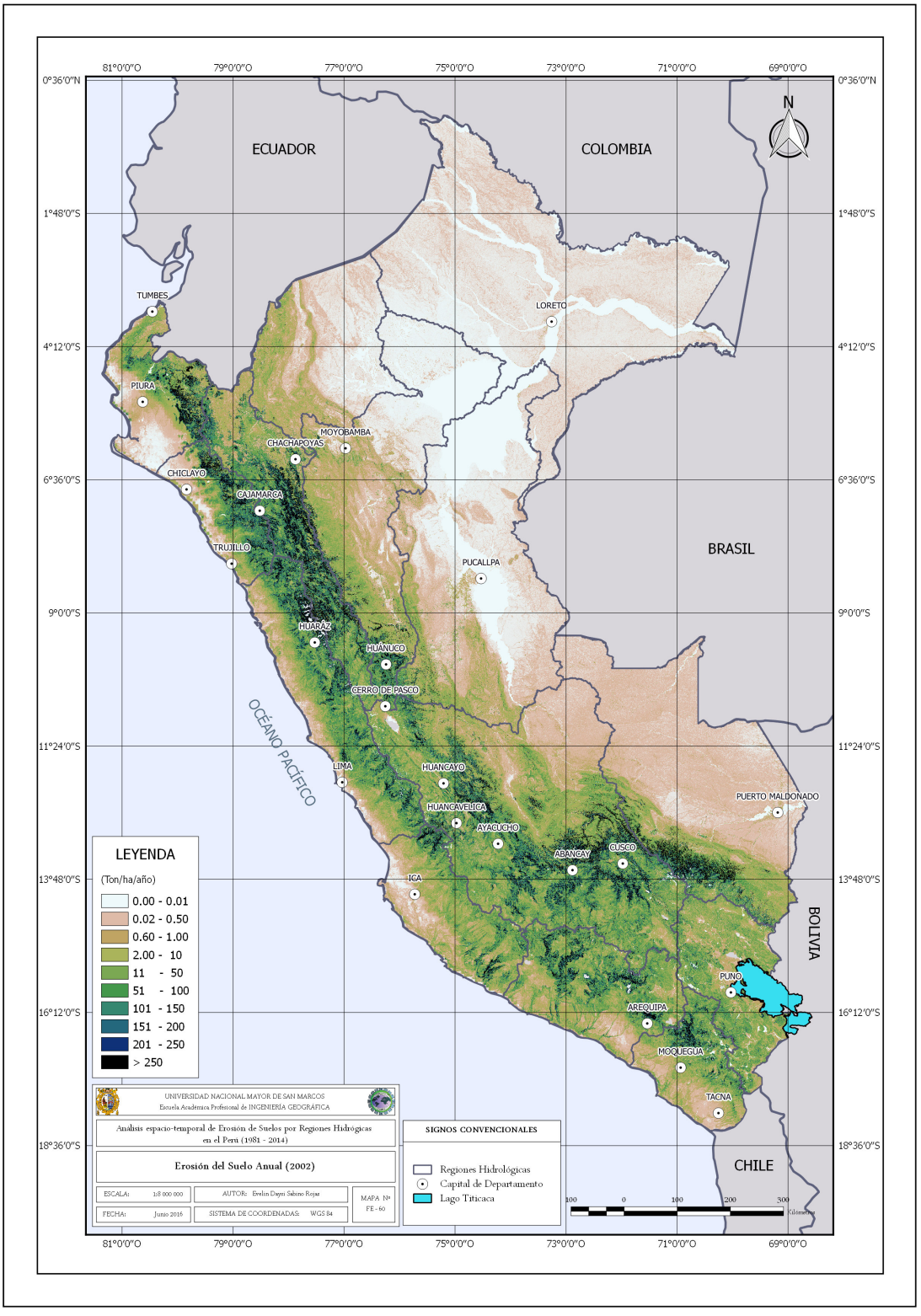


Figura 12.22: . Erosión de Suelo Anual (2002)

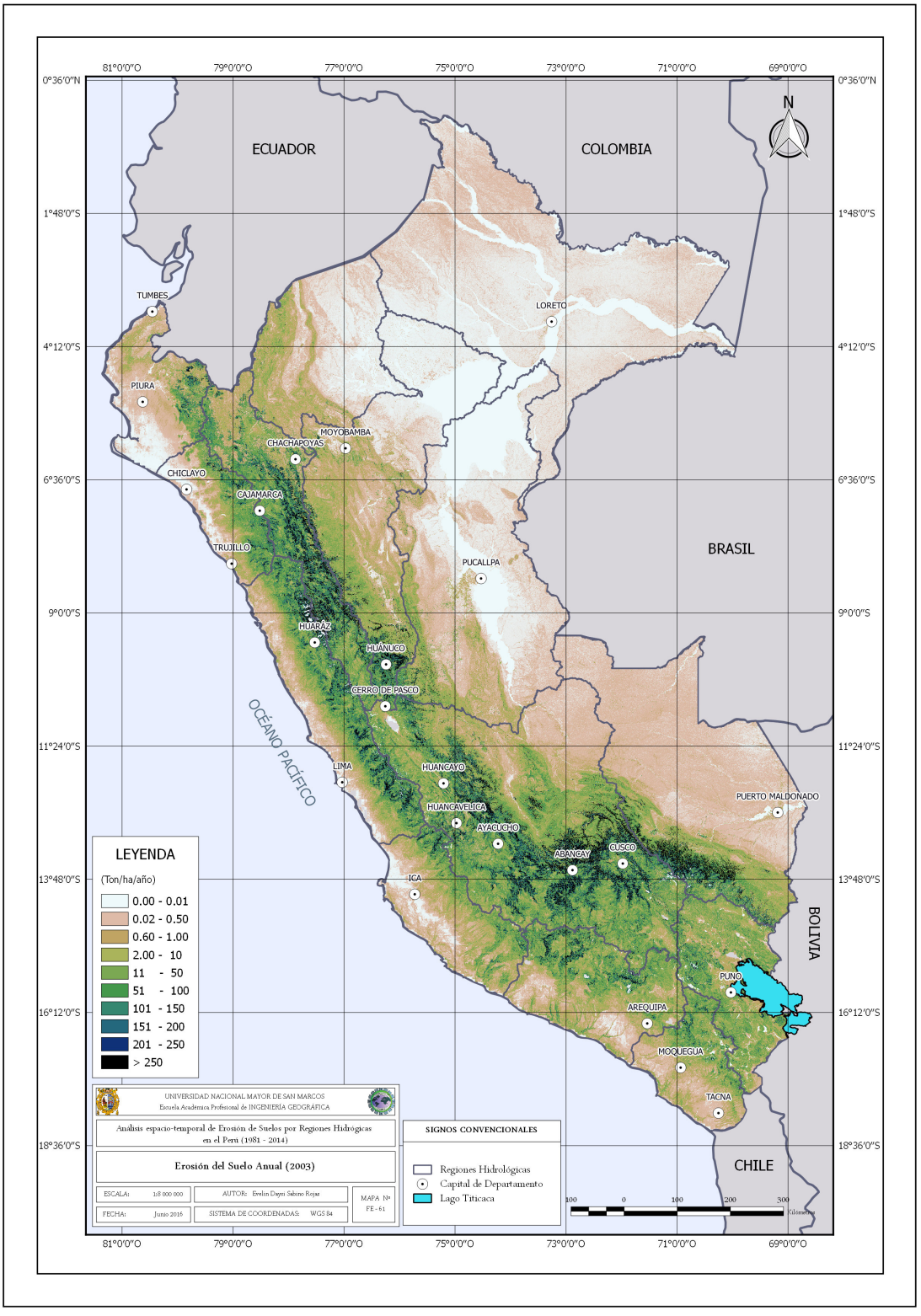


Figura 12.23: . Erosión de Suelo Anual (2003)

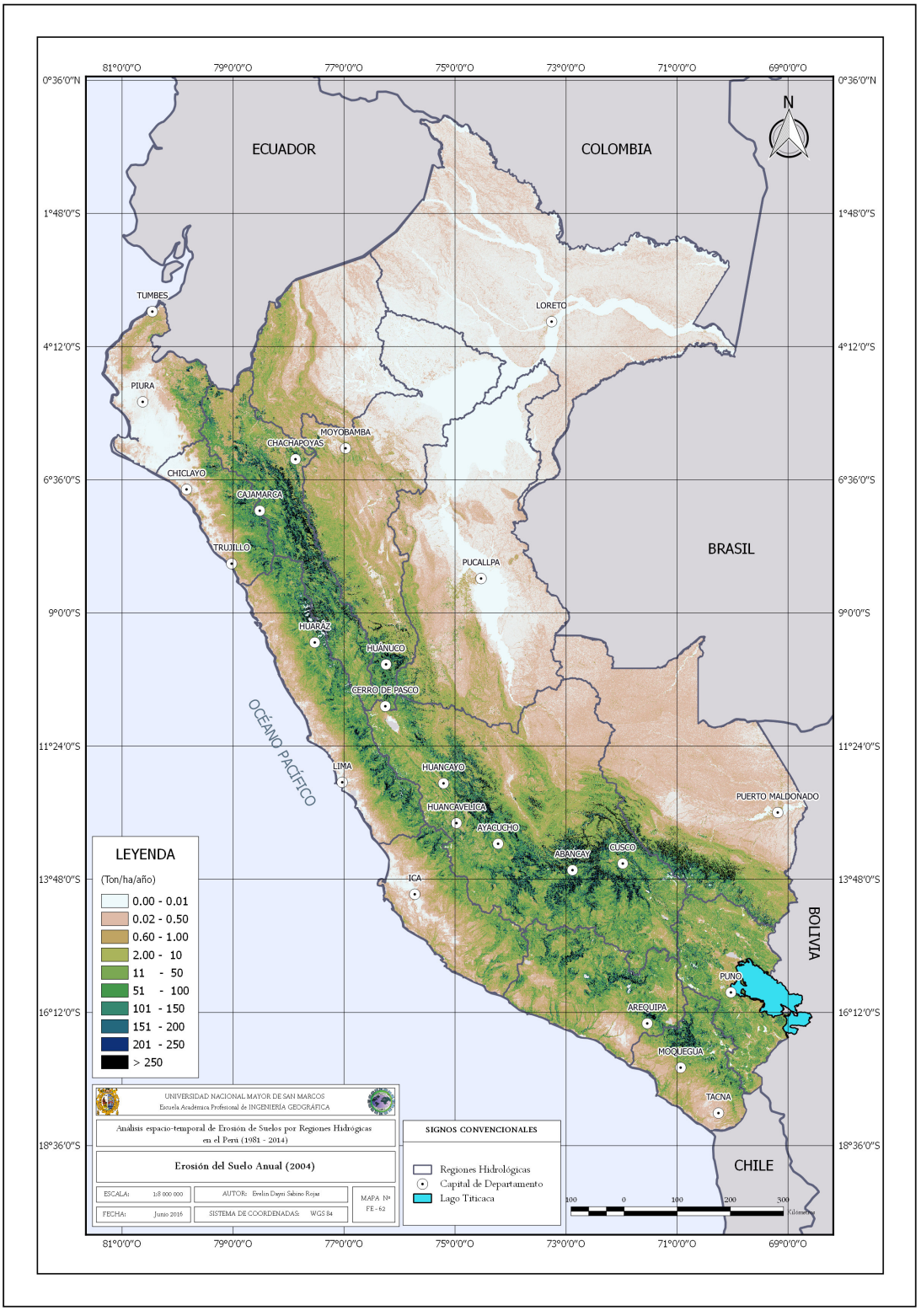


Figura 12.24: . Erosión de Suelo Anual (2004)

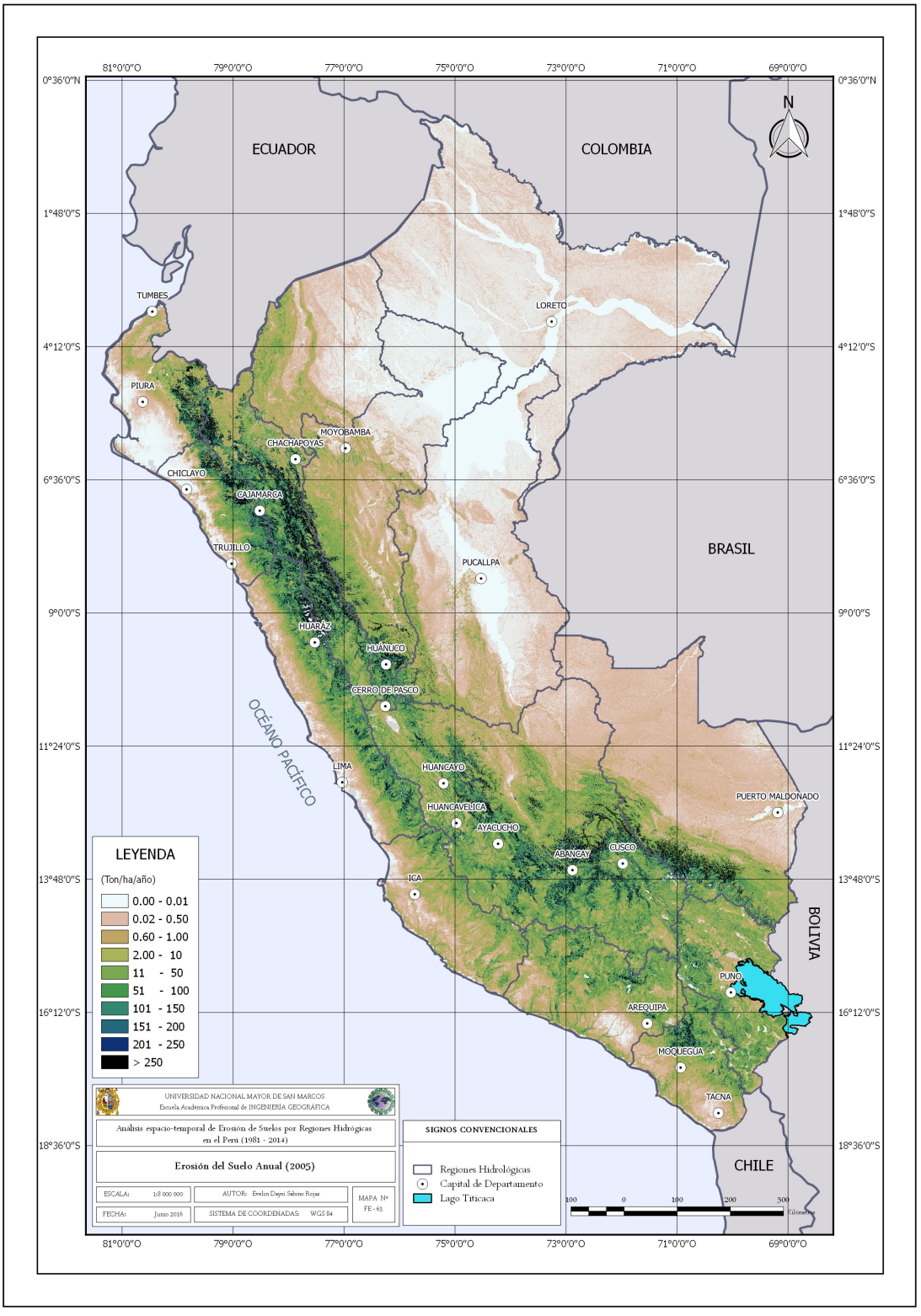


Figura 12.25: . Erosión de Suelo Anual (2005)

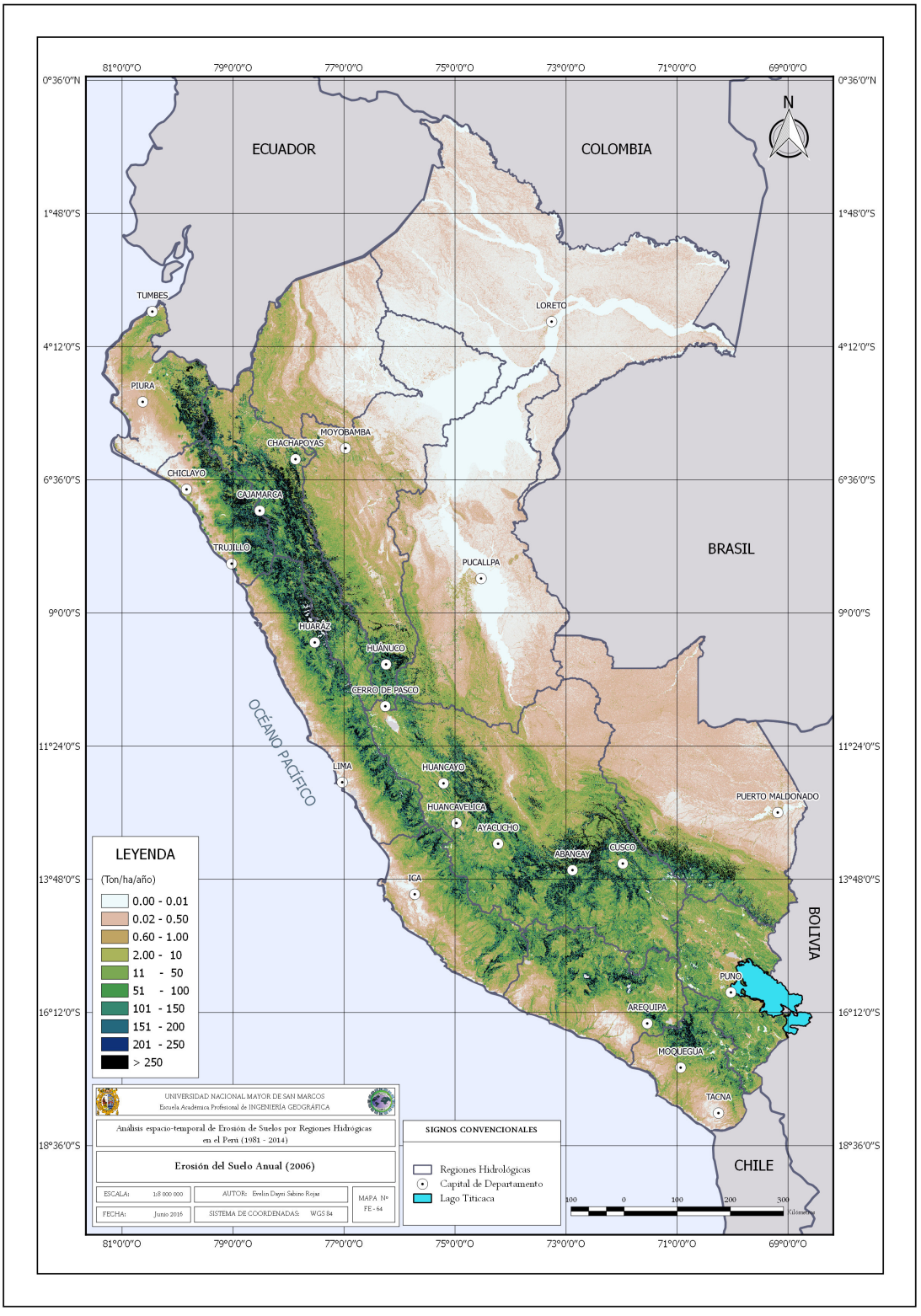


Figura 12.26: . Erosión de Suelo Anual (2006)

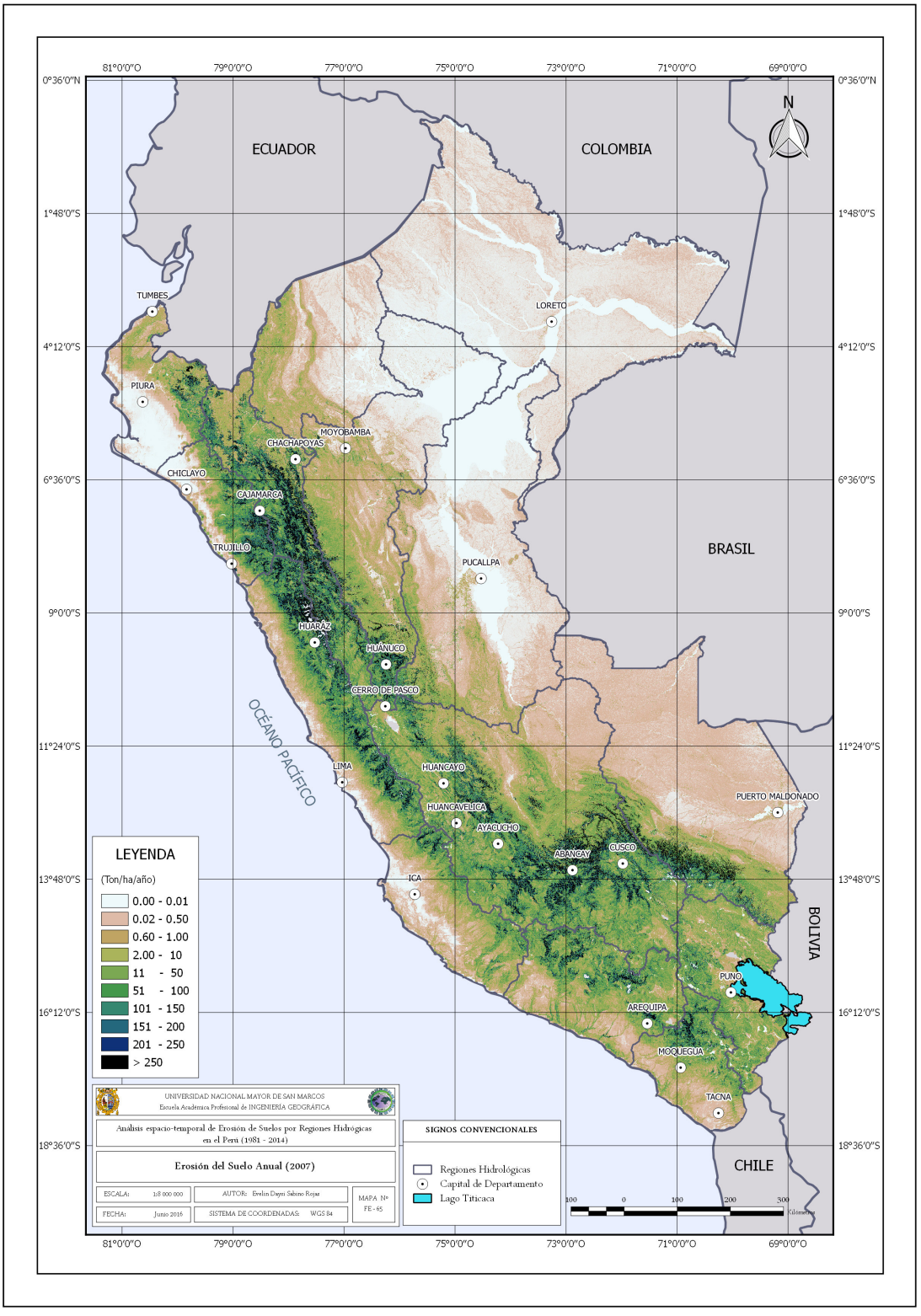


Figura 12.27: . Erosión de Suelo Anual (2007)

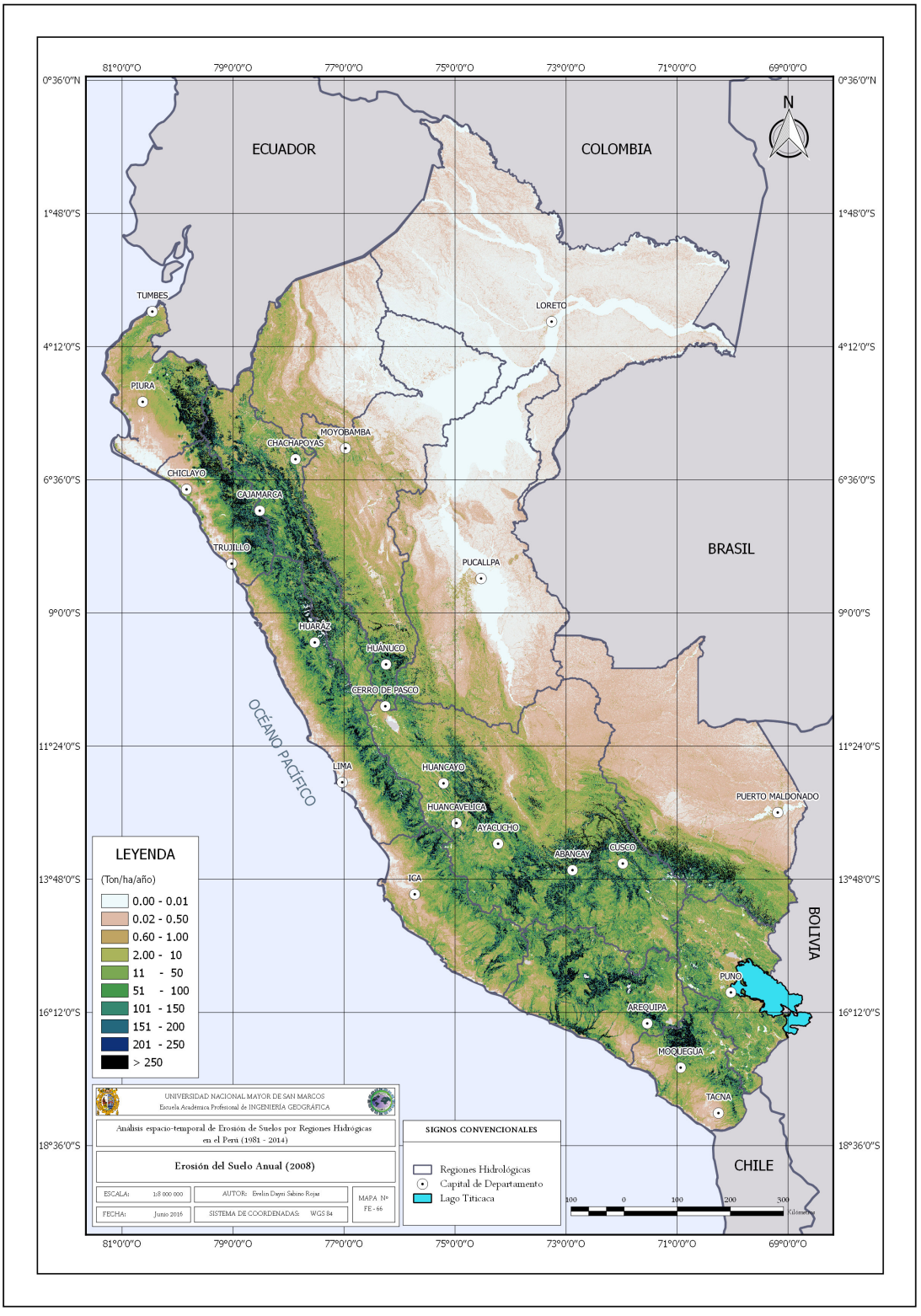


Figura 12.28: . Erosión de Suelo Anual (2008)

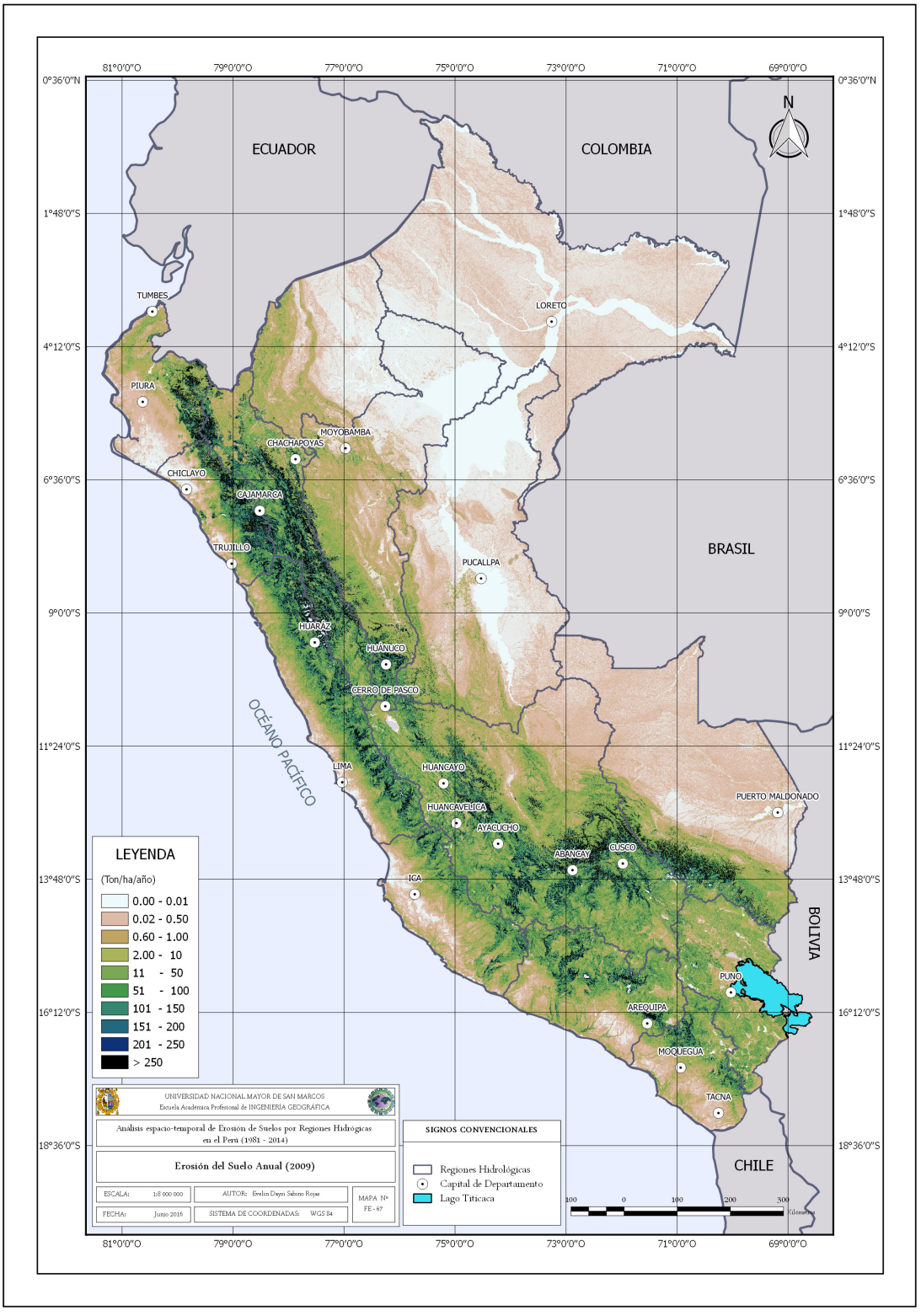


Figura 12.29: . Erosión de Suelo Anual (2009)

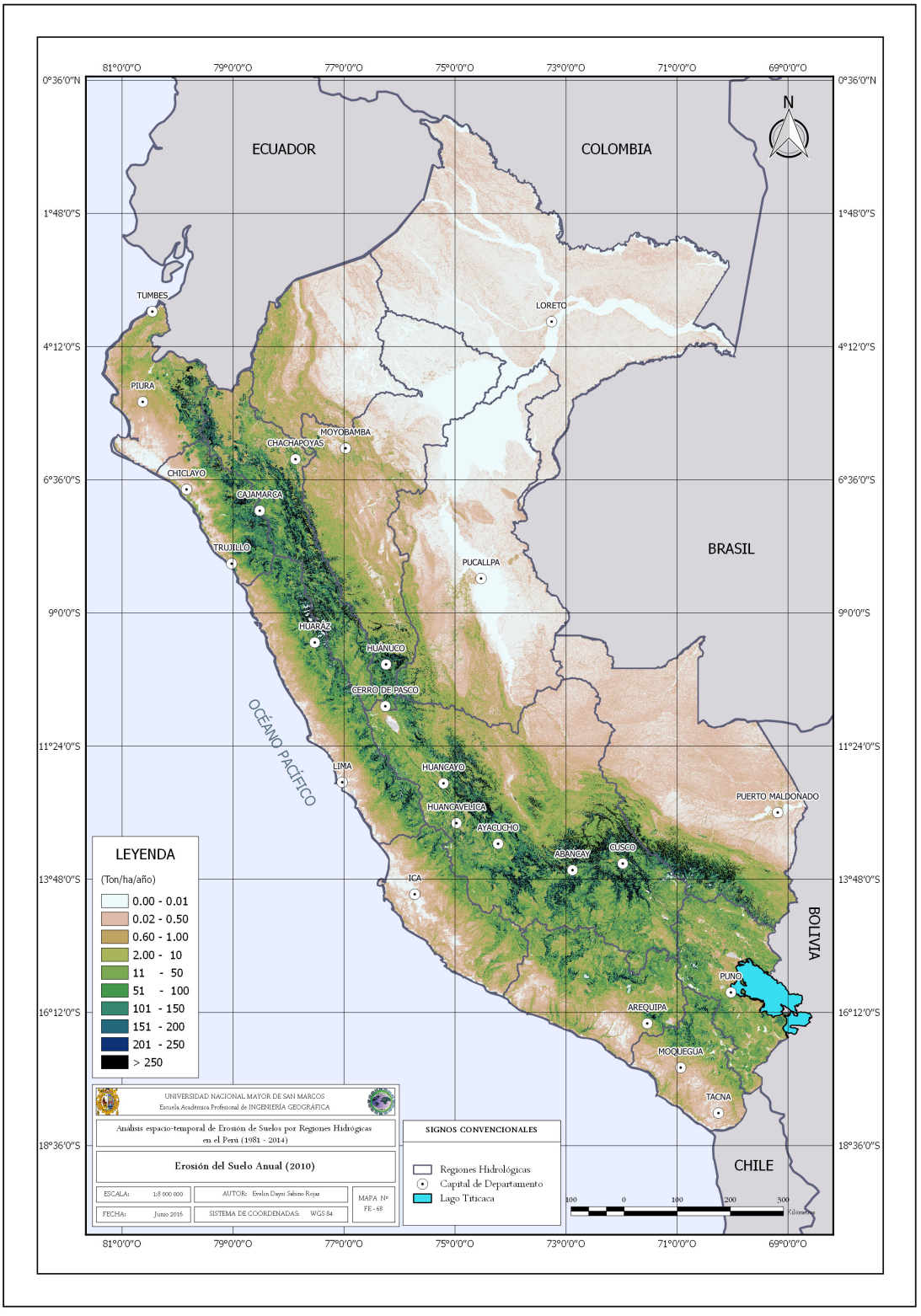


Figura 12.30: . Erosión de Suelo Anual (2010)

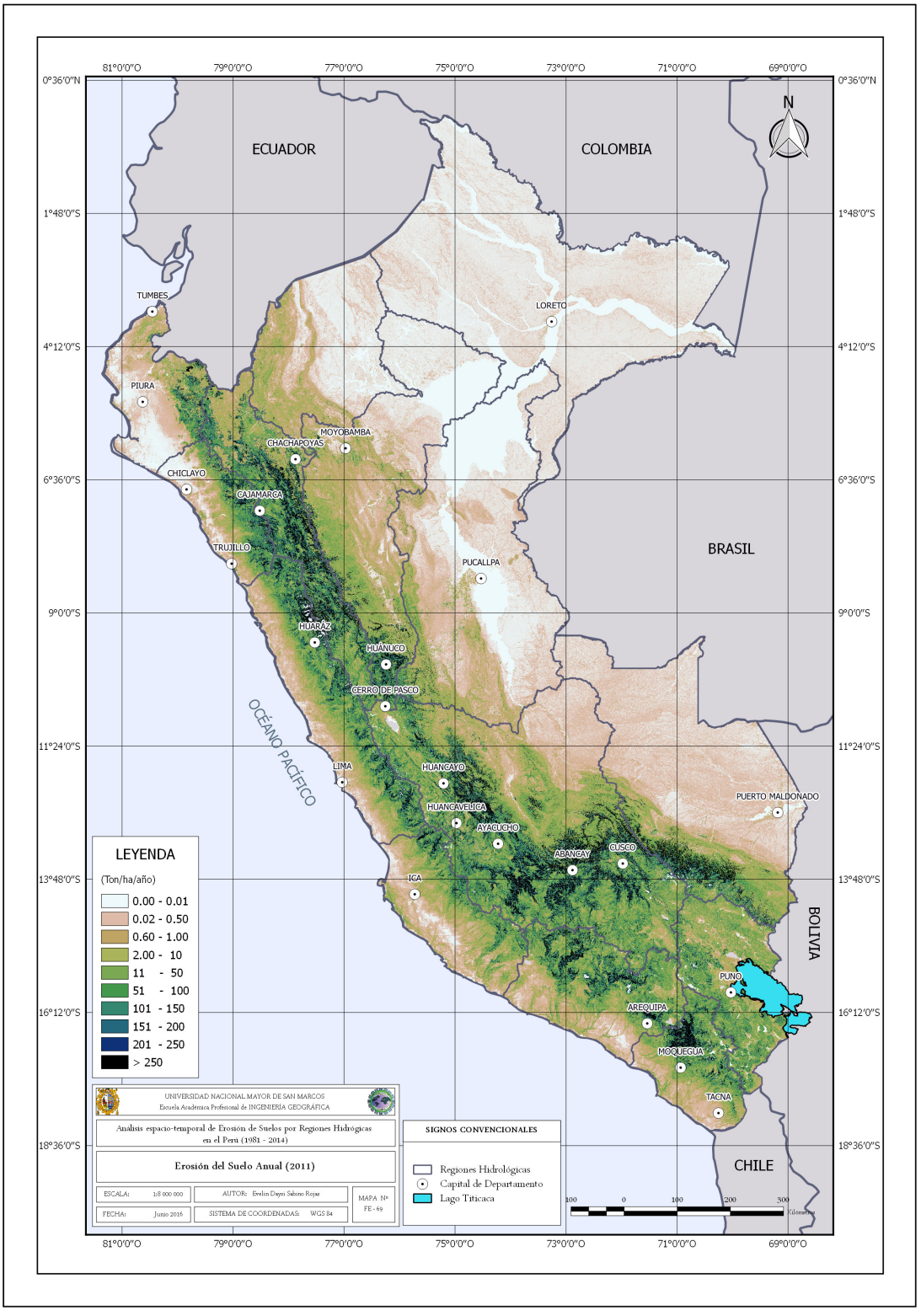


Figura 12.31: . Erosión de Suelo Anual (2011)

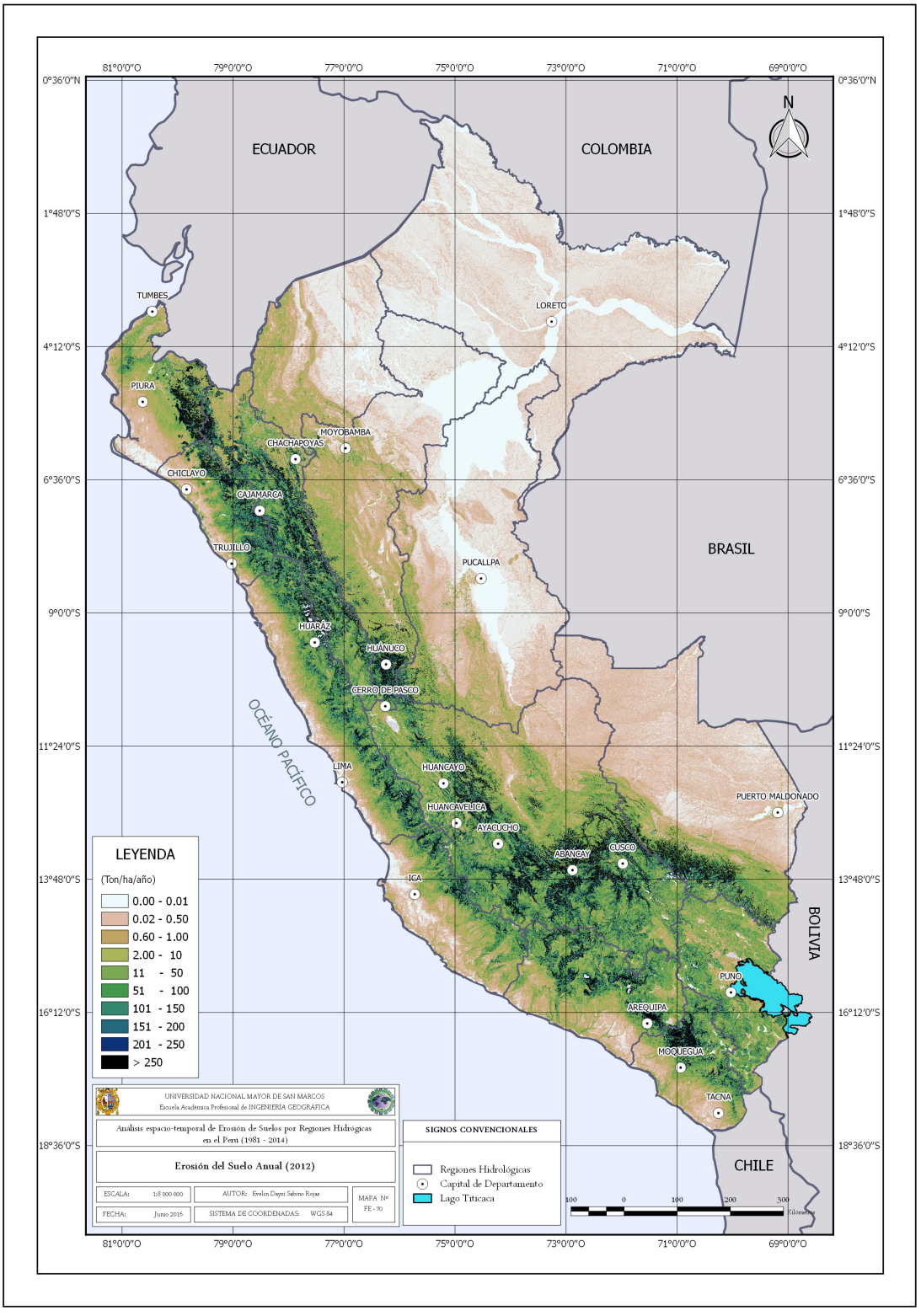


Figura 12.32: . Erosión de Suelo Anual (2012)

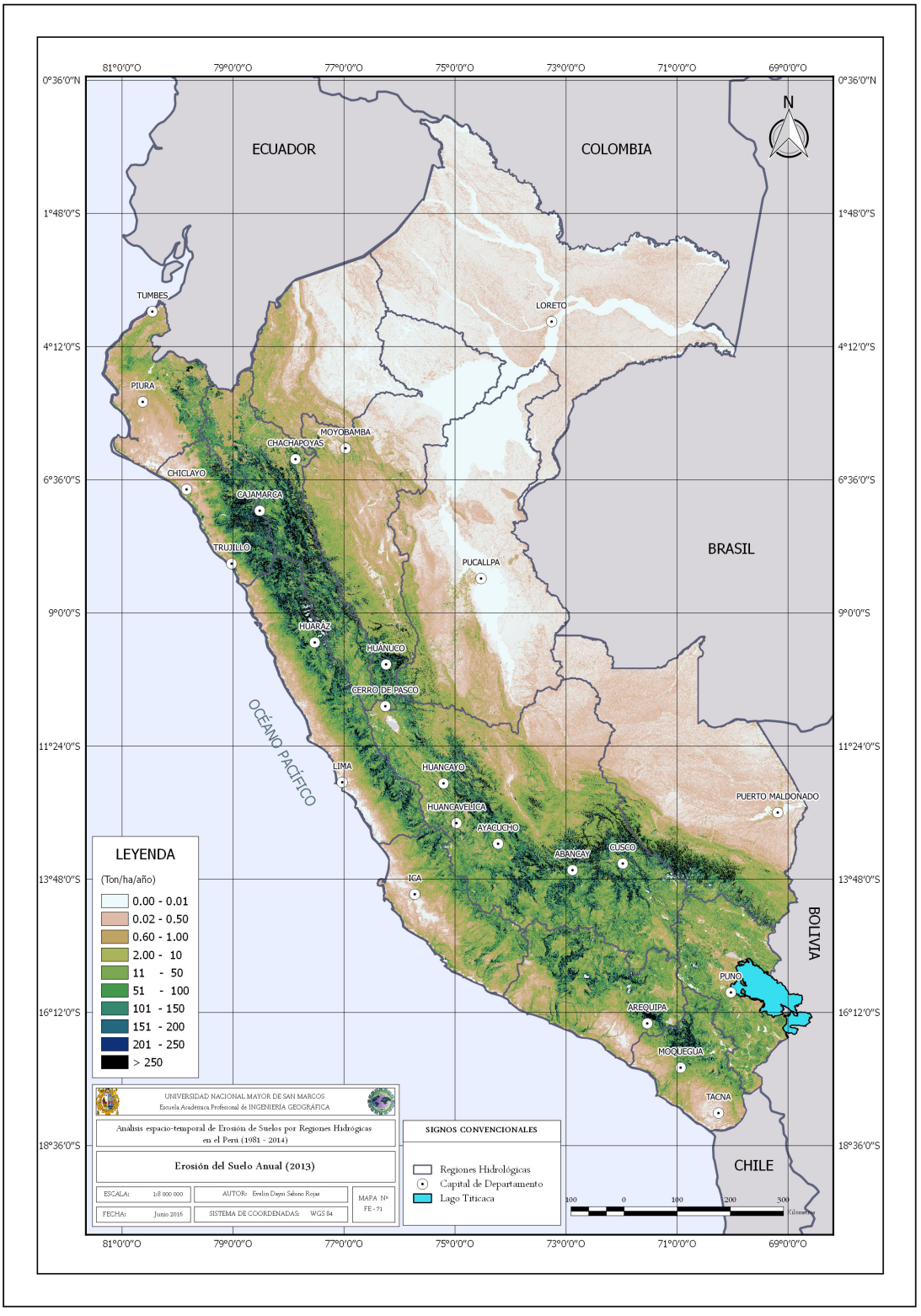


Figura 12.33: . Erosión de Suelo Anual (2013)

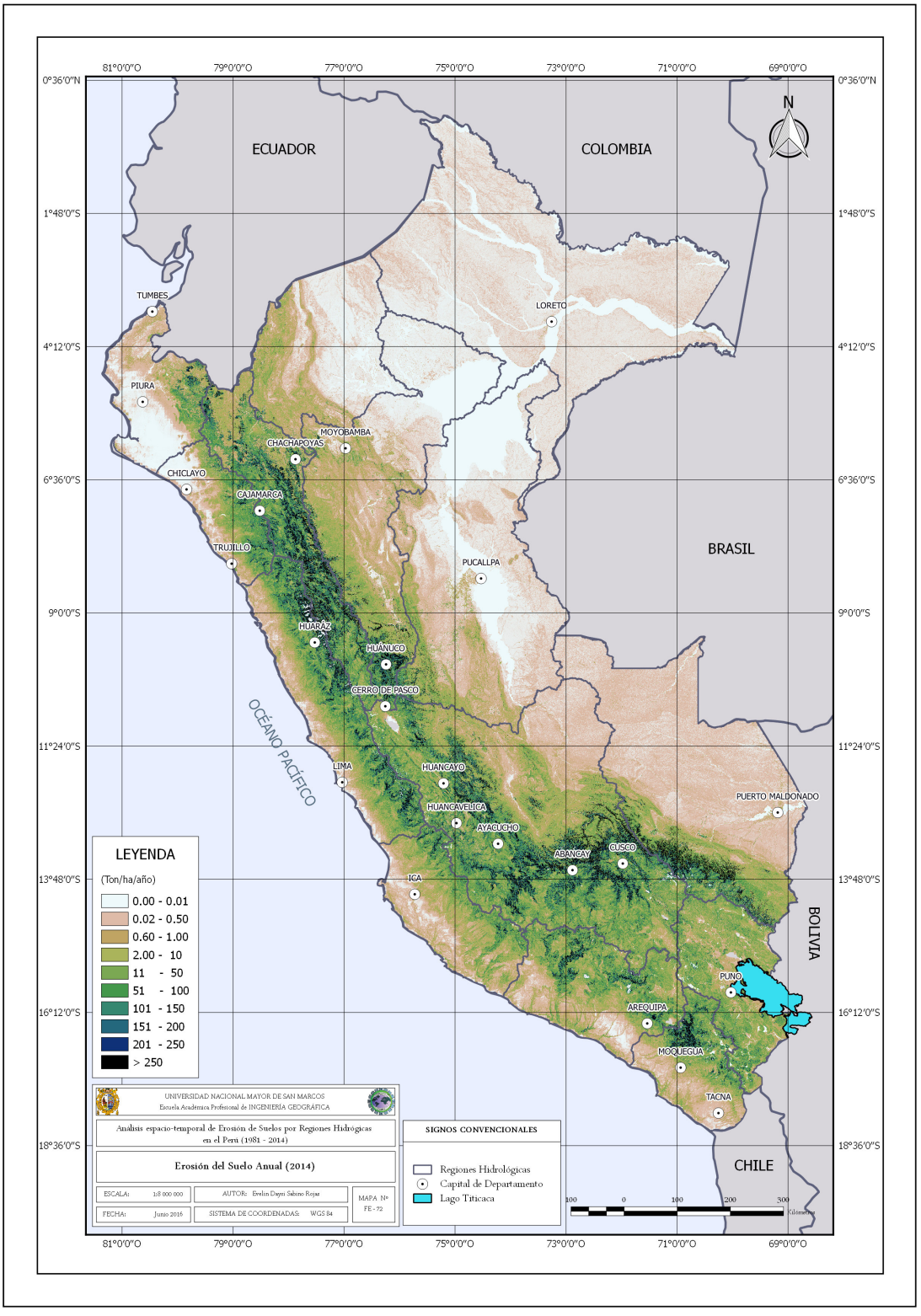


Figura 12.34: . Erosión de Suelo Anual (2014)

Bibliografía

LC Alatorre and Santiago Beguería. Los modelos de erosión: una revisión. 2009.

Rolf Derpsch, CH Roth, N Sidiras, U Kopke, R Krause, and J Blanken. *Controle da erosão no Paraná, Brasil: Sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo.* Number 245. GTZ Eschborn,, Germany, 1991.

África Dumas Salazar. Riesgo de erosión hídrica en la cuenca hidrográfica del río mundo. 2012.

Jorge Mendes MacMillan Robert A Batjes Niels H Heuvelink Gerard BM Ribeiro Eloi Samuel-Rosa Alessandro Kempen Bas Leenaars Johan GB Walsh Hengl, Tomislav and Markus G. SoilGrids1km—global soil information based on automated mapping. *PloS one*, 9(8):e105992, 2014.

Frédéric Herman, Diane Seward, Pierre G Valla, Andrew Carter, Barry Kohn, Sean D Willett, and Todd A Ehlers. Worldwide acceleration of mountain erosion under a cooling climate. *Nature*, 504(7480):423–426, 2013.

Michael J Kirkby, Royston Philip Charles Morgan, et al. *Soil erosion.* John Wiley & Sons, Ltd., 1980.

MJ Kirkby, RJA Jones, Brian Irvine, A Gobin, G Govers, O Cerdan, AJJ Van Rompaey, Y Le Bissonnais, J Daroussin, D King, et al. Pan-european soil erosion risk assessment. *The PESERA Map, Version*, 1, 2003.

Rattan Lal. Soil erosion, conservation and rehabilitation., 1996.

Rattan Lal. Soil erosion and the global carbon budget. *Environment international*, 29(4):437–450, 2003.

Eric Leroi. Landslide hazard-risk maps at different scales: objectives, tools and developments. *Landslides*, 1:35–51, 1996.

Andrew K Lucas. *Soil Erosion Analysis of Watersheds in Series*. PhD thesis, Ohio University, 2012.

Royston Philip Charles Morgan. *Soil Erosion and conservation*. John Wiley & Sons, 2009.

RPC Morgan, JN Quinton, RE Smith, Gerard Govers, JWA Poesen, K Auerswald, G Chisci, D Torri, ME Styczen, and AJV Folly. The european soil erosion model (eurosem): documentation and user guide. 1998.

G Muñoz. Erosión hídrica en la microcuenca san pedro huimilpan: Valoración integrada para su control. *Maestría en Gestión Integrada de Cuencas Universidad Autónoma De Querétaro*, pages 7–100, 2006.

Jinghu Pan and Yan Wen. Estimation of soil erosion using rusle in caijiamiao watershed, china. *Natural hazards*, 71(3):2187–2205, 2014.

JL Renard, H de Franqueville, et al. Effectiveness of crop techniques in the integrated control of oil palm vascular wilt. *Oléagineux*, 46(7):255–265, 1991.

Kenneth G Renard, George R Foster, GA Weesies, DK McCool, DC Yoder, et al. *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*, volume 703. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service Washington, 1997.

Pedro Rivera-Ruiz, José Luis Oropeza-Mota, Mario Roberto Martínez-Menes, Enrique Mejía-Sáenz, Luis Mario Tapia-Vargas, and Eusebio Ventura-Ramos Jr. El proceso lluvia-escurrimiento-erosión en laderas y microcuencas instrumentadas. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(4):151–166, 2012.

SM Tapia Muñóz. Cuantificación de la erosión hídrica superficial en las laderas semiáridas de la sierra peruana. Technical report, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima (Peru). Escuela de Postgrado. Maestría en Recursos Hídricos, 2011.

Georges Georges Viers Viers et al. *Geomorfología*. Number 551.4 VIE. 1974.

Sandra Villacorta, Lionel Fidel, and Bilberto Zavala Carrión. Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del perú. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 69.

Máximo Villón. Hidrología. *Editorial Tecnológica de Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica*, 2004.

Walter H Wischmeier. A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation. *Soil Science Society of America Journal*, 23(3):246–249, 1959.

Walter H Wischmeier, Dwight David Smith, et al. Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning. *Predicting rainfall erosion losses-A guide to conservation planning*, 1978.