



# ATLAS EÓLICO DEL PERÚ



LIMA - PERÚ  
2016



PERÚ

Ministerio  
de Energía y Minas

MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS DEL PERÚ  
Comité técnico del MINEM  
Supervisor del estudio  
Comité de calidad para la implantación en la WEB del MINEM

---

# ***SBCC-05/PROSEMER-MINEM Estudio para aprovechamiento eólico con fines energéticos y actualización del atlas eólico del Perú***

---

INFORME FINAL

CONSORCIO



BARLOVENTO  
RECURSOS NATURALES



VORTEX  
FACTORIA DE CALCULS



BARLOVENTO  
RENOVABLES LATINOAMÉRICA

LIMA – PERÚ  
2016



PERÚ

Ministerio  
de Energía y Minas

Viceministerio  
de Energía

Dirección  
General de Electricidad

## PRESENTACIÓN

En el marco de la política energética nacional, el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) como institución del Estado peruano, sigue los lineamientos de política establecidos para contar con una matriz energética diversificada, con énfasis en las fuentes renovables, y la eficiencia energética. En tal sentido el MINEM promueve el uso intensivo y eficiente de las fuentes de energía renovables convencionales y no convencionales.

Conforme dispone la normatividad vigente, con el objeto de promover la inversión en generación de electricidad con el uso de energías renovables, se declara de interés nacional y de necesidad pública el desarrollo de nueva generación eléctrica mediante el uso de recursos energéticos renovables, entre los que están comprendidos los recursos eólicos.

El MINEM tiene como objetivo Promover el desarrollo sostenible y competitivo del sector energético, priorizando la inversión privada y la diversificación de la matriz energética; a fin de asegurar el abastecimiento de los requerimientos de energía en forma eficiente y eficaz para posibilitar el desarrollo de las actividades productivas y la mejora de las condiciones de vida de la población.

En este sentido, la Dirección General de Electricidad, busca fomentar el aprovechamiento y desarrollo sostenible de los recursos energéticos renovables y no renovables, el uso racional y eficiente de la energía y el desarrollo de nuevas tecnologías para su utilización en generación de energía eléctrica.

De esta manera, en el año 2015 dentro del Programa para la Gestión Eficiente y Sostenible de los Recursos Energéticos del Perú (PROSEMER), se convocó el concurso para el desarrollo del *“Estudio para Aprovechamiento Eólico con Fines Energéticos y Actualización del Atlas Eólico del Perú”*, con el fin de actualizar el Atlas Eólico, cuyo objetivo es mejorar la estimación del potencial eólico nacional y disponer de información actualizada, orientada a promover de manera eficaz y descentralizada el uso de energía eléctrica producida con recursos eólicos.

Como resultado del estudio desarrollado se ha obtenido el Atlas Eólico del Perú 2016, el cual está conformado por los siguientes productos:

El Atlas Eólico; que es un documento que presenta la metodología utilizada para la elaboración del Atlas Eólico, así como la validación y evaluación del potencial eólico del Perú, además incluye una serie de mapas que muestran el potencial del recurso eólico a nivel nacional a diferentes alturas.

Aplicación Web-GIS del Atlas Eólico del Perú; que tiene como principal objetivo mostrar las áreas más favorables para el desarrollo de proyectos eólicos, así como presentar información del potencial disponible del recurso eólico. Adicionalmente, se ha incorporado información, en forma de capas, que permite analizar los datos de ubicación del punto seleccionado, altitud, distancias a elementos de interés, rugosidades, información sobre zonas excluyentes y áreas protegidas, entre otros.

Así mismo se ha incluido una aplicación para sistemas aislados (Micro-Renova Perú); que es una aplicación web (<http://microrenova-peru.barloventorecursos.com>), cuyo objetivo es facilitar información del funcionamiento y la operación de sistemas de energías renovables de pequeña potencia en el Perú. Esta aplicación permite obtener una primera estimación del potencial energético de un sistema de pequeña potencia, mediante energía mini-eólica en el ámbito rural o urbano para la aplicación de generación distribuida.

Dirección General de Electricidad

## CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO .....	16
1.1-	ANTECEDENTES. ATLAS EÓLICO DEL PERÚ.....	16
1.1.1.-	Antecedentes de la situación de la energía en el Perú: experiencia con aerogeneradores ITINTEC-ELECTROPERU .....	16
1.1.2.-	Antecedentes de la situación de la energía en el Perú: parques eólicos modernos de grandes dimensiones. ....	18
1.1.3.-	Potencia eólica instalada en el mundo.....	19
1.2-	OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS .....	22
1.3-	VIENTO Y ENERGÍA EÓLICA .....	23
1.3.1.-	Origen del viento. ....	23
1.3.2.-	Circulación general del viento. ....	24
1.3.3.-	Efectos locales. ....	25
1.3.4.-	Instrumentos de medición. ....	25
1.3.5.-	Distribución de direcciones: Rosa de vientos. ....	30
1.3.6.-	Variación vertical del viento. ....	31
1.3.7.-	Ley de Betz. ....	32
1.3.8.-	Distribución de Weibull.....	34
2.	METODOLOGÍA.....	36
2.1-	ATLAS EÓLICO INICIAL.....	36
2.2-	MODELO DE VIENTO Y PROCESO DE GENERACIÓN DE LOS MAPAS DE VIENTO MEDIO.....	36
2.2.1.-	Tecnología de modelado Multiescala: Modelo WRF .....	36
2.2.2.-	Núcleo del modelo.....	42
2.2.3.-	Simulaciones de Microescala.....	44
2.2.4.-	Especificaciones del modelo.....	45
2.2.5.-	Ventajas del modelo WRF .....	45
2.2.6.-	Datos de entrada del modelo.....	46
2.3-	BASES DE DATOS Y PROCESADO DE LOS DATOS EMPLEADOS .....	51
2.3.1.-	Atlas de viento.....	51
2.3.2.-	Modelo digital del terreno, Mapas de altitud y curvas de nivel .....	53
2.3.3.-	Mapa de rugosidades.....	54
2.3.4.-	Pendientes del terreno del Perú.....	55
2.3.5.-	Límites administrativos del Perú .....	56
2.3.6.-	Áreas urbanas .....	57
2.3.7.-	Principales líneas eléctricas y subestaciones del Perú .....	58
2.3.8.-	Principales unidades hidrográficas del Perú.....	59
2.3.9.-	Zonas de exclusión ambiental y arqueológica .....	60
2.3.10.-	Vías de transporte y comunicación del Perú .....	61
2.3.11.-	Resumen del estado de la información necesaria .....	62
2.4-	METODOLOGÍA PARA OBTENER LAS PRINCIPALES VARIABLES .....	68
2.4.1.-	Velocidad del viento .....	68
2.4.2.-	Densidad del aire .....	68
2.4.3.-	Densidad de potencia del viento .....	68
2.4.4.-	Dirección del viento .....	69
2.4.5.-	Distribución en frecuencias de la velocidad del viento y parámetros de Weibull .....	69
2.4.6.-	Intensidad de turbulencia media .....	70
2.5-	PRODUCCIÓN ANUAL MEDIA .....	70
2.5.1.-	Curva de Potencia.....	70
2.5.2.-	Producción anual esperada .....	71
2.5.3.-	Curva de Potencia.....	72
2.5.4.-	Corrección por densidad.....	74
2.6-	MODELO DE EXTRAPOLACIÓN VERTICAL ENTRE NIVELES INTERMEDIOS.....	74
2.7-	INCERTIDUMBRE Y FACTORES QUE AFECTAN A LA PRECISIÓN EN LA ESTIMACIÓN DEL VIENTO MEDIO .....	75
2.8-	CONSIDERACIONES EN LA LECTURA DE MAPAS.....	76
3.	ANÁLISIS, RESULTADOS Y VALIDACIÓN DEL ATLAS EÓLICO .....	77
3.1-	CAMPAÑA DE MEDIDAS .....	77
3.2-	PLANIFICACIÓN DE LA CAMPAÑA DE MEDIDAS. SELECCIÓN DE EMPLAZAMIENTO .....	77

3.3-	ACUERDOS CON PROPIETARIOS Y VISITAS PRELIMINARES .....	84
3.4-	CONFIGURACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDIDA .....	84
3.4.1.-	Torres meteorológicas.....	84
3.4.2.-	Sistema de medida remota: SODAR .....	86
3.5-	INSTALACIÓN DE LAS TORRES METEOROLÓGICAS .....	87
3.5.1.-	Emplazamiento PAMOC .....	87
3.5.2.-	Emplazamiento LA MEJORADA .....	90
3.5.3.-	Emplazamiento LA JOYA.....	93
3.6-	INSTALACIÓN DEL SODAR .....	96
3.7-	GESTIÓN DE LOS DATOS DE LA CAMPAÑA DE MEDIDAS.....	101
3.8-	CAMPAÑA DE MEDIDAS: VALIDACIÓN .....	101
4.	DESCRIPCIÓN REGIONAL DEL POTENCIAL EÓLICO EN EL PERÚ .....	102
4.1-	POTENCIAL EÓLICO DESARROLLADO.....	102
4.2-	POTENCIAL EÓLICO TOTAL.....	103
4.3-	POTENCIAL EÓLICO APROVECHABLE .....	103
4.4-	POTENCIAL EÓLICO EXCLUÍDO.....	103
5.	ATLAS EÓLICO DEL PERÚ .....	105
5.1-	RESUMEN .....	105
5.2-	TRABAJOS DESARROLLADOS .....	105
5.3-	PRODUCTOS FINALES .....	106
	ANEXO A.REFERENCIAS Y FUENTES DE DATOS .....	108
	ANEXO B.GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	110
	ANEXO C.MAPAS DEL TERRENO .....	112
C.1.	TOPOGRAFÍA DEL TERRENO .....	113
C.2.	RUGOSIDAD DEL TERRENO .....	114
C.3.	PENDIENTE DEL TERRENO .....	115
	ANEXO D.MAPAS DE PARÁMETROS DE WEIBULL .....	116
D.1.	FACTOR DE ESCALA DE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL A 10 m .....	117
D.2.	FACTOR DE FORMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL A 10 m.....	118
D.3.	FACTOR DE ESCALA DE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL A 25 m .....	119
D.4.	FACTOR DE FORMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL A 25 m.....	120
D.5.	FACTOR DE ESCALA DE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL A 75 m .....	121
D.6.	FACTOR DE FORMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL A 75 m.....	122
D.7.	FACTOR DE ESCALA DE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL A 100 m .....	123
D.8.	FACTOR DE FORMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL A 100 m.....	124
D.9.	FACTOR DE ESCALA DE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL A 125 m .....	125
D.10.	FACTOR DE FORMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL A 125 m.....	126
	ANEXO E.MAPAS DE POTENCIAL EÓLICO ANUALES.....	127
E.1.	VELOCIDAD MEDIA ANUAL DEL VIENTO A 10 m .....	128
E.2.	VELOCIDAD MEDIA ANUAL DEL VIENTO A 25 m .....	129
E.3.	VELOCIDAD MEDIA ANUAL DEL VIENTO A 75 m .....	130
E.4.	VELOCIDAD MEDIA ANUAL DEL VIENTO A 100 m.....	131
E.5.	VELOCIDAD MEDIA ANUAL DEL VIENTO A 125 m.....	132
E.6.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA ANUAL DEL VIENTO A 10 m.....	133
E.7.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA ANUAL DEL VIENTO A 25 m.....	134
E.8.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA ANUAL DEL VIENTO A 75 m.....	135
E.9.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA ANUAL DEL VIENTO A 100 m.....	136
E.10.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA ANUAL DEL VIENTO A 125 m.....	137
	ANEXO F.MAPAS DE POTENCIAL EÓLICO MENSUALES (10m).....	138
F.1.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN ENERO A 10 m .....	139
F.2.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN FEBRERO A 10 m.....	140
F.3.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN MARZO A 10 m.....	141
F.4.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN ABRIL A 10 m.....	142
F.5.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN MAYO A 10 m .....	143
F.6.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN JUNIO A 10 m .....	144
F.7.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN JULIO A 10 m.....	145
F.8.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN AGOSTO A 10 m.....	146
F.9.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN SEPTIEMBRE A 10 m.....	147
F.10.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN OCTUBRE A 10 m .....	148
F.11.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN NOVIEMBRE A 10 m .....	149

F.12.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN DICIEMBRE A 10 m.....	150
F.13.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN ENERO A 10 m.....	151
F.14.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN FEBRERO A 10 m.....	152
F.15.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN MARZO A 10 m.....	153
F.16.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN ABRIL A 10 m.....	154
F.17.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN MAYO A 10 m.....	155
F.18.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN JUNIO A 10 m.....	156
F.19.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN JULIO A 10 m.....	157
F.20.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN AGOSTO A 10 m.....	158
F.21.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN SEPTIEMBRE A 10 m.....	159
F.22.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN OCTUBRE A 10 m.....	160
F.23.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN NOVIEMBRE A 10 m.....	161
F.24.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN DICIEMBRE A 10 m.....	162
	ANEXO G.MAPAS DE POTENCIAL EÓLICO MENSUALES (25m).....	163
G.1.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN ENERO A 25 m.....	164
G.2.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN FEBRERO A 25 m.....	165
G.3.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN MARZO A 25 m.....	166
G.4.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN ABRIL A 25 m.....	167
G.5.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN MAYO A 25 m.....	168
G.6.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN JUNIO A 25 m.....	169
G.7.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN JULIO A 25 m.....	170
G.8.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN AGOSTO A 25 m.....	171
G.9.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN SEPTIEMBRE A 25 m.....	172
G.10.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN OCTUBRE A 25 m.....	173
G.11.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN NOVIEMBRE A 25 m.....	174
G.12.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN DICIEMBRE A 25 m.....	175
G.13.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN ENERO A 25 m.....	176
G.14.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN FEBRERO A 25 m.....	177
G.15.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN MARZO A 25 m.....	178
G.16.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN ABRIL A 25 m.....	179
G.17.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN MAYO A 25 m.....	180
G.18.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN JUNIO A 25 m.....	181
G.19.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN JULIO A 25 m.....	182
G.20.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN AGOSTO A 25 m.....	183
G.21.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN SEPTIEMBRE A 25 m.....	184
G.22.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN OCTUBRE A 25 m.....	185
G.23.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN NOVIEMBRE A 25 m.....	186
G.24.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN DICIEMBRE A 25 m.....	187
	ANEXO H.MAPASDE POTENCIAL EÓLICO MENSUALES (75m).....	188
H.1.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN ENERO A 75 m.....	189
H.2.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN FEBRERO A 75 m.....	190
H.3.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN MARZO A 75 m.....	191
H.4.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN ABRIL A 75 m.....	192
H.5.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN MAYO A 75 m.....	193
H.6.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN JUNIO A 75 m.....	194
H.7.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN JULIO A 75 m.....	195
H.8.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN AGOSTO A 75 m.....	196
H.9.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN SEPTIEMBRE A 75 m.....	197
H.10.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN OCTUBRE A 75 m.....	198
H.11.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN NOVIEMBRE A 75 m.....	199
H.12.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN DICIEMBRE A 75 m.....	200
H.13.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN ENERO A 75 m.....	201
H.14.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN FEBRERO A 75 m.....	202
H.15.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN MARZO A 75 m.....	203
H.16.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN ABRIL A 75 m.....	204
H.17.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN MAYO A 75 m.....	205
H.18.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN JUNIO A 75 m.....	206
H.19.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN JULIO A 75 m.....	207
H.20.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN AGOSTO A 75 m.....	208
H.21.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN SEPTIEMBRE A 75 m.....	209

H.22.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN OCTUBRE A 75 m .....	210
H.23.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN NOVIEMBRE A 75 m .....	211
H.24.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN DICIEMBRE A 75 m.....	212
ANEXO I.MAPAS DE POTENCIAL EÓLICO MENSUALES (100m) .....		213
I.1.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN ENERO A 100 m .....	214
I.2.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN FEBRERO A 100 m.....	215
I.3.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN MARZO A 100 m .....	216
I.4.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN ABRIL A 100 m.....	217
I.5.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN MAYO A 100 m .....	218
I.6.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN JUNIO A 100 m .....	219
I.7.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN JULIO A 100 m.....	220
I.8.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN AGOSTO A 100 m.....	221
I.9.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN SEPTIEMBRE A 100 m.....	222
I.10.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN OCTUBRE A 100 m .....	223
I.11.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN NOVIEMBRE A 100 m .....	224
I.12.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN DICIEMBRE A 100 m.....	225
I.13.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN ENERO A 100 m.....	226
I.14.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN FEBRERO A 100 m .....	227
I.15.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN MARZO A 100 m.....	228
I.16.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN ABRIL A 100 m .....	229
I.17.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN MAYO A 100 m .....	230
I.18.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN JUNIO A 100 m.....	231
I.19.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN JULIO A 100 m .....	232
I.20.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN AGOSTO A 100 m .....	233
I.21.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN SEPTIEMBRE A 100 m .....	234
I.22.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN OCTUBRE A 100 m.....	235
I.23.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN NOVIEMBRE A 100 m.....	236
I.24.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN DICIEMBRE A 100 m.....	237
ANEXO J.MAPAS DE POTENCIAL EÓLICO MENSUALES (125m) .....		238
J.1.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN ENERO A 125 m .....	239
J.2.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN FEBRERO A 125 m.....	240
J.3.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN MARZO A 125 m .....	241
J.4.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN ABRIL A 125 m.....	242
J.5.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN MAYO A 125 m .....	243
J.6.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN JUNIO A 125 m .....	244
J.7.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN JULIO A 125 m.....	245
J.8.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN AGOSTO A 125 m.....	246
J.9.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN SEPTIEMBRE A 125 m.....	247
J.10.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN OCTUBRE A 125 m .....	248
J.11.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN NOVIEMBRE A 125 m .....	249
J.12.	VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN DICIEMBRE A 125 m.....	250
J.13.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN ENERO A 125 m.....	251
J.14.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN FEBRERO A 125 m .....	252
J.15.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN MARZO A 125 m.....	253
J.16.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN ABRIL A 1 m .....	254
J.17.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN MAYO A 125 m .....	255
J.18.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN JUNIO A 125 m.....	256
J.19.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN JULIO A 125 m .....	257
J.20.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN AGOSTO A 125 m .....	258
J.21.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN SEPTIEMBRE A 125 m .....	259
J.22.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN OCTUBRE A 125 m.....	260
J.23.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN NOVIEMBRE A 125 m.....	261
J.24.	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN DICIEMBRE A 125 m.....	262

## FIGURAS

Figura 1. Esquema de trabajo para la Fase 1. ....	11
Figura 2. Esquema de trabajo para la Fase 2. ....	12
Figura 3. Esquema de trabajo para la Fase 3. ....	13
Figura 4. Aplicación Web-GIS del Atlas Eólico del Perú. ....	14
Figura 5. Aplicación Micro-Renova Perú para sistemas aislados. ....	15
Figura 6. Se muestra los cimientos de un de los aerogeneradores ubicado en la parte alta de Yasila (bahía de Paita) y la orografía del entorno. Año 2016. ....	17
Figura 7. La foto muestra la caseta donde se encontraban los bancos de baterías y otros suministros. Año 2016. ....	17
Figura 8. La foto muestra la casa del personal de mantenimiento y la caseta donde se ubicaron los bancos de baterías y otros suministros. Año 2016. ....	18
Figura 9. Potencia eólica anual instalada en el mundo (2000 – 2015). ....	20
Figura 10. Potencia eólica total instalada en el mundo (2000 – 2015). ....	20
Figura 11. Potencia eólica anual instalada en el mundo por regiones (2007 – 2015). ....	20
Figura 12. Predicción de la potencia eólica anual instalada en el mundo por regiones (2015 – 2020). ....	21
Figura 13. Capas de la atmósfera. ....	23
Figura 14. Anemómetro de cazoletas. ....	26
Figura 15. Veleta. ....	27
Figura 16. Ejemplo de SODAR. ....	28
Figura 17. Ejemplo de LIDAR. ....	29
Figura 18. Termohigrómetro. ....	30
Figura 19. Ejemplo de Rosa de viento. ....	31
Figura 20. Flujo a través de un disco. ....	32
Figura 21. Flujo a través del rotor de un aerogenerador. ....	33
Figura 22. Límite de Betz. ....	34
Figura 23. Diferentes resoluciones de mallado. ....	38
Figura 24. Diferentes resoluciones espaciales de un modelo. ....	38
Figura 25. Resolución del Atlas Eólico del Perú sobre el área de Cajamarca. ....	39
Figura 26. Modelo Eta: Temperatura (°C), Humedad Relativa (%) y Velocidad del viento a 850 mb. .	40
Figura 27. Esquema básico de la preparación de la simulación en WRF. ....	42
Figura 28. Esquema de funcionamiento del modelo WRF. ....	43
Figura 29. Ejemplo de downscaling con diferentes dominios en WRF. ....	44
Figura 30. Ejemplo de downscaling en Perú usando VORTEX (9 km → 1 km). ....	44
Figura 31. Datos de reanálisis empleados por el modelo. ....	47
Figura 32. Uso de datos en el modelo WRF. ....	47
Figura 33. Cobertura de datos del SRTM. ....	48
Figura 34. Base de datos ESA GLOBCOVER en Sudamérica. ....	49
Figura 35. Metodología del modelado del Atlas Eólico. ....	50
Figura 36. Mapa velocidad media anual del viento a 100 m (UMT-WGS84-S18). ....	52
Figura 37. Topografía digital del Perú empleada. SRTM (UTM-WGS84-S18). ....	53
Figura 38. Mapa de rugosidades del terreno en metros (UTM-WGS84-S18). ....	54
Figura 39. Mapa de pendientes del terreno del Perú (UTM-WGS84-S18). ....	55
Figura 40. Mapa de límites administrativos del Perú (UMT-WGS84-S18). ....	56
Figura 41. Mapa de centros poblados y áreas urbanas del Perú (UTM-WGS84-S18). ....	57
Figura 42. Mapa de las principales SET y LAT del Perú (UTM-WGS84-S18). ....	58
Figura 43. Mapa de las principales cuencas hidrográficas del Perú (UTM-WGS84-S18). ....	59
Figura 44. Mapa de las Áreas Naturales Protegidas del Perú (UTM-WGS84-S18). ....	60
Figura 45. Mapa de las principales vías de comunicación del Perú (UTM-WGS84-S18). ....	61
Figura 46. Ejemplo de distribución de frecuencias por dirección (rosa de los vientos) que puede ser obtenida para cada punto del Atlas. ....	69
Figura 47. Ejemplo de histograma de velocidades con parámetros de Weibull. ....	70
Figura 48. Esquema del cálculo de la producción. ....	72
Figura 49. Ejemplo: Zonificación topográfica del Perú. ....	77
Figura 50. Atlas Eólico del Perú a 100 m (resolución 1 km). ....	79
Figura 51. Sistema eléctrico interconectado nacional (agosto 2015). La ubicación de los parques eólicos existentes en el país aparece rodeada en rojo. ....	80
Figura 52. Esquema de selección de emplazamientos de medida para validación. ....	82
Figura 53. Zonas de medida. (Atlas Eólico a 100 m, resolución 1 km). ....	83
Figura 54. Esquema de torre meteorológica de 20 metros. ....	85
Figura 55. Esquema de funcionamiento de un SODAR. ....	86



Figura 56. Área de instalación de la torre PAMOC.....	87
Figura 57. Torre meteorológica PAMOC.....	88
Figura 58. Fotografía desde la torre PAMOC hacia el NE.....	89
Figura 59. Fotografía desde la torre PAMOC hacia el SO.....	89
Figura 60. Área de instalación de la torre LA MEJORADA.....	90
Figura 61. Torre meteorológica LA MEJORADA.....	91
Figura 62. Fotografía desde la torre LA MEJORADA hacia el E.....	92
Figura 63. Fotografía desde la torre LA MEJORADA hacia el O.....	92
Figura 64. Área de instalación de la torre LA JOYA.....	93
Figura 65. Torre meteorológica LA JOYA.....	94
Figura 66. Fotografía desde la torre LA JOYA hacia el E.....	95
Figura 67. Fotografía desde la torre LA JOYA hacia el O.....	95
Figura 68. Área de instalación del SODAR.....	99
Figura 69. Sistema de medición remota SODAR.....	99
Figura 70. Fotografía desde el SODAR hacia el E.....	100
Figura 71. Fotografía desde el SODAR hacia el O.....	100
Figura 72. Acreditaciones en campaña de medidas de Barlovento.....	101

## TABLAS

Tabla 1. Parques eólicos en operación en el Perú.....	19
Tabla 2. Parques eólicos adjudicados en la Cuarta Subasta de Suministro de Electricidad con Recursos Energéticos Renovables al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN).....	19
Tabla 3. Capas de la Atmósfera.....	23
Tabla 4. Clasificación de los fenómenos atmosféricos más relevantes en función de su escala espacio-temporal).....	37
Tabla 5. Características del modelo ETA/SENAMHI.....	40
Tabla 6. Ventajas y desventajas del modelo WRF.....	46
Tabla 7. Información (bases de datos) empleadas en la elaboración del Atlas Eólico.....	62
Tabla 8. Información (bases de datos) incluidas en la aplicación Web-GIS (visualizable, consultable o que será entregada al MINEM).....	65
Tabla 9. Clasificación de la densidad de potencia del viento.....	68
Tabla 10. Clase de emplazamiento empleadas en la aplicación Web-GIS.....	71
Tabla 11. Empleo de curvas de potencia según IEC (densidad 1.12 kg/m <sup>3</sup> ).....	73
Tabla 12. Coordenadas de la torre PAMOC (UTM – WGS84, Zona 17).....	87
Tabla 13. Configuración de la torre PAMOC.....	87
Tabla 14. Coordenadas de la torre LA MEJORADA (UTM – WGS84, Zona 18).....	90
Tabla 15. Configuración de la torre LA MEJORADA.....	90
Tabla 16. Coordenadas preliminares de la torre LA JOYA (UTM – WGS84, Zona 19).....	93
Tabla 17. Configuración de la torre LA JOYA.....	93
Tabla 18. Coordenadas preliminares del SODAR (UTM – WGS84, Zona 18).....	96
Tabla 19. Configuración del SODAR.....	96
Tabla 20. Especificaciones técnicas del SODAR.....	97
Tabla 21. Potencial eólico en operación y desarrollo en la actualidad (año 2016).....	102
Tabla 22. Potencial eólico desarrollado en el Perú por Departamento.....	102
Tabla 23. Potencial eólico (MW) en el Perú (100 m) según el Atlas Eólico.....	104
Tabla 24. Referencias y fuentes de datos.....	108
Tabla 25. Glosario de términos por orden alfabético empleados en el documento.....	110

## RESUMEN EJECUTIVO

El Ministerio de Energía y Minas del Perú (MINEM) como institución del Estado peruano, tiene entre otras funciones, la de actualizar el inventario de recursos energéticos disponibles para la generación de electricidad y promover la inversión en proyectos de generación eléctrica, principalmente para el aprovechamiento de fuentes de energía renovable como la energía eólica. Al respecto, cada cierto periodo y basado en criterios de regulación y de la política energética del sector, el MINEM impulsa el desarrollo de subastas de suministro de electricidad con fuentes de energía renovable, promoviendo así también el desarrollo de parques eólicos para la generación de electricidad.

En el año 2008, el MINEM elaboró un estudio preliminar para determinar el potencial eólico a nivel nacional a través del desarrollo de un Atlas Eólico. Dicho estudio se realizó basado en técnicas de modelización meso y microescalares, combinando la utilización de un modelo de simulación atmosférica para reproducir los patrones de viento a gran escala, a través de un modelo de viento microescalar que responda a las características del terreno y la topografía.

El objetivo del presente Atlas Eólico es actualizar el anterior realizado en el año 2008 así como promover el fortalecimiento de las capacidades del sector para evaluar el aprovechamiento de la energía eólica con fines energéticos.

Para ello el CONSORCIO formado por las empresas Barlovento Recursos Naturales, S.L., Barlovento Renovables Latinoamérica, SAC y Vortex Factoría de Calculs, S.L. ha llevado a cabo, a lo largo de los 11 meses que ha durado el proyecto, una serie de trabajos para el desarrollo del Atlas Eólico que han sido divididos en tres fases. Todos estos trabajos han sido coordinados entre el CONSORCIO y el MINEM. A continuación, se resumen estos trabajos.

### Fase 1: Elaboración del Atlas Eólico

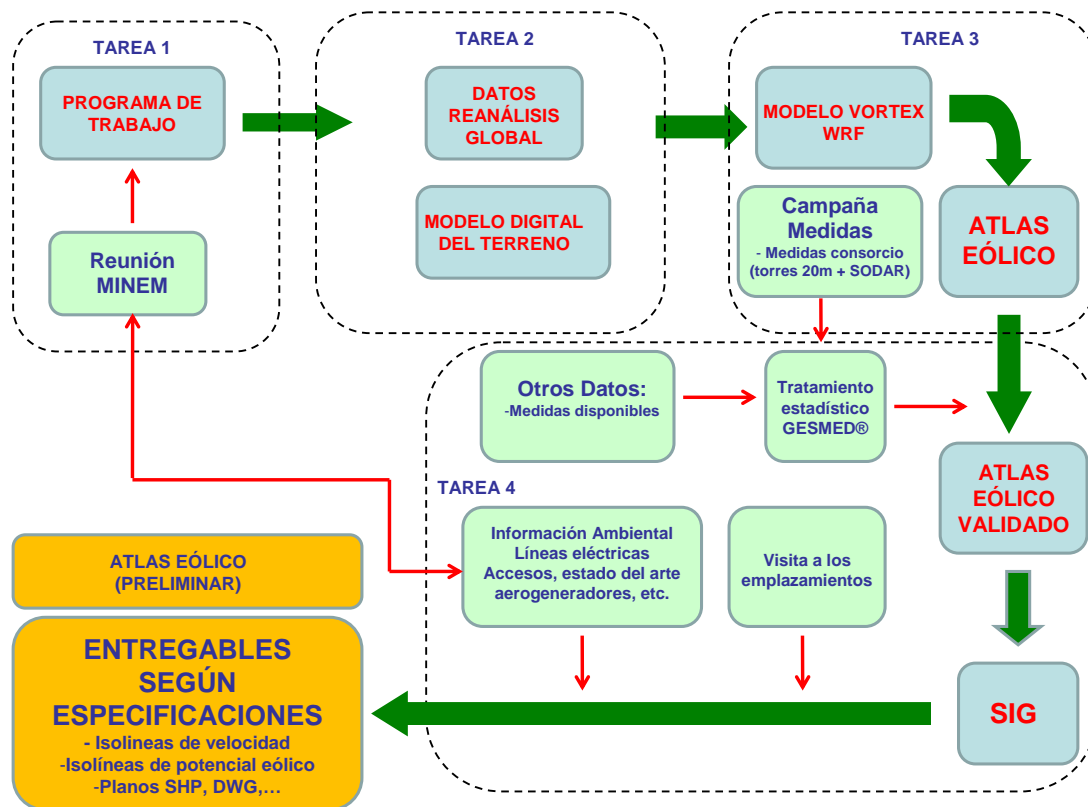
En esta fase se han llevado a cabo, entre otras, las siguientes actividades:

- i. Elaboración de un programa de trabajo detallado, incluyendo la estructura de la base de datos.
- ii. Descripción de los procedimientos de operación empleados para la elaboración de los trabajos.
- iii. Cronograma detallado de actividades.
- iv. Desarrollo completo de la metodología de trabajo.
- v. Elaboración de un informe que contiene la lista y descripción de la información técnica necesaria para el estudio, así como el plan de trabajo para el desarrollo del estudio.
- vi. Elaboración de un informe que contiene la metodología para el desarrollo del Atlas Eólico actualizado y del Plan de Requerimientos.
- vii. Identificación de fuentes de datos necesarios para la elaboración del Atlas Eólico y evaluación de su calidad.
- viii. Procesado de la información disponible.
- ix. Elección y justificación del periodo de datos que sirve como entrada para la ejecución del modelo meteorológico.
- x. Estudio de la validez del periodo de datos utilizado de forma que sea representativo de las condiciones atmosféricas esperadas a largo plazo.
- xi. Modelización a nivel de mesoescala con resolución de 1 km mediante el modelo WRF.
- xii. Elaboración de un informe de avance de trabajo de gabinete que incluye recopilación de información disponible para el estudio.
- xiii. Clasificación de la densidad de potencia del viento.
- xiv. Elaboración del Atlas Eólico Actualizado en formato digital (aplicación Web-GIS).
- xv. Campaña de medidas para la validación el Atlas Eólico (3 torres meteorológicas de medida de 20 metros de altura y un sistema de medición remota SODAR).

- xvi. Elaboración de un informe de avance de trabajo que incluye los avances de trabajos de campo realizados.
- xvii. Identificación de las zonas y emplazamientos de mayor interés para el desarrollo de fases posteriores.
- xviii. Elaboración de una aplicación para sistemas eólicos de pequeña potencia.
- xix. Control de calidad de todo el proceso de elaboración del Atlas Eólico.

El esquema de trabajo de la Fase 1 puede verse en la siguiente figura:

Figura 1. Esquema de trabajo para la Fase 1.



Fuente: Elaboración propia.

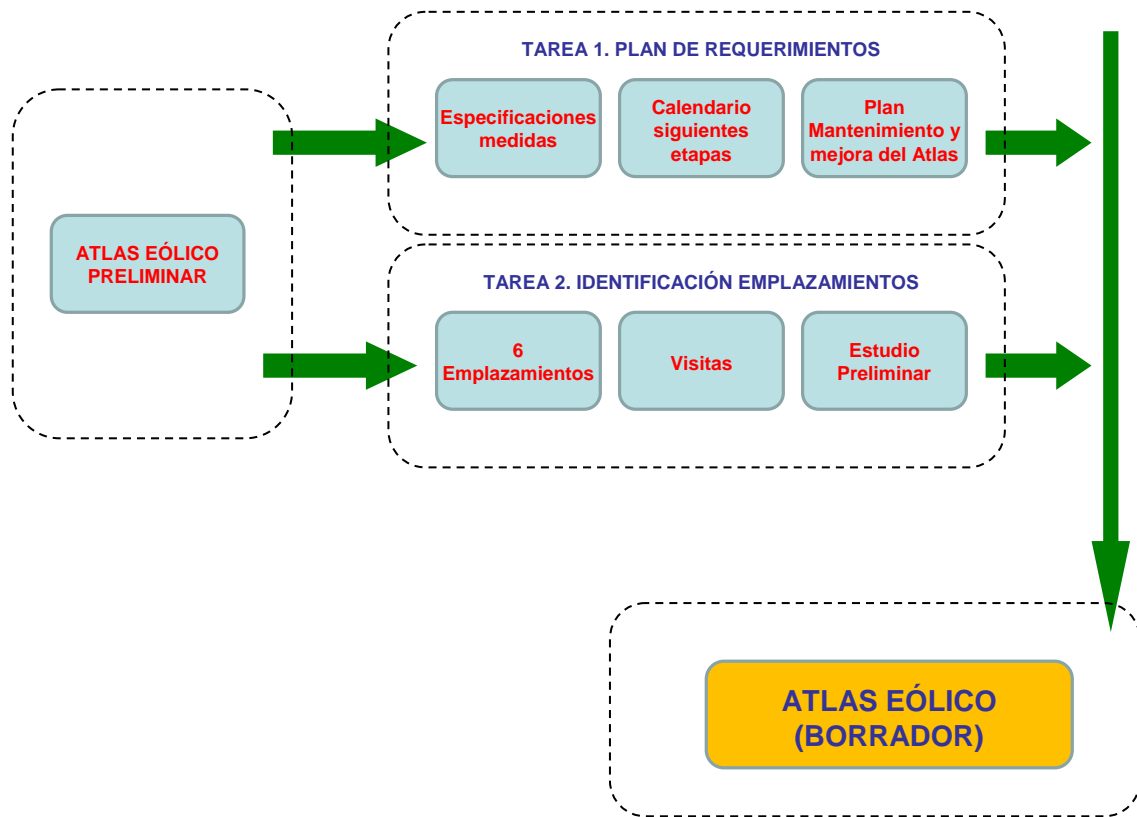
### Fase 2: Plan de requerimientos

En esta fase se han llevado a cabo, entre otras, las siguientes actividades:

- i. Elaboración de un plan de requerimientos de acciones e infraestructuras que incluye:
  - o Especificaciones técnicas del proceso de medida.
  - o Calendario de siguientes etapas.
  - o Plan de mantenimiento y mejora del Atlas Eólico realizado.
- ii. Elaboración de un estudio de caracterización preliminar del recurso eólico en 6 emplazamientos, este estudio incluye:
  - o Identificación de 6 emplazamientos viables para el desarrollo de parques eólicos.
  - o Visita a los 6 emplazamientos.
  - o Definición preliminar de posiciones de aerogeneradores.

- Realización de un estudio previo de producción de un parque eólico en cada uno de los emplazamientos.

Figura 2. Esquema de trabajo para la Fase 2.



Fuente: Elaboración propia.

### Fase 3: Taller de capacitación y difusión

El taller de capacitación y difusión de 27 horas de duración tuvo lugar en Lima los días 18, 19, 20 y 21 de julio de 2016 y los días 8 y 9 de septiembre de 2016.

En dicho taller se trataron entre otros los siguientes aspectos:

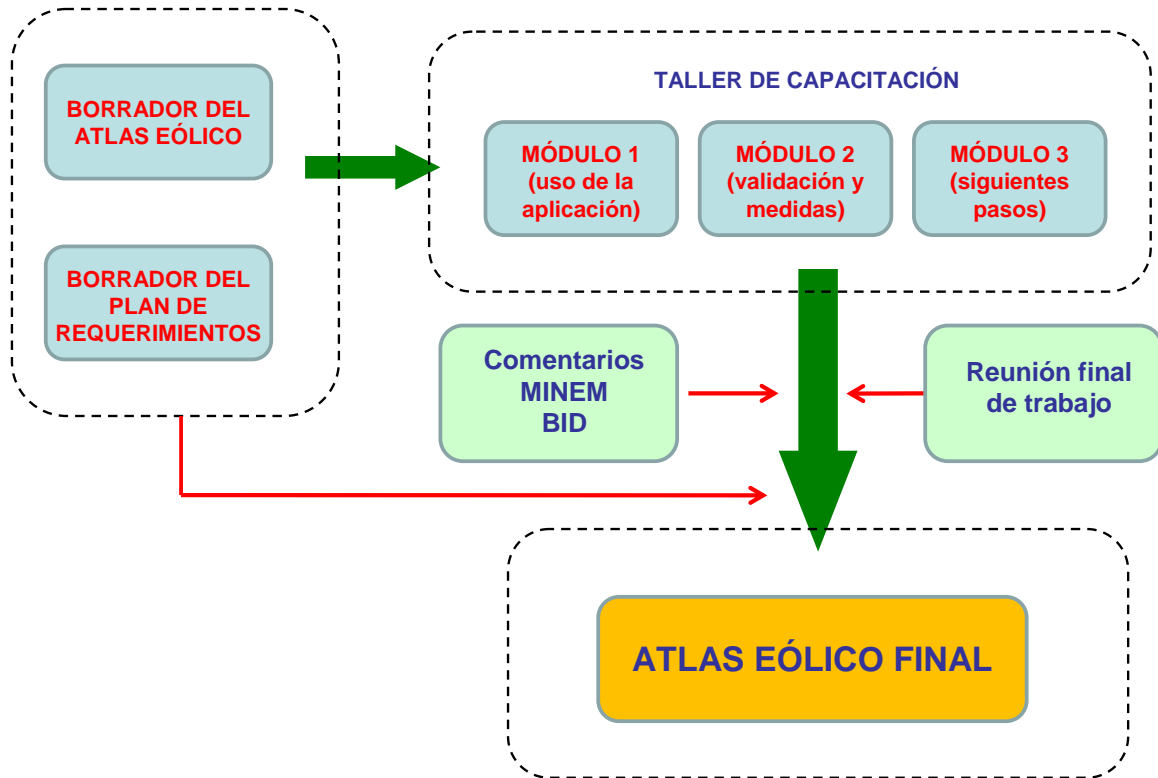
- Visualización y edición de información cartográfica:
  - Introducción: Datos básicos sobre la energía eólica.
  - Principios y bases del desarrollo del consultor.
- Uso y determinación del potencial eólico desde la información digital:
  - Uso de software para determinar los parámetros de viento a diferentes alturas.
  - Uso de software para obtener la información gráfica.
  - Cálculo del potencial eólico en ciertas áreas, en forma automática y manual.
  - Uso de software especializado para el diseño de parques eólicos, pequeñas aplicaciones rurales, o urbanas mediante generación distribuida.
  - Caso práctico de determinación de parámetros constructivos de un parque eólico en un área posible del Perú.
- Validación del potencial eólico nacional:
  - Definición del estado del arte de la tecnología para validar mapas eólicos.
  - Sustento de la distribución de ubicación de las estaciones.
  - Forma de operación del equipamiento de las estaciones meteorológicas.
  - Criterios y metodologías para el tratamiento de la información.
  - Recomendaciones para el fortalecimiento institucional.

d) Evaluación del recurso eólico:

1. Medidas remotas.
2. Perfil vertical.
3. Largo plazo.
4. Selección de aerogenerador y diseño de parque eólico.
5. Modelos de campo de vientos.

La figura siguiente muestra un esquema del plan de trabajo de la fase 3:

Figura 3. Esquema de trabajo para la Fase 3.



Fuente: Elaboración propia.

El producto final del estudio ha sido el Atlas Eólico del Perú actualizado, dentro de éste se pueden distinguir a su vez 3 productos:

1. Documento de Atlas Eólico final

El presente documento recoge la metodología empleada para elaborar el Atlas Eólico actualizado, así como su validación, la evaluación del potencial eólico del Perú y una serie de mapas que muestran el nivel de recurso eólico a nivel nacional a varias alturas.

2. Aplicación Web-GIS del Atlas Eólico del Perú

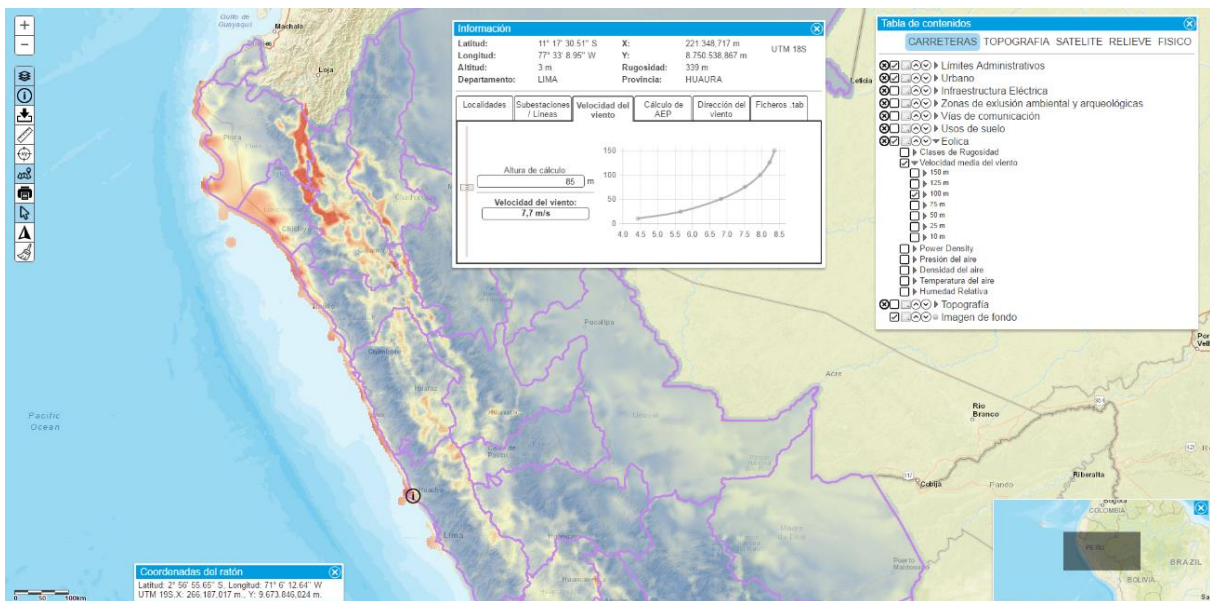
El principal objetivo del proyecto del Atlas Eólico es realizar una aplicación Web-GIS que muestre las áreas más favorables para el desarrollo de proyectos eólicos, por tanto, además de contener información sobre el nivel de recurso eólico disponible, contiene información sobre áreas favorables/desfavorables; es decir, se han incorporado otro tipo de capas de información a la herramienta como datos de ubicación del punto seleccionado, altitud, distancias a elementos de interés, rugosidades, información sobre zonas excluyentes y áreas protegidas, etc.

La aplicación permite visualizar en cada punto de interés seleccionado por el usuario final la siguiente información:

- Datos de ubicación (Coordenadas), departamento, provincia, distrito, altitud del terreno, distancia hasta las localidades más cercanas, distancias hasta las líneas y subestaciones de alta y media tensión más cercanas y longitud de rugosidad de la superficie.
- Datos del recurso eólico: Velocidad del viento, dirección del viento, densidad de potencia, distribución de frecuencias de velocidades (distribución de Weibull), temperatura media, presión media, humedad relativa y densidad del aire.
- Mapas de velocidad y densidad de potencia.
- Extracción de mapas topográficos y de rugosidad de las zonas de interés.
- Producción eólica para un modelo de aerogenerador genérico

Esta aplicación cuenta con un manual de uso e interpretación.

Figura 4. Aplicación Web-GIS del Atlas Eólico del Perú.



Fuente: Elaboración propia.

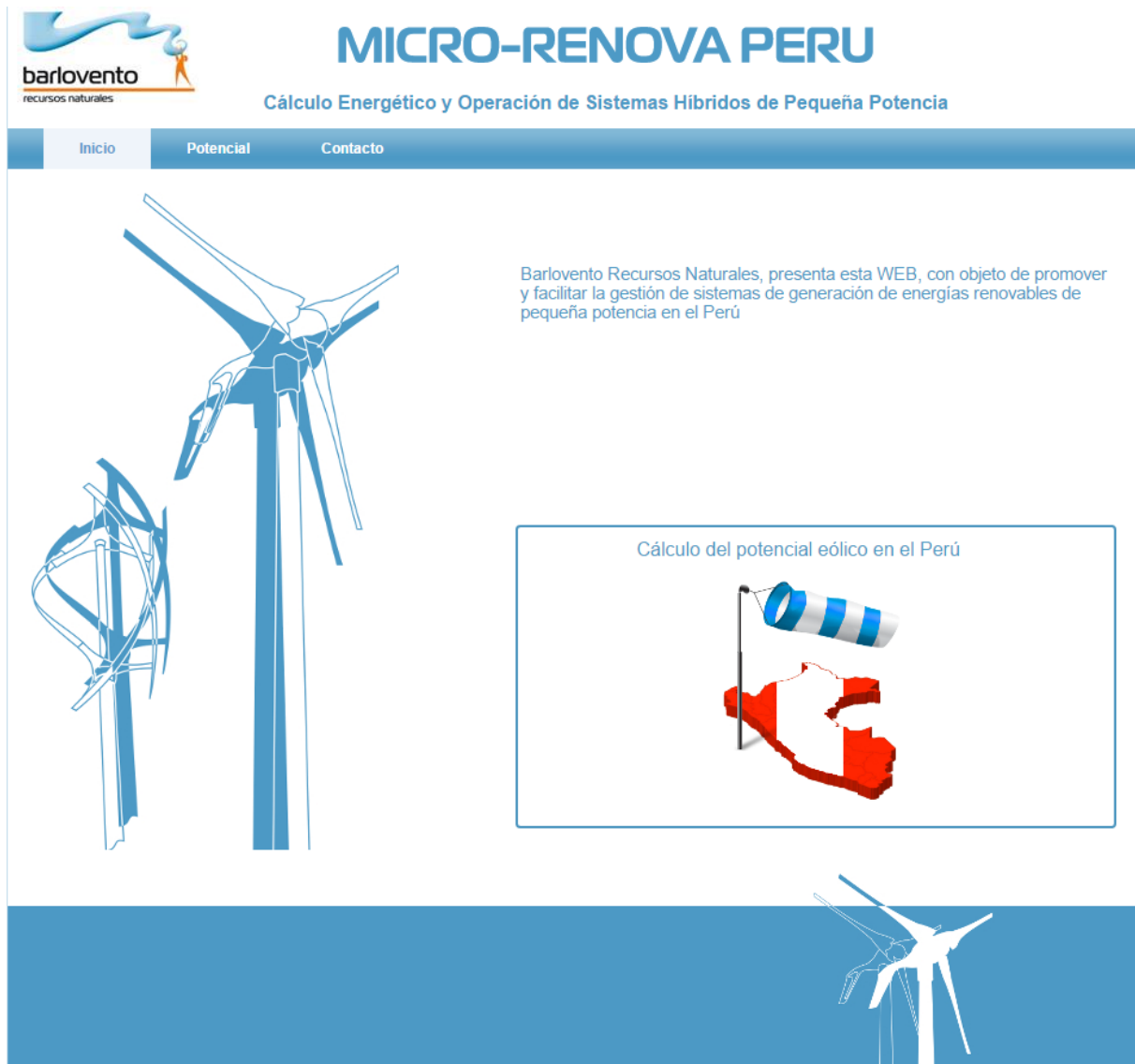
### 3. Aplicación para sistemas aislados: Micro-Renova Perú

Micro-Renova Perú es una aplicación web (<http://microrenova-peru.barloventorecursos.com>) desarrollada por Barlovento Recursos Naturales cuyo objeto es facilitar información del funcionamiento y la operación de sistemas de energías renovables de pequeña potencia en el Perú.

La aplicación digital permite obtener una primera estimación del potencial energético de un sistema de generación de energía de pequeña potencia mediante energía mini-eólica en el ámbito rural o urbano para la aplicación de generación distribuida. La aplicación realiza el cálculo tanto para sistemas conectado a red con autoconsumo, como para sistemas no conectados a red.

Esta aplicación cuenta con un manual de uso e interpretación.

Figura 5. Aplicación Micro-Renova Perú para sistemas aislados.



Fuente: Elaboración propia.

## **1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO**

### **1.1- ANTECEDENTES. ATLAS EÓLICO DEL PERÚ.**

#### **1.1.1.-Antecedentes de la situación de la energía en el Perú: experiencia con aerogeneradores ITINTEC-ELECTROPERU**

El Perú cuenta con una gran variedad de recursos energéticos, entre ellos destaca tanto por su abundancia como su capacidad para desarrollar grandes potencias la energía hidráulica, también cuenta con centrales térmicas, que, interconectadas con las anteriores dentro de un sistema, contribuyen a satisfacer la demanda de energía en el país.

Se tiene conocimiento que a nivel mundial se están agotando las reservas de los hidrocarburos; esto ha permitido impulsar el desarrollo de sistemas basados en fuentes nuevas y renovables como energía solar, eólica, biomasa y mini-hidráulica.

El Perú tiene que adecuarse a esos cambios y adecuar la matriz energética, es importante desarrollar sistemas con fuentes nuevas y renovables de alta potencia; así como también emplear estas fuentes para regiones muy alejadas de los sistemas interconectados.

Se tiene conocimiento de que el nivel de recurso eólico en el Perú no es tan elevado como en otros países; no obstante, a lo largo de toda la costa existen zonas con potencial eólico elevado, como por ejemplo Piura y Arequipa.

Tradicionalmente en el país dos instituciones han tenido experiencia con aerogeneradores:

- a) ITINTEC
- b) ELECTROPERU

#### **A) ITINTEC**

Desarrolló a nivel experimental un prototipo de aerogenerador de 500 W de potencia con dos álabes. Fue instalado en una vivienda en el distrito de Villa el Salvador, sin embargo, el sistema no funcionó satisfactoriamente por falta de viento y un fallo en los controles del generador.

#### **B) ELECTROPERU**

La oficina de Energías no convencionales, dentro de su programa de Estudios y Trabajos de investigación en el campo de la Energía Eólica, continuó con los trabajos iniciados por el convenio Ítalo-Peruano en la caleta de Yasila e inició trabajos en la localidad de Torán. A nivel nacional realizó medidas anemométricas para determinar el potencial eólico existentes en el país.

El examen realizado al año 1994 permitió determinar que los estudios y trabajos en este campo, se encontraban a la fecha en situación de abandono, debido a la falta de supervisión, mantenimiento y control de los bienes.

##### **b.1) Central eólica de Yasila**

En el año 1982 antes de la creación de la Ex-oficina de energías no convencionales, la Gerencia de Electrificación Provincial, Distrital y Rural con fecha 24/05/1992 suscribió un cata de representación de Electro Perú con el INSTITUTO PER LA COOPERAZIONE UNIVERSITARIA DE ROMA (ICU) donde se precisaban algunos puntos para la electrificación rural con energía renovable, que tuvo como objetivo, desarrollar el estudio de factibilidad y el diseño ejecutivo de una central eólica piloto, en la localidad de Yasila en Piura (para el periodo 1983- 1985) . El aporte Italiano fue destinado para el suministro e instalación de 3 aerogeneradores monopala de 3.5 kW cada uno, de marca Riva-Calzoni, un microcomputador y otros suministros.

En el año 1994 se encontraban en operación dos aerogeneradores de 3.5 kW y uno se encontraba fuera de servicio, así mismo se observa la situación de abandono en que se hallan y la falta de mantenimiento.



En el periodo 1985-1987 se amplía el suministro, para la instalación de 3 aerogeneradores de 12 kW cada uno de marca ISEA; estos tres últimos tuvieron que ser desmontados debido a las fuertes vibraciones que afectaron su conformación.

El encargado de dar mantenimiento y cuidado a las turbinas fue el señor Orlando Sarmiento Morales; a continuación, se muestran en fotos lo que queda del proyecto de emprendimiento de Electro Perú que marcó el inicio de aprovechamiento a pequeña escala en el Perú.

*Figura 6. Se muestra los cimientos de un de los aerogeneradores ubicado en la parte alta de Yasila (bahía de Paíta) y la orografía del entorno. Año 2016.*



*Fuente: MINEM.*

*Figura 7. La foto muestra la caseta donde se encontraban los bancos de baterías y otros suministros. Año 2016.*



*Fuente: MINEM.*

Figura 8. La foto muestra la casa del personal de mantenimiento y la caseta donde se ubicaron los bancos de baterías y otros suministros. Año 2016.



Fuente: MINEM.

#### b.2 Central eólica de Toran

En la localidad de Torán en el valle de Majes (distrito de Uraca, provincia de Castilla en el Departamento de Arequipa), la ex-oficina de energías no convencionales instaló dos aerogeneradores de 4 kW, para suministro de energía al pueblo de Torán donde residían 40 familias, dicha instalación se realizó en dos etapas.

El costo de los suministros importados fue de 8 259 (USD) (1987-1989), desde inicios de 1988, entró en operación dicha estación brindando energía, a través de un cargador de baterías de 12V, al pueblo de Torán. Estos equipos funcionaron algunos meses, después de los cuales uno de ellos cayó al suelo mientras que el otro presentaba una rotura en la veleta.

Respecto al desarrollo de la Eólica posterior, en 1996 se instaló un aerogenerador de 0.25 MW en Punta Malabrigo (La Libertad) y dos años después, en 1998, se instaló otro prototipo de 0.45 MW en San Juan de Marcona (Ica).

#### 1.1.2.-Antecedentes de la situación de la energía en el Perú: parques eólicos modernos de grandes dimensiones.

En abril 2014 se instaló en Marcona el primer parque eólico del Perú de grandes dimensiones (32 MW). En agosto y septiembre de ese mismo año se conectaron a la red los parques eólicos de Cupisnique (Pacasmayo, La Libertad) con 80 MW y Talara (Piura) con 30 MW respectivamente. A principios de 2016 se conectó el parque eólico Tres Hermanas (Ica) con 97 MW de potencia instalada. La capacidad nominal de todas las instalaciones eólicas conectadas a la red pública hoy en día es de 239 MW.

Tabla 1. Parques eólicos en operación en el Perú.

PARQUE EÓLICO	POTENCIA INSTALADA	DEPARTAMENTO
P.E. Marcona	32 MW	Ica
P.E. Cupisnique	80 MW	La Libertad
P.E. Talara	30 MW	Piura
P.E. Tres Hermanas	97 MW	Ica

Fuente: MINEM (Ministerio de Energía y Minas).

En febrero de 2016, se resolvió la adjudicación de potencia de la Cuarta Subasta de Suministro de Electricidad con Recursos Energéticos Renovables al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN), donde en primera ronda se adjudicó un proyecto eólico de 126 MW (de los 34 proyectos eólicos presentados en primera ronda) y en segunda ronda se adjudicaron dos proyectos eólicos de 18 MW cada uno (del total de los siete proyectos eólicos presentados en segunda ronda). La potencia total asignada fue de 162 MW.

Tabla 2. Parques eólicos adjudicados en la Cuarta Subasta de Suministro de Electricidad con Recursos Energéticos Renovables al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN).

PARQUE EÓLICO	POTENCIA INSTALADA	DEPARTAMENTO
P.E. Parque Nazca	126 MW	Ica
P.E. Huambos	18 MW	Cajamarca
P.E. Duna	18 MW	Cajamarca

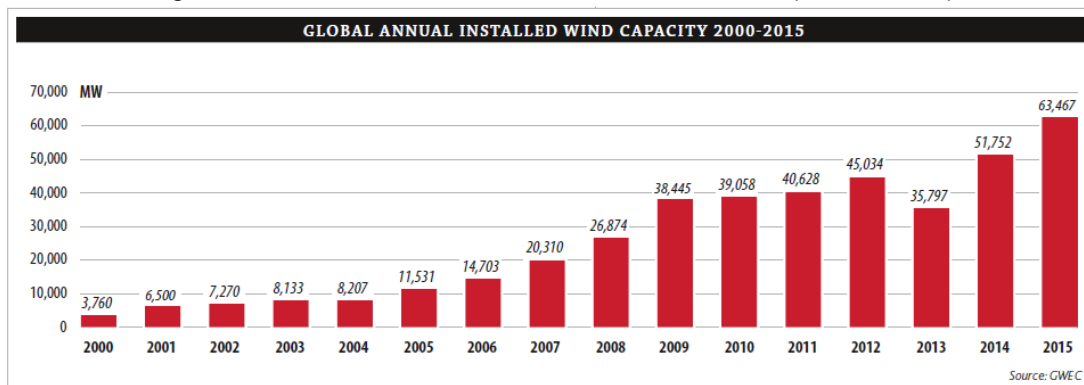
Fuente: MINEM.

### 1.1.3.-Potencia eólica instalada en el mundo.

En los 8 años transcurridos desde la realización del anterior Atlas Eólico hasta el presente, la industria eólica mundial ha experimentado un gran desarrollo. La potencia instalada ha pasado de 120.690 GW instalados a 432.883 GW.

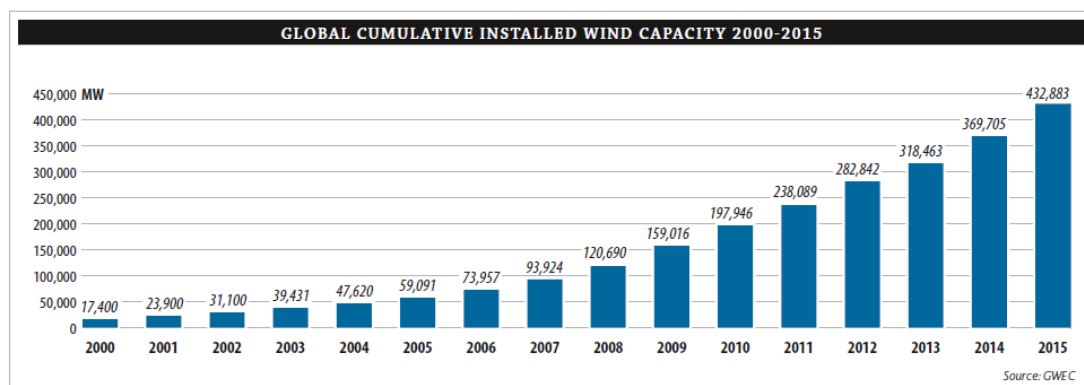
Las siguientes figuras muestran como ha sido la evolución del desarrollo de la potencia instalada anualmente y la potencia acumulada global en el mundo desde el año 2000.

Figura 9. Potencia eólica anual instalada en el mundo (2000 – 2015).



Fuente: Global Wind Energy Council (GWEC, Global Wind Report 2015).

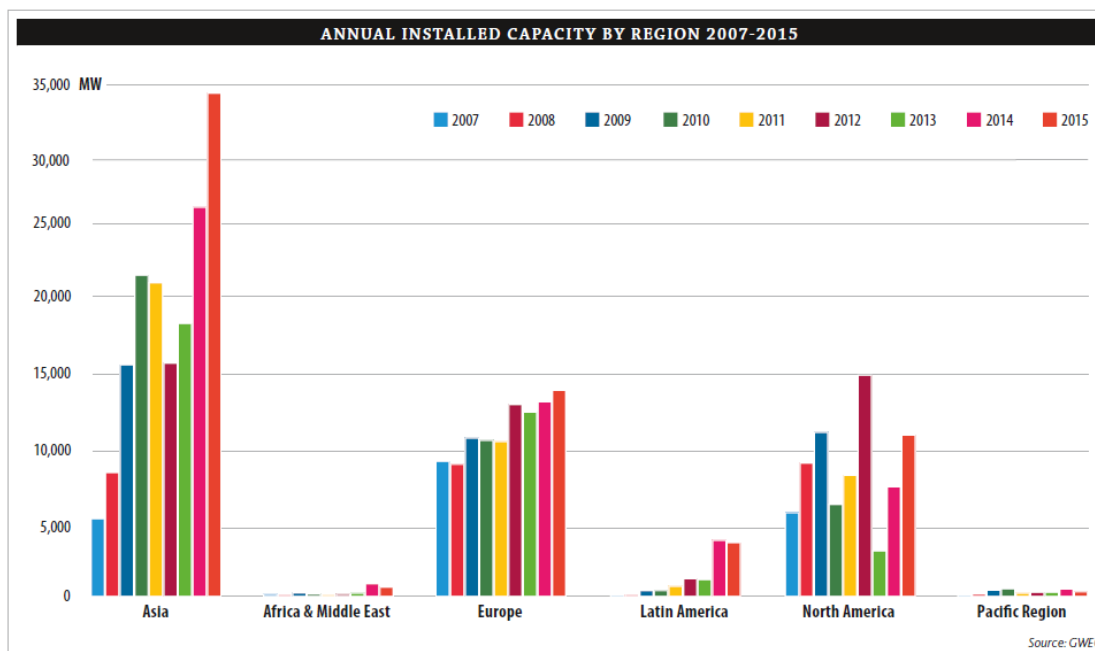
Figura 10. Potencia eólica total instalada en el mundo (2000 – 2015).



Fuente: Global Wind Energy Council (GWEC, Global Wind Report 2015).

La siguiente figura muestra la potencia eólica anual instalada por regiones (continentes); puede verse como en Latinoamérica la potencia instalada se ha incrementado, especialmente en los dos últimos años (2014 - 2015).

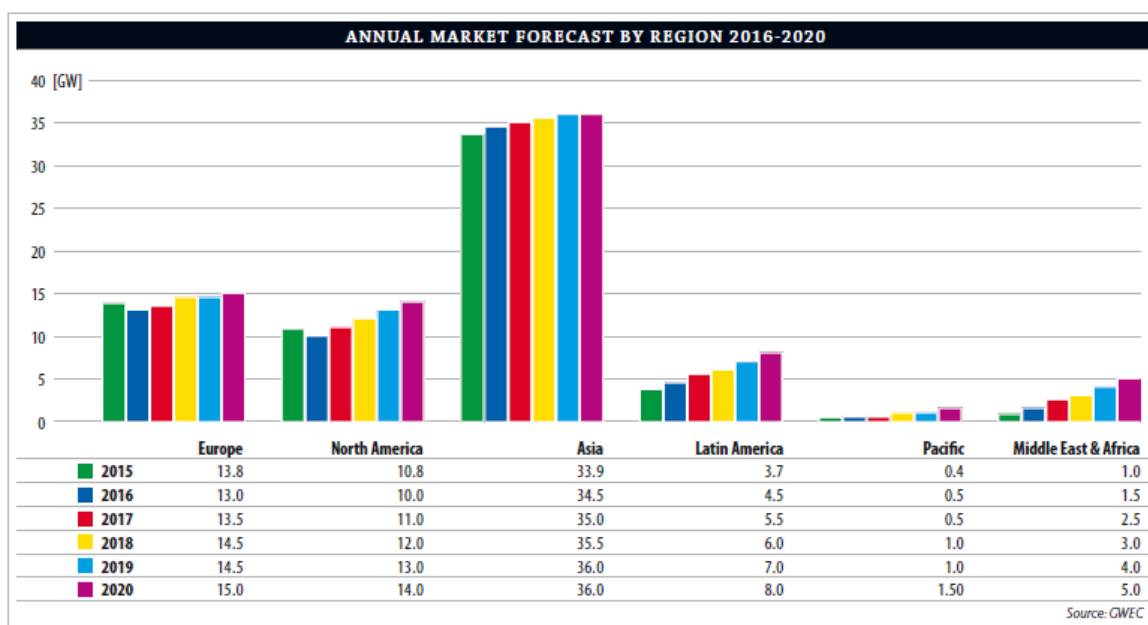
Figura 11. Potencia eólica anual instalada en el mundo por regiones (2007 – 2015).



Fuente: Global Wind Energy Council (GWEC, Global Wind Report 2015).

Además, se prevé que el desarrollo de la energía eólica en todo el mundo y especialmente en Latinoamérica, continúe creciendo a lo largo de los próximos años. La figura siguiente muestra una predicción de la potencia eólica anual instalada en las distintas regiones para los próximos años.

Figura 12. Predicción de la potencia eólica anual instalada en el mundo por regiones (2015 – 2020).



Fuente: Global Wind Energy Council (GWEC, Global Wind Report 2015).

## **1.2- OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS**

El Ministerio de Energía y Minas del Perú (MINEM) como institución del Estado peruano, tiene entre otras funciones, la de actualizar el inventario de recursos energéticos disponibles para la generación de electricidad y promover la inversión en proyectos de generación eléctrica, principalmente para el aprovechamiento de fuentes de energía renovable como la energía eólica. Al respecto, cada cierto periodo y basado en criterios de regulación y de la política energética del sector, el MINEM impulsa el desarrollo de subastas de suministro de electricidad con fuentes de energía renovable, promoviendo así también el desarrollo de parques eólicos para la generación de electricidad.

En el año 2008, el MINEM elaboró un estudio preliminar para determinar el potencial eólico a nivel nacional a través del desarrollo de un Atlas Eólico. Dicho estudio se realizó basado en técnicas de modelización meso y microescalares, combinando la utilización de un modelo de simulación atmosférica para reproducir los patrones de viento a gran escala, a través de un modelo de viento microescalar que responda a las características del terreno y la topografía.

El objetivo del nuevo Atlas Eólico es actualizar el anterior realizado en el año 2008 así como promover el fortalecimiento de las capacidades del sector para evaluar el aprovechamiento de la energía eólica con fines energéticos.

El nuevo Atlas Eólico del Perú consta de una aplicación Web-GIS, así como de una serie de mapas que pueden verse en los Anexos C a J del presente documento. El desarrollo de este nuevo Atlas permite conocer el recurso eólico en todo el territorio del Perú (incluyendo 2 millas náuticas desde la costa) con una gran resolución (1 km), de forma on-line mediante la aplicación Web-GIS, mientras que los mapas proporcionan una visión general del recurso eólico medio (tanto anual como mensual) en todo el Perú.

### 1.3- VIENTO Y ENERGÍA EÓLICA

La energía eólica representa hoy en día una de las fuentes energéticas más baratas y con una tecnología de aprovechamiento totalmente madura. Los actuales aerogeneradores son capaces de producir electricidad a precios competitivos respecto a las fuentes tradicionales energéticas, partiendo de una fuente natural, renovable y no contaminante de energía.

#### 1.3.1.-Origen del viento.

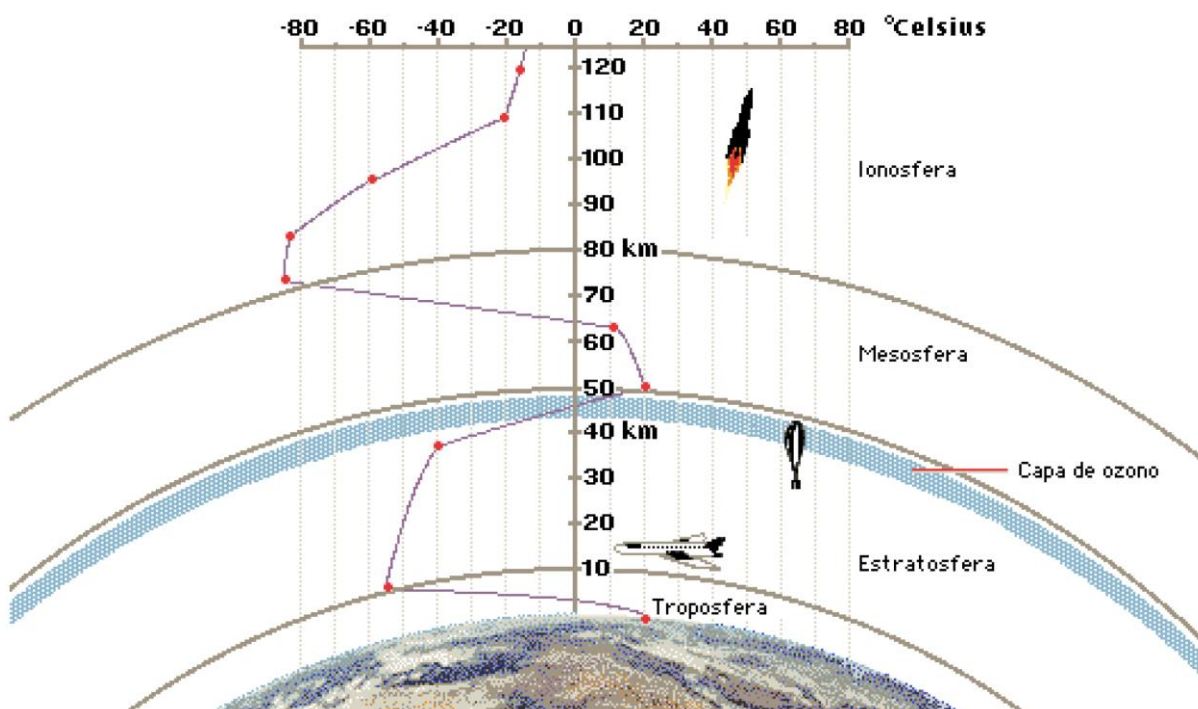
La atmósfera se divide verticalmente en varias capas horizontales, según una división basada principalmente en la temperatura. El viento en superficie se produce en la capa más baja de la atmósfera, la troposfera, que tiene un espesor de unos 8 km en los polos y unos 16 km en el Ecuador. En concreto, desde el punto de vista de la energía eólica, interesará únicamente el viento que se produce en unos pocos centenares de metros sobre el suelo, en la parte más baja de la troposfera.

Tabla 3. Capas de la Atmósfera.

ALTURA	CAPAS	FENÓMENOS
De 1.000 km en adelante	EXOSFERA	Vacío casi absoluto. Zona de circulación de satélites geofísicos.
De 400 a 1.000 km.	MESOSFERA	Producción de iones. Transformación de los rayos cósmicos primarios en secundarios.
De 80 a 400 km.	IONOSFERA	Producción de iones. Capas electrizadas. Reflejan ondas radio. Auroras y bólidos.
De 25 a 80 km.	QUIMIOSFERA	Reacciones químicas. Presencia de capa de ozono. Filtro de la radiación ultravioleta.
De 10 a 25 km.	ESTRATOSFERA	Aire prácticamente en calma. Nubes irisadas.
De 0 a 10 km	TROPOSFERA	Fenómenos meteorológicos: nubes, vientos, lluvia, etc.

Fuente: SENAMHI.

Figura 13. Capas de la atmósfera.



Fuente: SENAMHI.

La causa del movimiento del aire es el desarrollo de gradientes horizontales de presión dentro de la atmósfera, los cuales, en último término, son consecuencia de la radiación solar recibida por La Tierra: la atmósfera funciona como una gigantesca máquina térmica en la que la diferencia de temperatura existente entre los polos y el ecuador proporciona la energía necesaria para la circulación atmosférica.

Los movimientos verticales en la atmósfera están limitados por el equilibrio existente entre la fuerza gravitatoria y el gradiente vertical de presión (equilibrio hidrostático):

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho \cdot g \quad (1)$$

Los vientos verticales tienen en general velocidades varios órdenes de magnitud menores que los horizontales.

### 1.3.2.-Circulación general del viento.

Los desplazamientos de aire tienden a eliminar estos desequilibrios de presión existentes. La velocidad del viento será mayor, por tanto, cuanto mayor sea el gradiente de presión. El aire se moverá de las zonas de altas presiones a las zonas de bajas presiones.

La fuerza de presión por unidad de masa, perpendicular a las isobaras se expresa como:

$$\frac{\partial P}{\partial M} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial n} \quad (2)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del aire y  $\partial p / \partial n$  es el gradiente horizontal de presión. Por tanto, cuanto más juntas estén las isobaras, mayor será el gradiente de presión y la velocidad del viento.

Según esto la dirección del viento debería ser perpendicular a las isobaras. Sin embargo, en la atmósfera libre, lejos de la superficie terrestre, el viento sopla paralelo a las isobaras, dejando, en el hemisferio norte, la zona de alta presión a la derecha y la baja presión a la izquierda (al contrario en el hemisferio sur).

Este hecho es debido a la fuerza de Coriolis, que actúa sobre cualquier móvil. El valor por unidad de masa de su componente horizontal es

$$f = -2\Omega \cdot \text{sen}\varphi \cdot V \quad (3)$$

donde  $\Omega$  es la velocidad angular de La Tierra,  $\varphi$  es la latitud y  $V$  la velocidad del móvil. La dirección de la fuerza es perpendicular al movimiento y hace que en el hemisferio norte el aire se desplace desviándose constantemente hacia la derecha (al contrario en el hemisferio sur). La desviación es proporcional al seno de la latitud y por tanto será máxima en los polos y mínima en el ecuador.

En la atmósfera libre y en situación de equilibrio, la fuerza del gradiente de presión quedará equilibrada con la de Coriolis:

$$-\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial n} = -2\Omega \cdot \text{sen}\varphi \cdot V \quad (4)$$

El viento ideal que cumple esta condición se llama viento geostrófico y es una buena aproximación al viento real en niveles altos de la atmósfera. El viento geostrófico es paralelo a las isóbaras, o superficies de igual presión.

Dado que en general las isobaras no son rectas, el movimiento del aire, paralelo a ellas, estará sometido a una aceleración dirigida hacia el centro de rotación, cuyo valor es:

$$-\frac{V^2}{r} \quad (5)$$



donde  $r$  es el radio de curvatura del movimiento. El equilibrio de las fuerzas b́arica, de Coriolis y centrífuga, resulta en una circulaci3n conocida como viento del gradiente. Este viento es tambi3n paralelo a las is3baras.

La proximidad de la superficie terrestre, donde el rozamiento con el suelo hace frenarse al viento, la fuerza de Coriolis disminuye proporcionalmente con la velocidad y se establece por tanto un nuevo equilibrio. Ello hace que el viento corte oblicuamente a las isobaras, desde las altas presiones hacia las bajas, dejando siempre, en el hemisferio norte, las altas a la derecha y las bajas a la izquierda (al contrario en el hemisferio sur).

Verticalmente, el efecto de la fricci3n disminuye con la altura, con lo que aumentan la velocidad y la fuerza de Coriolis, desde cero en la superficie hasta la velocidad de viento geostrófico donde el rozamiento sea despreciable. Asimismo, el ángulo con el que el viento cortará las isobaras variar3 con la altura. La curva de la variaci3n vertical del vector viento se conoce como espiral de Ekman.

### 1.3.3.-Efectos locales.

La circulaci3n general, supone un planeta homog3neo de forma aproximadamente esférica. Realmente, la superficie terrestre presenta una variabilidad considerable, que incluye grandes extensiones de tierra y oc3anos. Estas superficies diversas pueden afectar el flujo del aire variando los campos de presi3n, la absorci3n de radiaci3n solar o el contenido de vapor de agua.

Los oc3anos actúan como un gran sumidero de energía, por lo que el movimiento del aire est3 a menudo acoplado con la circulaci3n oceánica. Esto ocasiona variaciones del campo de presi3n que afectan a los vientos globales y a varios de los vientos regionales persistentes. Se pueden considerar circulaciones secundarias o vientos regionales a aquellas en que los centros de alta o baja presi3n se forman por el calentamiento o enfriamiento de la baja atm3sfera. Entre ellas se pueden destacar los huracanes, los monzones y los ciclones extratropicales (o de latitudes medias).

A parte de la circulaci3n general, las condiciones geográficas locales son a veces causa de tendencias que se superponen tanto a los mapas de velocidad de viento a gran escala como a los de pequeña escala. Estas condiciones locales producen calentamientos y enfriamientos de la atm3sfera que dan lugar a pequeñas diferencias de presi3n que generan vientos locales o regionales que se manifiestan m3s claramente cuando los vientos de circulaci3n general son débiles. Sin embargo, en algunas regiones del mundo, los vientos locales tienen tal importancia que encubren al viento general.

Existen efectos locales de origen únicamente térmico, mientras que otros son producidos por factores orográficos. Entre los primeros se pueden citar las brisas entre la llanura y la montaña, entre el mar y tierra, entre la ciudad y el campo, los vientos de ladera y de valle.

Adem3s de estos vientos de origen térmico, la propia topografía da lugar a perturbaciones de la circulaci3n general. Los rasgos topográficos de pequeña escala (colinas, acantilados, pequeños valles, ...) originan pequeñas perturbaciones que pueden favorecer la existencia de puntos singulares donde la velocidad del viento se incremente y sean adecuados para el aprovechamiento de la energía e3lica.

### 1.3.4.-Instrumentos de medici3n.

Una de las principales característic3s del viento, es que se trata de una fuente de energía variable y aleatoria, para poder determinar las característic3s específic3s del viento y poder analizar sus posibilidades y condiciones de su aprovechamiento es necesario conocer las condiciones generales de viento en un emplazamiento. En todo este proceso intervienen factores como aparatos de medida, procedimiento de toma de datos y métodos de tratamiento de datos.

En energía e3lica se utilizan principalmente cuatro tipos de instrumentos meteorol3gicos

- Anem3metros para medir la velocidad del viento.

- Veletas para medir la dirección.
- Termohigrómetros para medir la temperatura y humedad relativa del aire.
- Barómetros para medir la presión atmosférica ambiental.

#### Medida de la velocidad del viento

El instrumento básico de medida de la velocidad del viento es el anemómetro, éstos pueden clasificarse según su principio de operación:

- De rotación

Los diseños actuales de este tipo de instrumento tienen tres cazoletas montadas sobre un pequeño eje. La velocidad de rotación es proporcional a la velocidad del viento. Para medir el ritmo de rotación de las cazoletas, se pueden emplear contadores mecánicos, variaciones de voltaje, o interruptores fotoeléctricos.

También son utilizados, aunque menos, los anemómetros de hélice. El viento hace girar la hélice acoplada a un eje que genera una señal dependiente de este giro, de manera similar a como lo hace el anemómetro de cazoletas. Si sólo se dispone de un anemómetro, éste se acopla a una veleta para orientarse automáticamente hacia el viento. También se pueden mantener fijos siguiendo dos o tres ejes cartesianos, empleando dos o tres anemómetros, obteniendo en este caso las componentes del vector.

*Figura 14. Anemómetro de cazoletas.*



*Fuente: Elaboración propia.*

- De presión

La medida de la velocidad del viento se registra mediante los efectos de las variaciones de presión que ejerce el aire cuando se mueve.

- De hilo caliente

Mide la velocidad del viento mediante el efecto de enfriamiento del viento. La principal ventaja de estos anemómetros es su pequeña constante de tiempo, aunque la desventaja es que son delicados y requieren un mantenimiento permanente.

- Sónicos

Los anemómetros sónicos emplean ondas ultrasónicas para medir simultáneamente la velocidad y la dirección del viento; tienen una constante de tiempo muy baja y una gran resolución en la medida sin embargo son equipos más caros que los anteriores.

#### Medida de la dirección del viento

La dirección del viento se mide normalmente mediante una veleta, que consiste en un dispositivo montado sobre un eje vertical y de giro libre, de tal modo que puede moverse cuando el viento cambia de dirección. Normalmente el movimiento de la veleta está amortiguado para prevenir cambios demasiado rápidos de la dirección del viento.

*Figura 15. Veleta.*



*Fuente: Elaboración propia.*

#### Sistemas de medida remota (SODAR/LIDAR)

Además de estos sistemas tradicionales de medida, en los últimos años se han empleado sistemas de medición remota (SODAR/LIDAR) que permiten medir el vector velocidad de viento y por tanto conocer las características del viento en un emplazamiento.

Estos sistemas han sido utilizados hasta la fecha en numerosas áreas: predicción de dispersión de contaminantes atmosféricos, pronóstico meteorológico, predicción de altura de nieblas, detección de cizalladura de viento en aeropuertos, implantación de planes de emergencia en centrales nucleares, estudios de vientos locales y en terreno complejo, etc.

Este método, presenta muchas ventajas respecto a los sistemas tradicionales de medida del viento (anemómetros y veletas), ya que permite prescindir de la torre de medida y caracterizar el viento a distintas alturas (hasta 150 o 200 metros) de una manera muy sencilla.

El SODAR (Sonic Detection and Ranging) es un sistema de medida remota para detección de viento y estructura térmica en la baja atmósfera. El sistema utiliza los mismos principios que el radar, usando ondas acústicas en vez de microondas. El sistema detecta la energía acústica de la atmósfera y a partir del estudio del desplazamiento Doppler y de la energía recibida consigue información sobre las condiciones atmosféricas: perfiles verticales de viento, presencia de capas de inversión térmica y altura de niebla.

*Figura 16. Ejemplo de SODAR.*



*Fuente: elaboración propia.*

El LIDAR es un sistema de medición remota para la medida de viento y la estructura térmica inferior de la atmósfera. El sistema emite pulsos o haces de luz que se reflejan en los aerosoles de la atmósfera y son recibidos por el receptor, a partir del estudio del desplazamiento Doppler y de la energía recibida se obtiene información sobre las condiciones atmosféricas: velocidad y dirección del viento, perfiles verticales de viento, presencia de capas de inversión térmica, etc.

Figura 17. Ejemplo de LIDAR.



Fuente: elaboración propia.

#### Medida de la temperatura y humedad relativa

En energía eólica, la medida de la temperatura se utiliza para la determinación de la densidad del aire. El funcionamiento básico de estos equipos es una resistencia que varía su capacidad resistiva en función de la temperatura. La señal de la resistencia se puede coger directamente en valor resistivo o transformarse a un valor de intensidad o voltaje. La mayoría de los sensores de temperatura suelen llevar un protector de radiación solar para que el sol no afecte a la medida.

Figura 18. Termohigrómetro.



Fuente: elaboración propia.

#### Medida de la presión

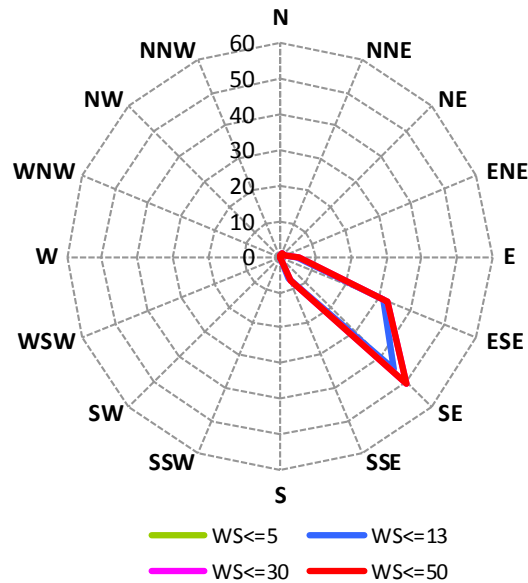
En energía eólica, la medida de la presión se utiliza para la determinación de la densidad del aire. El funcionamiento básico de los sensores de presión es un condensador. La capacidad del condensador varía en función de la presión atmosférica.

#### 1.3.5.-Distribución de direcciones: Rosa de vientos.

Las características direccionales del viento son de gran importancia, especialmente para la ubicación de los aerogeneradores dentro de un parque eólico y para conocer la variabilidad direccional del régimen de vientos al que debe responder el sistema de orientación del aerogenerador.

La representación más corriente de distribución direccional del viento es la llamada “rosa de vientos”, que representa el porcentaje de tiempo en que el viento proviene de una determinada dirección. Este gráfico suele dividirse en un número de sectores múltiplo de cuatro (12, 16, 32, etc.). Normalmente también se refleja en la rosa de vientos la distribución de velocidades de viento para cada intervalo direccional.

Figura 19. Ejemplo de Rosa de viento.



Fuente: elaboración propia.

### 1.3.6.-Variación vertical del viento.

La forma en que la velocidad del viento varía con la altura depende del transporte vertical de cantidad de movimiento de las capas altas de la atmósfera hacia las bajas, éste se produce por medio de la turbulencia atmosférica. A su vez, la turbulencia atmosférica depende de la estabilidad de la atmosfera y de la superficie del terreno.

Empíricamente se han determinado expresiones que describen esta variación del viento con la altura, las cuales van desde las más simples, como la conocida ley potencial

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha \quad (6)$$

donde  $\alpha$  es un parámetro que depende del tipo de superficie; a otras expresiones que mayor contenido físico.

Bajo atmósfera neutra y homogénea horizontalmente, sobre terreno horizontal, se cumple la ecuación:

$$V = \frac{V_*}{k} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (7)$$

$V_*$  es la llamada velocidad de fricción,  $k$  una constante y  $z_0$  la llamada longitud de rugosidad superficial.

Bajo atmósfera no neutra puede escribirse

$$V = \frac{V_*}{k} \cdot \left( \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \Psi\left(\frac{z}{L}\right) \right) \quad (8)$$

donde  $\Psi$  es una función correctora por la estabilidad atmosférica que depende del valor de la longitud de Monin-Obukhov ( $L$ ).

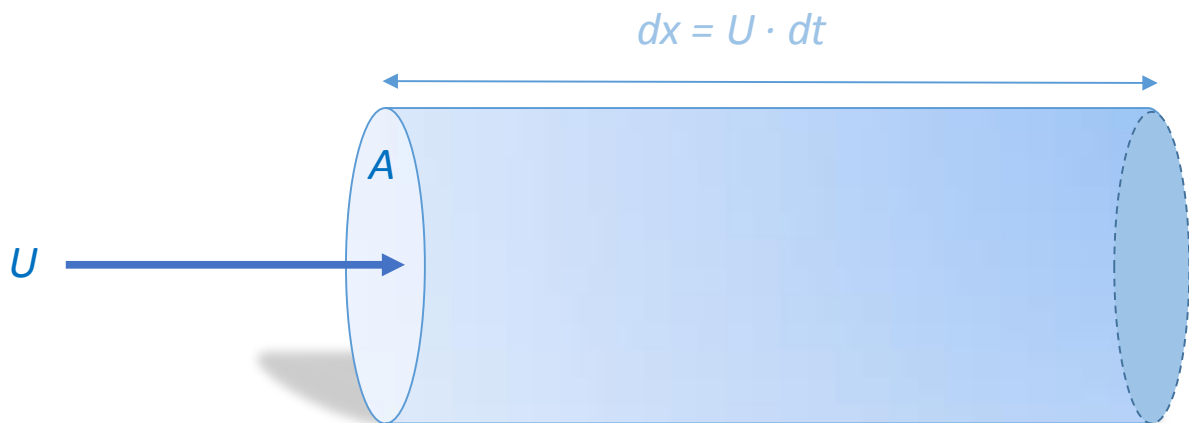
### 1.3.7.-Ley de Betz.

Los aerogeneradores aprovechan la energía cinética del viento para transformarla en energía mecánica y mediante un generador producir energía eléctrica.

Se puede deducir de manera sencilla la potencia que posee una corriente de viento uniforme para una determinada área A.

Para ello partimos de un tubo de corriente de sección recta A, perteneciente al campo fluido del viento uniforme de velocidad V (ver figura).

Figura 20. Flujo a través de un disco.



Fuente: elaboración propia.

La sección A está fija en el espacio y el fluido pasa a través de ella. El flujo que atraviesa el disco por unidad de tiempo según la ecuación de continuidad es:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d(\rho \cdot V)}{dt} = \rho \cdot A \cdot \frac{dx}{dt} = \rho \cdot A \cdot U \quad (9)$$

donde  $\rho$  es la densidad del aire que se considera constante en el tiempo.

Por otra parte, la energía cinética del aire que atraviesa el tubo es igual a

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot U^2 \quad (10)$$

y la potencia (variación de energía por unidad de tiempo) será igual a

$$P = \frac{dE_c}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} \cdot m \cdot U^2 \right) = \frac{1}{2} \cdot U^2 \cdot \frac{dm}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3 \quad (11)$$

De esta expresión puede verse que la energía que puede extraerse del viento es proporcional al área del rotor del aerogenerador, a la densidad del aire y al cubo de la velocidad del viento.

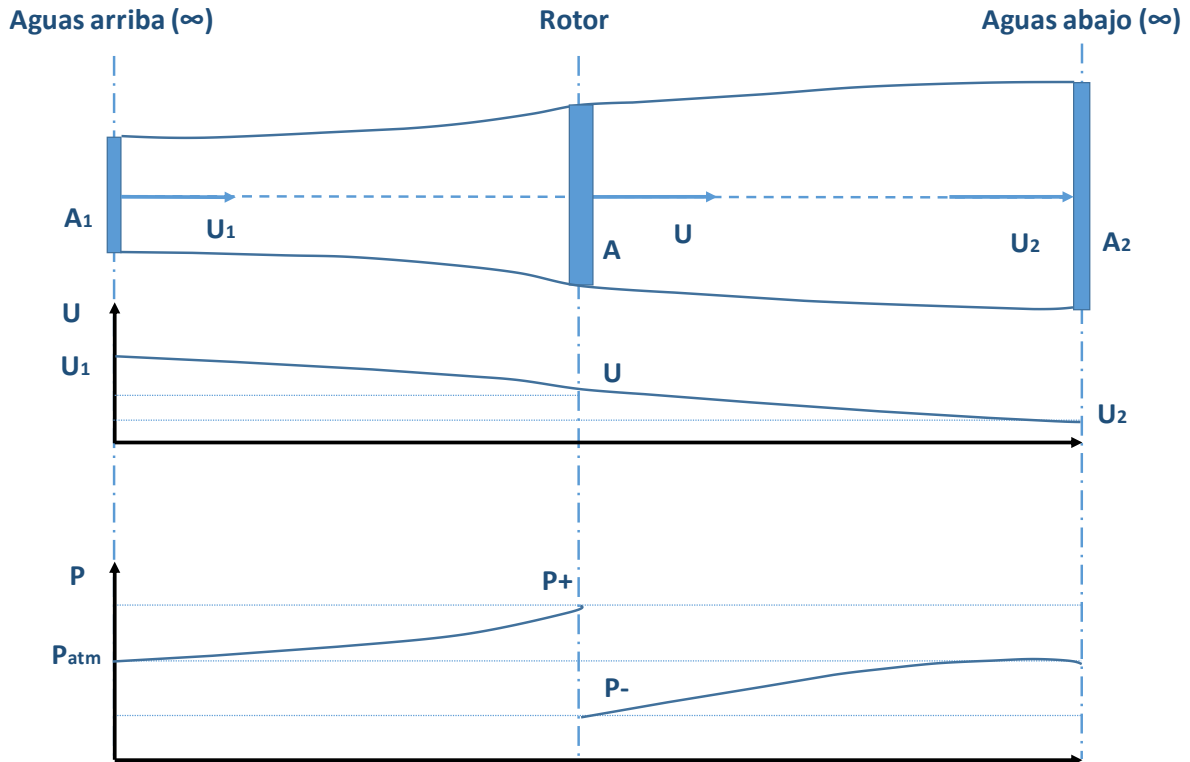
No obstante, no todo el viento que atraviesa el área del rotor de un aerogenerador puede aprovecharse. Existe un límite físico, conocido como límite de Betz que establece la energía máxima extraíble por un aerogenerador.

Si se intenta extraer con un aerogenerador la energía del viento, se verá que su velocidad disminuye al traspasar la máquina, dado que el rotor de la turbina eólica debe frenar el viento para transformar su energía cinética en rotacional.



Dado que la cantidad de aire que pasa a través del área barrida por el rotor por unidad de tiempo debe ser igual a la que abandona el área del rotor por el otro lado, el aire ocupará una mayor sección transversal (diámetro) detrás del plano del rotor.

Figura 21. Flujo a través del rotor de un aerogenerador.



Fuente: elaboración propia.

Puede demostrarse (mediante la ecuación de Bernoulli, la ecuación de continuidad y la de conservación de la masa) que en teoría el valor de la velocidad del viento  $V$  en el plano del rotor es la semisuma de la velocidad incidente en el infinito aguas arriba  $U_1$  con la velocidad final aguas abajo en el infinito  $U_2$ .

$$U = \frac{U_1 + U_2}{2} \quad (12)$$

Y por tanto la cantidad de masa que atraviesa el rotor por unidad de tiempo puede ponerse como:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d(\rho \cdot V)}{dt} = \rho \cdot A \cdot \frac{dx}{dt} = \rho \cdot A \cdot \frac{U_1 + U_2}{2} \quad (13)$$

La potencia extraída por el rotor

$$P = \frac{dE_c}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} \cdot m \cdot U^2 \right) = \frac{1}{2} \cdot (U_1^2 - U_2^2) \cdot \frac{dm}{dt} \quad (14)$$

Que sustituyendo en la expresión anterior:

$$P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (U_1^2 - U_2^2) \cdot (U_1 + U_2) \quad (15)$$

La potencia del viento incidente sobre el rotor sería:

$$(16)$$

$$P_r = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U_1^3$$

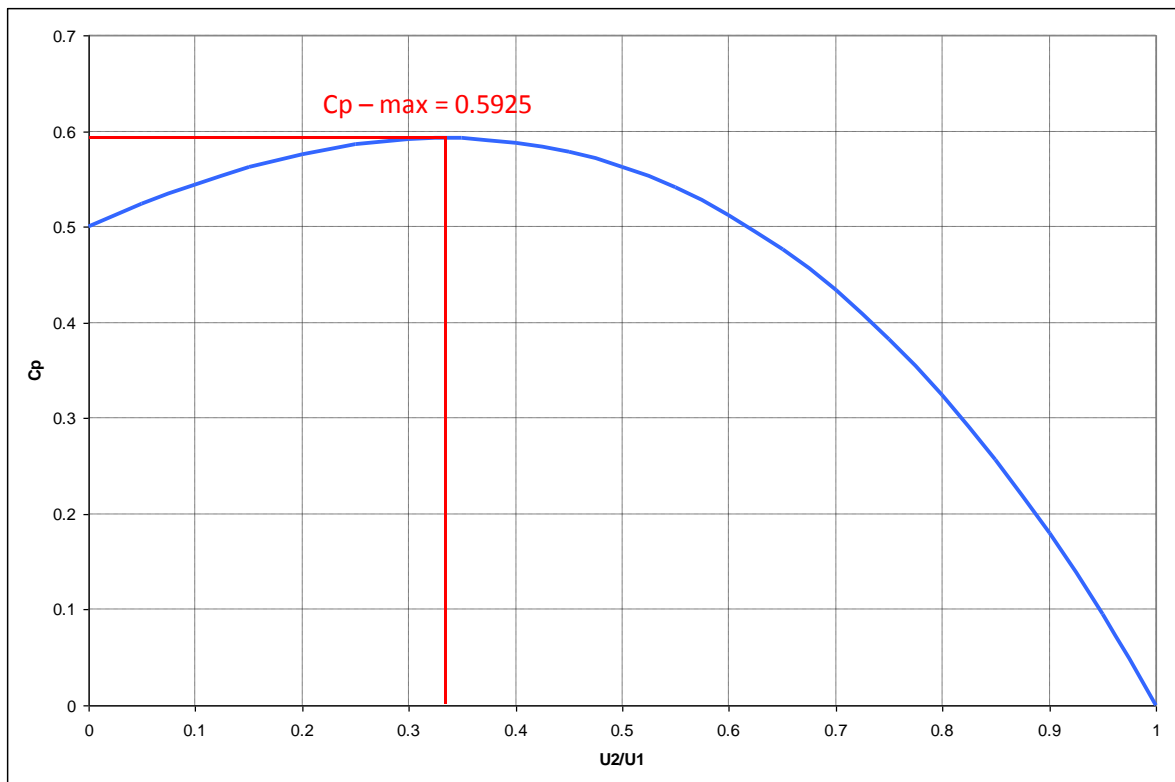
Comparando ambos valores se obtiene la siguiente expresión:

$$C_p = \frac{P}{P_r} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2\right) \cdot \left(1 + \frac{U_2}{U_1}\right) \quad (17)$$

Este valor  $C_p$  se conoce como el coeficiente de potencia de un aerogenerador y representa el rendimiento con el cual funciona el mismo, expresa que cantidad de la potencia total que posee el viento incidente es realmente capturada por el rotor de dicho aerogenerador. Este valor no es constante, puesto que varía en función de las condiciones de funcionamiento del aerogenerador.

La figura siguiente muestra el valor de  $C_p$  en función del cociente de velocidad  $U_2/U_1$ , como puede verse esta función alcanza un máximo para el valor  $16/27$  ( $\approx 0.59$ ).

Figura 22. Límite de Betz.



Fuente: elaboración propia.

### 1.3.8.-Distribución de Weibull.

El conocimiento de la distribución de probabilidades de velocidades de viento, es importante para determinar el potencial eólico disponible, además de obtener otros parámetros energéticos de interés.

La expresión analítica más usada en estudios de energía eólica para representar la probabilidad de velocidades de viento, es la distribución de Weibull (función densidad de probabilidad), cuya forma general es:

$$P(U) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right] \quad (18)$$

Donde  $P(U)$  representa la probabilidad estadística de que ocurra una determinada velocidad  $U$ ;  $c$  es el denominado factor de escala (unidades de velocidad) y  $k$  es el factor de forma (adimensional).

Esta distribución permite la evaluación de varias propiedades importantes de las características del viento en función de los parámetros  $c$  y  $k$ , puede calcularse por ejemplo la probabilidad de que existan velocidades de viento superiores a una dada mediante la expresión:

$$P(U \geq U_x) = \exp \left[ - \left( \frac{U_x}{c} \right)^k \right] \quad (19)$$

La velocidad media y la distribución estándar de la distribución pueden calcularse mediante las expresiones

$$\bar{U} = c \cdot \Gamma \left( 1 + \frac{1}{k} \right) \quad (20)$$

$$\sigma^2 = c^2 \cdot \left[ \Gamma \left( 1 + \frac{2}{k} \right) - \Gamma^2 \left( 1 + \frac{1}{k} \right) \right] \quad (21)$$

Donde  $\Gamma$  es la función Gamma de Euler.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1- ATLAS EÓLICO INICIAL**

A fin de evaluar el potencial eólico del Perú, en el año 2008 se elaboró un Atlas Eólico del Perú por parte del MINEM. Además de esta información, también se dispone de las mediciones de velocidad de viento a 10 metros de altura que realiza el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) a través de sus estaciones automáticas y convencionales ubicadas en el territorio nacional. No obstante, el criterio utilizado por el SENAMHI para seleccionar la ubicación, configuración y equipamiento de éstas estaciones de medición fue prioritariamente agrícola. Por lo tanto, no se dispone de estaciones meteorológicas que sean adecuadas para establecer con garantía el potencial eólico a nivel nacional con fines de generación eléctrica.

MINEM ha considerado realizar el estudio de actualización del Atlas Eólico con fines de mejorar la estimación del potencial eólico nacional, y disponer de información actualizada para promover de manera eficaz y descentralizada, el uso de esta fuente de energía eólica para la generación de electricidad a gran escala (gran eólica). De esta manera, se fortalecerán las capacidades del sector para evaluar el aprovechamiento de la energía eólica con fines energéticos, toda vez que el alcance espacial de este estudio permitirá la identificación de zonas potencialmente energéticas, siendo por consiguiente una herramienta muy útil para la planificación del desarrollo de uso de esta fuente de energía eólica a gran escala.

En este sentido, se ha valorado previamente la información disponible en el Atlas eólico del año 2008 para evaluar su posible utilidad. En dicho Atlas sólo se presentan valores de velocidad media del viento y densidad de potencia para tres alturas (50m, 80m y 100m); sin embargo, estos valores se han obtenido mediante el modelo MASS con una resolución de 5 km x 5 km, por lo que dicha información no ha sido empleada finalmente en la actualización del Atlas eólico.

### **2.2- MODELO DE VIENTO Y PROCESO DE GENERACIÓN DE LOS MAPAS DE VIENTO MEDIO**

#### **2.2.1.-Tecnología de modelado Multiescala: Modelo WRF**

En vista de lo anteriormente comentado, para actualizar el Atlas Eólico con mayor resolución, es necesario por tanto recurrir a un modelo numérico de mesoescala que emplee fuentes de datos de reanálisis.

Hoy en día, los modelos numéricos de alta resolución de las condiciones climáticas proporcionan información sensible de una calidad sin precedentes, crucial para el desarrollo de cualquier proyecto eólico, desde las primeras etapas de prospección hasta el desarrollo del parque eólico o los ajustes a largo plazo de producciones.

En particular, el uso de productos que permiten el acoplamiento de modelos de mesoescala y microescala o, como en el caso que nos ocupa el uso de una cadena multiescalar de modelización, ha ganado una amplia aceptación en toda la comunidad de la industria eólica, ofreciendo datos de referencia fiables para la caracterización de las condiciones de viento y datos de largo plazo.

Los fenómenos meteorológicos se pueden clasificar en diferentes escalas, la división más comúnmente utilizada por la comunidad científica diferencia entre la macroescala, la mesoescala y la microescala.

Los fenómenos de macroescala abarcan la circulación general de los vientos, huracanes, sistemas de alta y baja presión, etc. Estos fenómenos se desarrollan en una longitud de cientos a miles de kilómetros y su duración temporal abarca desde un par de días a varias semanas. Esta resolución es mayor en los fenómenos denominados de mesoescala, en los que su influencia es de decenas de kilómetros y con una duración temporal que abarca desde unos minutos hasta varios días. Las brisas mar-tierra, brisas de valle-montaña y tormentas, se pueden englobar en esta escala. Cuando los fenómenos atmosféricos son generados principalmente por la interacción de la propia atmósfera con la superficie, con una escala espacial de unos pocos kilómetros o metros y temporal de segundos hasta minutos, estamos hablando de fenómenos de microescala. En este nivel se engloban, las rachas de viento, o las islas térmicas urbanas.

En la siguiente tabla se puede observar la clasificación de Thunis y Bornstein (1996) en la que se reflejan estas tres escalas de forma más detallada.

Tabla 4. Clasificación de los fenómenos atmosféricos más relevantes en función de su escala espacio-temporal).

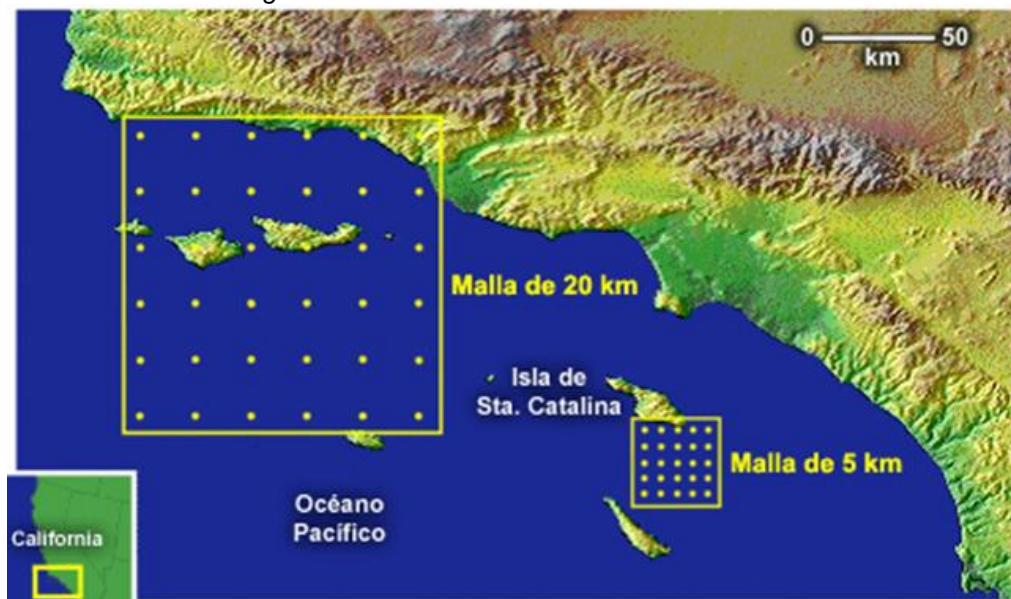
Escala espacial $L_H$	Escala temporal (duración)	Escala	Fenómeno atmosférico
10000 km	1 mes	Macro escala $\alpha$	Circulación general ondas largas, ondas estacionarias, ondas de marea
		Macro escala $\beta$	Ciclones escala sinóptica, ondas baroclinas
2000 km	1 semana	Macro escala $\gamma$	Frentes y huracanes
200 km	1 día	Meso escala $\beta$	Chorros de baja altura, líneas de turbonada, perturbaciones por orografía, vientos y ondas de montaña, brisas marinas, efectos urbanos
20 km	1 hora	Meso escala $\gamma$	Tormentas, turbulencia en aire claro
2 km		Meso escala $\delta$	Cúmulos, tornados, efectos catabáticos
200 m	30 minutos	Meso escala $\delta$	Cúmulos, tornados, efectos catabáticos
20 m	1 minuto	Micro escala $\beta$	Remolinos de polvo, corrientes térmicas, estelas, plumas, mangas de agua
2 m	1 segundo	Micro escala $\gamma$	Turbulencia, capas superficiales, sonido
		Micro escala $\delta$	

Fuente: Thunis y Bornstein (1996).

La predicción meteorológica y la descripción detallada de ciertos fenómenos meteorológicos han tenido un avance importante gracias al uso de los modelos meteorológicos de predicción. Existen diversos modelos según la escala temporal y espacial de los fenómenos a describir. Por un lado, para simular los movimientos atmosféricos de gran escala (macroescala), se encuentran los modelos de circulación general hidrostática, que trabajan con una baja resolución espacial y temporal. En el otro extremo se encuentran los modelos de alta resolución, son modelos no hidrostáticos y están diseñados para describir fenómenos de microescala, con una alta resolución espacial (decenas de metros) y temporal (minutos-horas). Los modelos de área limitada, en los que englobamos los regionales y mesoescalares dependiendo de su resolución espacial, se centran en el estudio de fenómenos generados en la mesoescala.

Cuanto mayor resolución tenga la simulación, tanto más pequeñas serán las características que el modelo puede representar adecuadamente. Esta resolución está relacionada con la distancia entre los puntos de malla. A modo de ejemplo, un espaciado de malla de unas decenas de kilómetros podría capturar la esencia del flujo en la región de bahías y ensenadas del sur de California, sin embargo, para detectar los remolinos de viento a sotavento de la Isla Santa Catalina vamos a necesitar un espacio entre los puntos del mallado mucho menor.

Figura 23. Diferentes resoluciones de mallado.

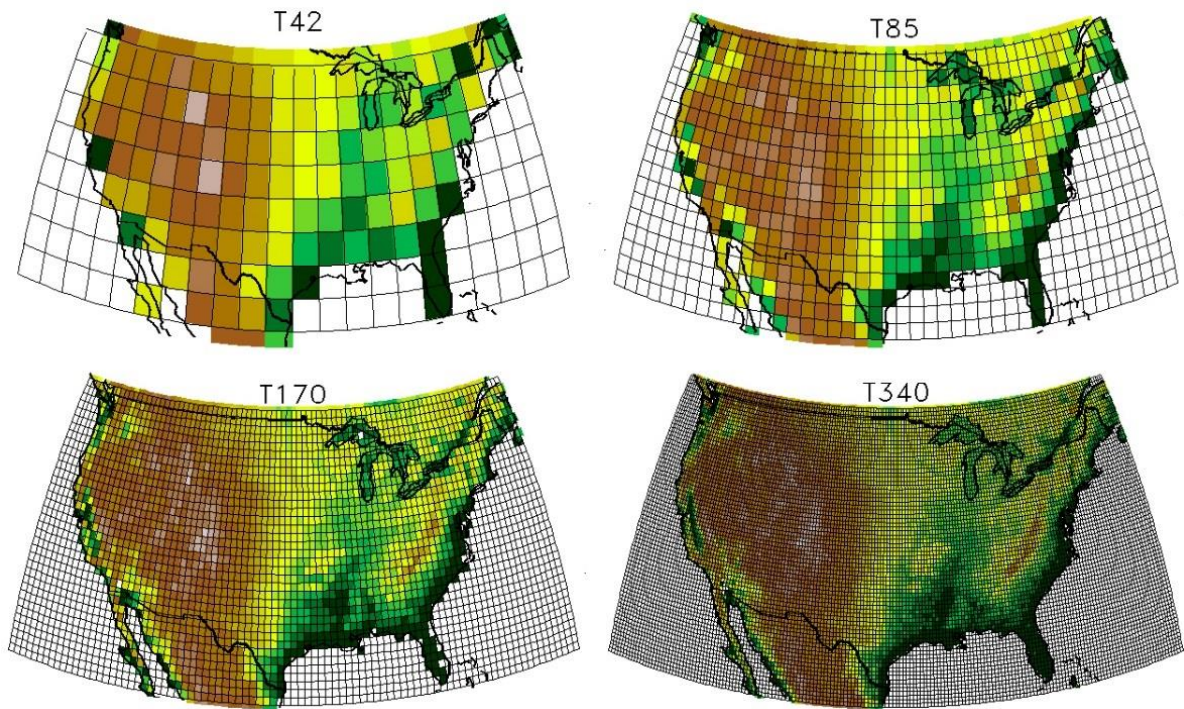


Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

Al igual que para representar correctamente algunos fenómenos se necesita una determinada resolución horizontal, el modelo se debe configurar con una resolución vertical igualmente adecuada al fenómeno a simular.

Las necesidades para el uso en el ámbito de las energías renovables abarcan tanto el campo de la mesoescala como la microescala.

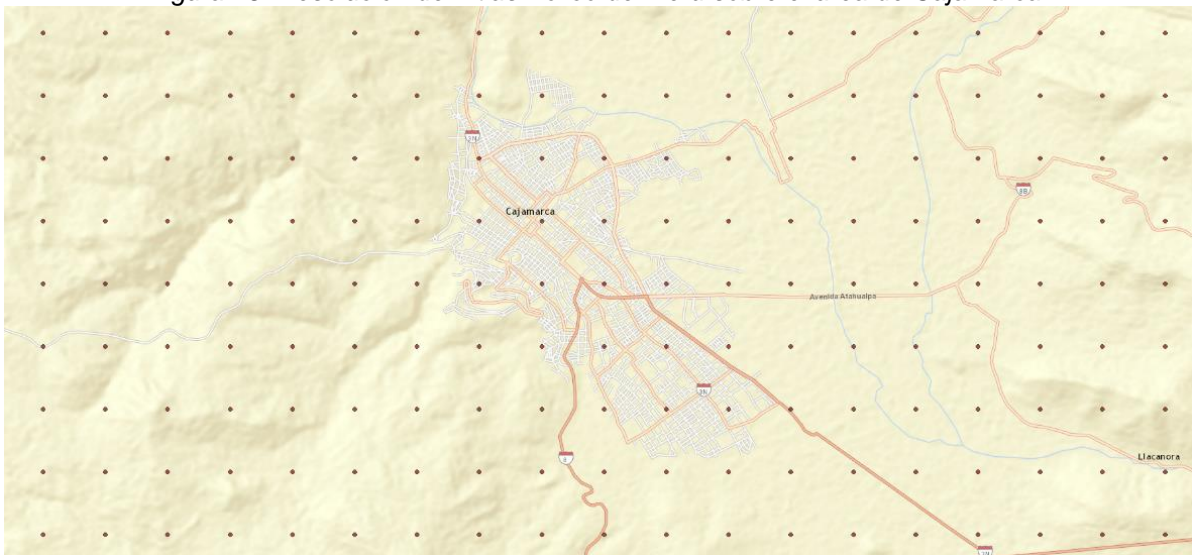
Figura 24. Diferentes resoluciones espaciales de un modelo.



Fuente: NCAR (Warren Washington).

En este caso concreto del Atlas Eólico del Perú, se ha empleado una resolución espacial de 1 km. La imagen siguiente muestra un ejemplo de la malla espacial empleada para el desarrollo del Atlas Eólico. La resolución vertical usada para el Atlas de Perú es de unos 15 metros en los primeros 200 metros verticales. Es decir, que el modelo contiene aproximadamente 12 capas en los primeros 200 metros. A medida que nos alejamos de la superficie (y hasta la troposfera) los niveles van espaciándose puesto que no es necesario usar tanto detalle para capturar correctamente los fenómenos meteorológicos de interés.

Figura 25. Resolución del Atlas Eólico del Perú sobre el área de Cajamarca.



Fuente: Elaboración propia. Aplicación Web-Gis Atlas Eólico del Perú.

Existen diversos modelos meteorológicos que permiten la simulación de fenómenos de mesoescala: entre otros se pueden enumerar: MASS (Kaplan et al. 1982), MC2 (Benoit et al. 1997), ARPS (Xue et al. 2000), COAMPS (Hodur 1997), RAMS (Pielke y Walko 1994), MM5 (Dudhia, 1993; Grell et al. 1995) y WRF (Michalakes). Este último modelo, dado su continuo desarrollo, comunidad de usuarios internacional (instituciones y centros de investigación) y flexibilidad, se estima adecuado para desarrollar la actividad de modelización atmosférica meso-micro escalar en el proyecto. Este modelo permite, mediante anidamiento, resoluciones propias de la microescala; asimismo se pueden acoplar sus resultados a los de otros modelos de microescala utilizados en la industria con fines de evaluación energética.

En general estos modelos posibilitan la tarea de anidamiento (varias etapas), logrando resoluciones más finas las últimas fases del proceso. A modo de resumen, inicialmente se parte de un área amplia, suficiente para observar fenómenos mesoescalares, y de baja resolución. En pasos posteriores el área de estudio se va reduciendo al área de interés, aumentando la resolución hasta llegar a niveles adecuados para usos energéticos. Este proceso se desarrolla mediante anidamiento de dominios, que consiste en incorporar una rejilla con resolución más fina dentro de una rejilla de área superior. Las condiciones de frontera son dadas por la rejilla mayor a la menor.

La tecnología base aplicada en el desarrollo del presente proyecto, es el modelo meteorológico Weather Research and Forecasting Model (WRF). El modelo WRF está sustentado por las principales instituciones meteorológicas estadounidenses y presenta un continuo desarrollo, actualizándose con los últimos avances en simulación, y permitiendo el anidamiento. Teniendo en cuenta lo anterior, se estima adecuado para desarrollar la actividad de modelización atmosférica meso-micro escalar del Atlas Eólico del Perú.

A parte de las instituciones involucradas en su creación, este modelo es utilizado por instituciones y centros meteorológicos de diversos países. Por ejemplo, en España, la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) ha adaptado el modelo WRF para posibilitar la asimilación de los datos provenientes de su modelo regional High Resolution Limited Area Model (HIRLAM), y de esta forma conseguir aumentar la resolución de los resultados, llegando a los 5.5 km de resolución (en cualquier caso alejado de los objetivos del proyecto).

En el Perú el Centro de Predicción Numérica (SENAMHI) emplea el modelo regional Eta para los dominios: Perú (22 Km) y Sudamérica (32 Km). Las condiciones iniciales y de frontera son obtenidas del modelo Global Forecast System (GFS). El modelo Eta es original de Yugoslavia, Universidad de Belgrado y fue desarrollado por el National Center for Environmental Prediction (NCEP) de los Estados Unidos, habiendo sido implementado en el SENAMHI-Perú en el año 1999. Para el modelamiento de los vientos costeros en SENAMHI también emplea el modelo Regional Atmospheric Model System (RAMS).

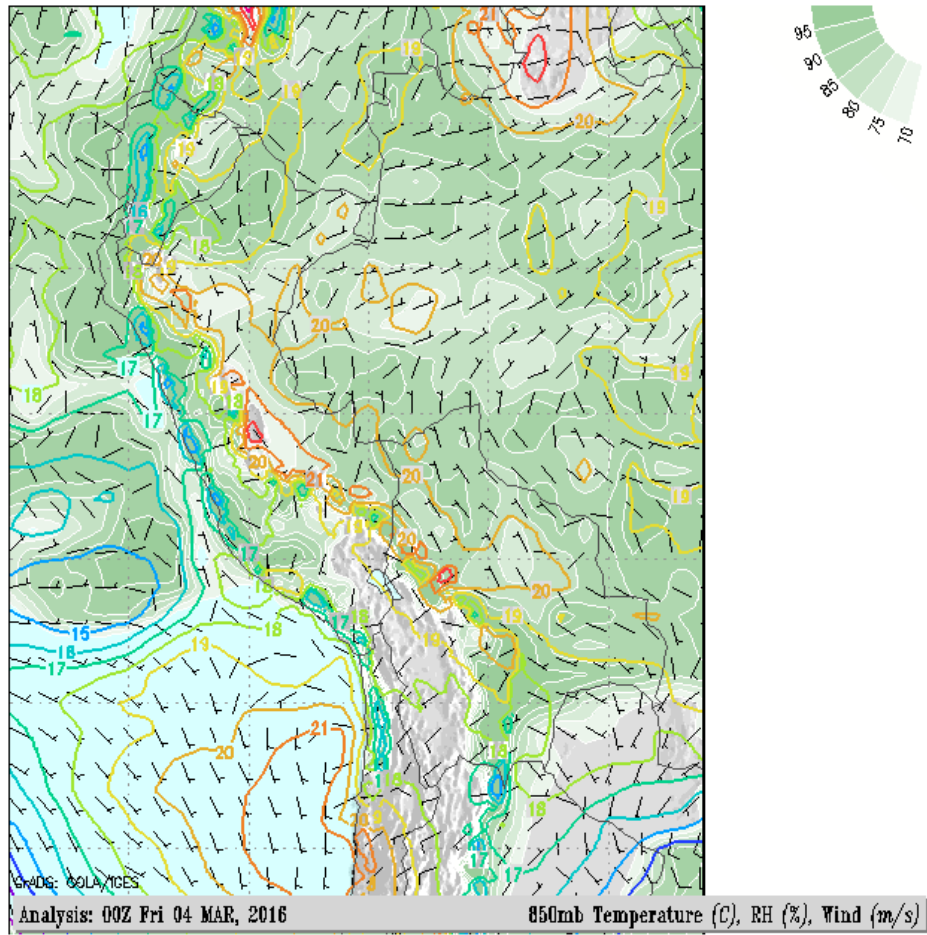
*Tabla 5. Características del modelo ETA/SENAMHI.*

	Perú	Sudamérica
Área	Longitud: 85° W 56° W Latitud: 28° S 4° N	Longitud: 116° W 34° W Latitud: 54° S 13° N
Resolución espacial	22 km x 22 km, 38	32 km x 32 km, 50
Resolución temporal	Cada 6 horas Dos veces al día (00Z y 12Z)	
Condiciones iniciales	Atmósfera y Océano: GFS (Global Forecast System)	
Parametrizaciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Convección: Kain-Fritsch</li> <li>• Capa límite: Mellor – Yamada 2.5</li> <li>• Radiación: GFDL</li> <li>• Modelo dinámica: Hidrostático</li> </ul>	
Tiempo de pronóstico	72 horas	120 horas
Periodo disponible	Enero 2007 - actualidad	Enero 2009 - actualidad

Fuente: SENAMHI.

*Figura 26. Modelo Eta: Temperatura (°C), Humedad Relativa (%) y Velocidad del viento a 850 mb.*





Fuente: SENAMHI.

### 2.2.2.-Núcleo del modelo

El núcleo del enfoque técnico del modelado para este propósito es el modelo atmosférico WRF (Weather Research and Forecasting System) empleado operacionalmente por Vortex.

El proyecto Weather Research and Forecast model (Michalakes et al, 2001) tiene como objetivo el desarrollo de un modelo de pronóstico meteorológico y un sistema de asimilación de datos que permita avanzar en el conocimiento y predicción de fenómenos mesoescalares.

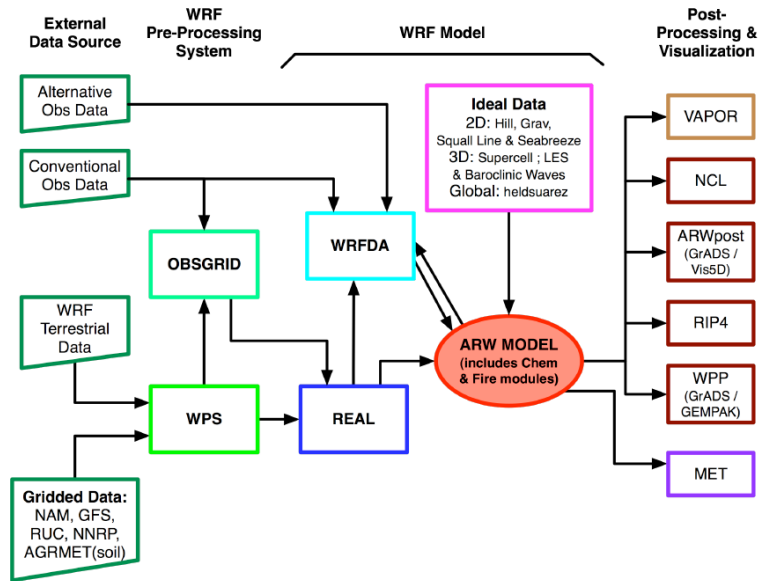
El esfuerzo para desarrollar WRF ha sido una asociación colaborativa, que involucra principalmente al Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR), la Corporación Universitaria de Investigaciones Atmosféricas (UCAR), la Administración Oceánica y Atmosférica Nacional (NOAA), los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP), el Laboratorio de Sistemas de Predicción (FSL), la Agencia del Tiempo de la Fuerza Aérea (AFWA), el Laboratorio de Investigación Naval, la Universidad de Oklahoma y la Administración Federal de Aviación (FAA). WRF permite a los investigadores llevar a cabo simulaciones que reflejan tanto los datos reales como configuraciones idealizadas. WRF ofrece la predicción operativa de un modelo que es flexible y eficiente computacionalmente, mientras se producen mejoras en los avances de la física de los modelos numéricos y las técnicas de asimilación de datos aportados, por parte de la amplia comunidad de investigadores.

WRF es un modelo de código abierto basado en una gran comunidad de usuarios (más de 30000), donde los últimos avances en la física y los valores numéricos se incorporan de forma modular. El modelo WRF se ha empleado en gran medida para la investigación y la predicción meteorológica operativa y análisis climático. Representa una tecnología vanguardista de modelado y está considerado como el estado-del-arte para la generación de mapas de mesoescala. Además de optimizar núcleos dinámicos y físicos, incluye un dominio nido, lo que permite ampliar la circulación atmosférica hasta la resolución necesaria para trabajar con parques eólicos.

Actualmente está disponible la versión 3.8 del modelo. Es un modelo regional, no-hidrostático, que permite resoluciones horizontales de decenas de metros y 60 niveles de presión verticales, distribuidos de manera que la resolución es mayor en las capas más bajas de la atmósfera y disminuye según subimos en altura (presión). Posee la capacidad de asimilar datos de observaciones meteorológicas, incorpora los últimos avances en parametrizaciones físicas e incluye la capacidad de trabajar con anidamientos.

*Figura 27. Esquema básico de la preparación de la simulación en WRF.*

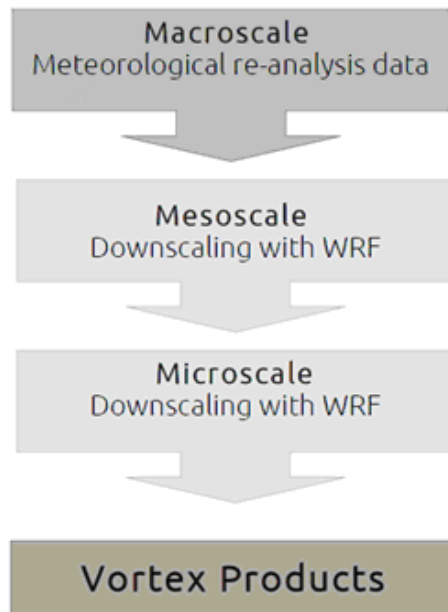
### WRF Modeling System Flow Chart



Fuente: NCAR.

El sistema de “downscaling” (reducción de escala) del modelo WRF funciona eficazmente con todas las escalas espaciales del proyecto (tamaño de dominio y resolución) y los requisitos de escala de tiempo. El CONSORCIO ha ejecutado de forma fiable las tareas modelo de acuerdo con las especificaciones requeridas y las distintas fases del proyecto.

Figura 28. Esquema de funcionamiento del modelo WRF.



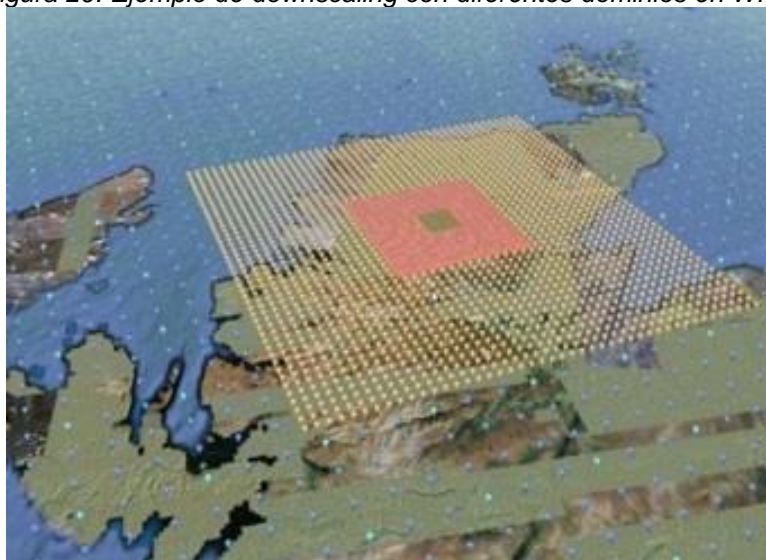
Fuente: elaboración propia.

### 2.2.3.-Simulaciones de Microescala

Al preservar la continuidad del anidamiento de dominios (downscaling) de WRF, se obtiene una evaluación específica de los parámetros de energía eólica, minimizando el impacto de cualquier interpolación artificial o adecuación entre distintas escalas atmosféricas. En el proyecto se ha realizado un downscaling desde  $0.25^\circ$  hasta  $0.008^\circ$  (1 km de resolución)

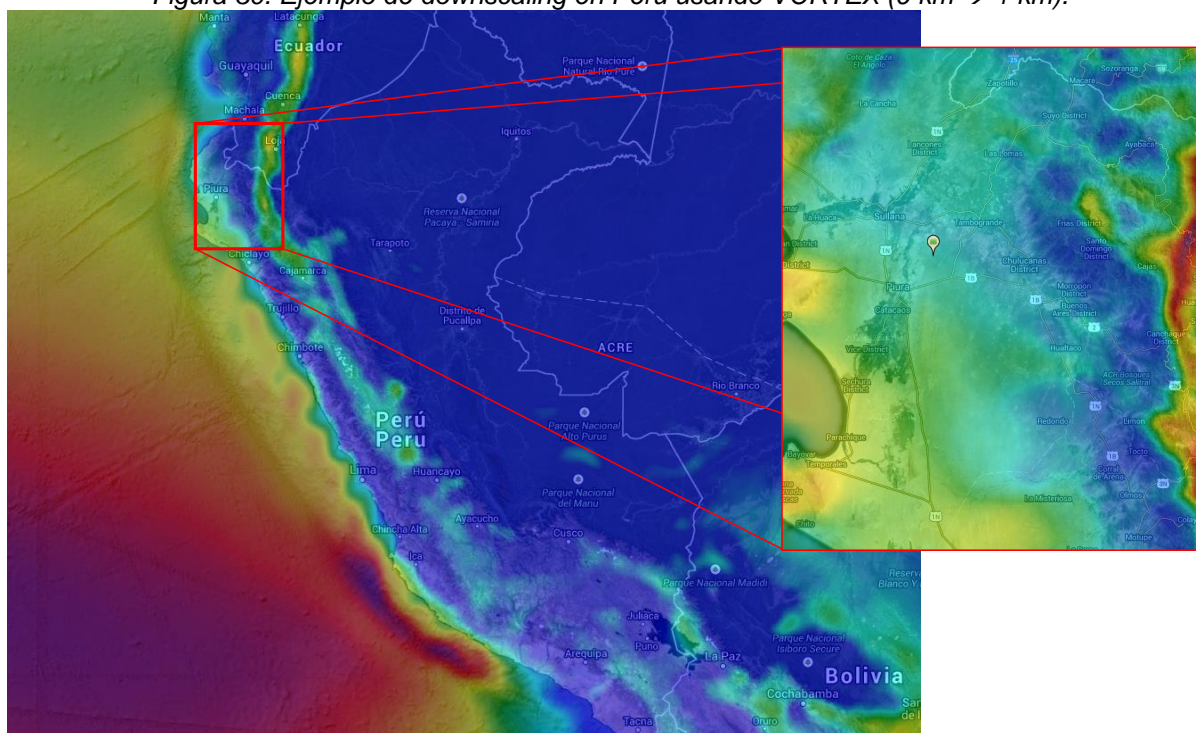
A continuación, se muestran algunos ejemplos de downscaling empleando el modelo de Vortex.

Figura 29. Ejemplo de downscaling con diferentes dominios en WRF.



Fuente: elaboración propia.

Figura 30. Ejemplo de downscaling en Perú usando VORTEX (9 km  $\rightarrow$  1 km).



Fuente: elaboración propia.

#### 2.2.4.-Especificaciones del modelo

El marco del modelo WRF es el resultado de un desarrollo constante en la modelización del clima y el tiempo, que ha implementado progresivamente módulos de mayor resolución para caracterizar los regímenes de flujo microescala. De hecho, el modelo WRF es ahora la primera generación de modelos encadenados multi-escala que puede ir sin fisuras desde escalas regionales a escalas de parques eólicos. En cuanto a la microescala, WRF incorpora una innovadora capa límite planetaria (PBL) que puede manejar eficazmente la turbulencia y los cambios que se producen en el flujo debido a la alta resolución de los efectos orográficos. Por otra parte, WRF es una solución única para proporcionar una representación dinámica de flujo de viento a una resolución de parque eólico incluyendo tanto la turbulencia mecánica como la térmica.

#### 2.2.5.-Ventajas del modelo WRF

El CONSORCIO ha empleado el modelo de Vortex para realizar la evaluación del potencial eólico del Perú. El núcleo tecnológico de Vortex es el modelo atmosférico no lineal WRF (Weather Research and Forecasting model).

El uso de un modelo de última generación como WRF, en constante evolución, que es validado y usado por los más prestigiosos centros de investigación internacionales, asegura unos resultados de gran calidad y fiabilidad.

Entre las ventajas del modelo WRF, pueden destacarse las siguientes:

Tabla 6. Ventajas y desventajas del modelo WRF.

Ventajas
<ul style="list-style-type: none"><li>➤ WRF es un modelo gratuito con una comunidad de más de 10000 usuarios. Anualmente se producen actualizaciones a partir de las necesidades y feedback de la comunidad.</li><li>➤ -WRF permite el uso de varios Reanálisis como input y por tanto será capaz de generar un <i>ensemble</i> de salida mucho más completo.</li><li>➤ WRF permite muchas más parametrizaciones físicas para ajustarlo a las peculiaridades de cada simulación.</li><li>➤ WRF es un modelo No-Hidrostático.</li><li>➤ WRF permite la paralelización computacional permitiendo una generación muy superior de datos de salida y mejorando la estadística del <i>ensemble</i>.</li></ul>

Fuente: elaboración propia.

#### 2.2.6.-Datos de entrada del modelo

El modelo WRF necesita una serie de datos para ser inicializado. Los datos que se han empleado para la realización del Atlas Eólico han sido los siguientes:

##### 1. Datos de Reanálisis

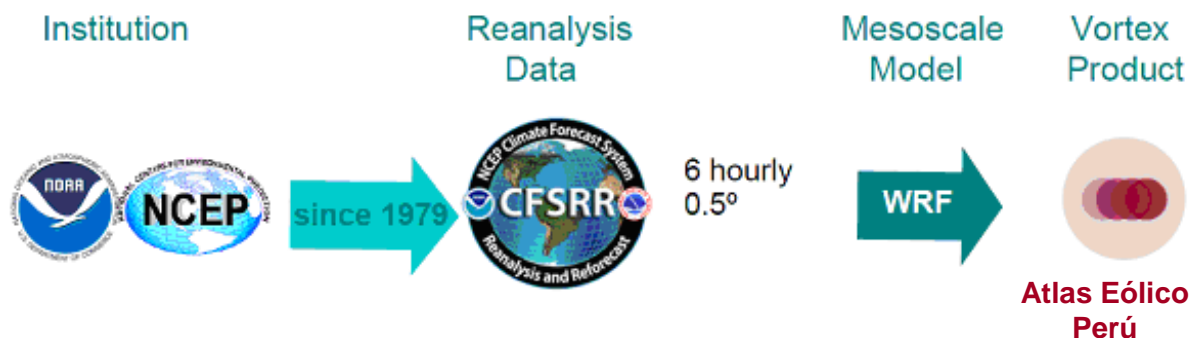
El modelo emplea como datos de entrada una de las fuentes de la última generación de proyectos de reanálisis: NCEP/CFSR [Ref 12].

La base de datos Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) del NCEP se completó durante el periodo 1979 - 2009 (31 años) y posteriormente fue extendido a marzo 2011. El CFSR fue diseñado como un sistema mundial acoplado océano-atmósfera-mar-superficie-hielo de alta resolución para proporcionar la mejor estimación del estado de estos dominios acoplados durante dicho periodo de tiempo. El actual CFSR será extendido como un producto a tiempo real en el futuro.

La resolución atmosférica global del CFSR es aproximadamente de unos 38 km (T382) con 64 niveles que se extienden desde la superficie hasta 0.26 hPa. CFSR se inicializa 4 veces al día (0000, 0600, 1200 y 1800 UTC), y los productos (cada 6 horas) de la superficie atmosférica, oceánica y terrestre están disponibles cada 0.3°, 0.5°, 1.0°, 1.9° y de 2.5° grados horizontales de resolución. Sin embargo, no todos los parámetros están disponibles en todas las resoluciones y algunos parámetros no se analizan (por ejemplo, temperatura a 2 metros o vientos a 10 metros).

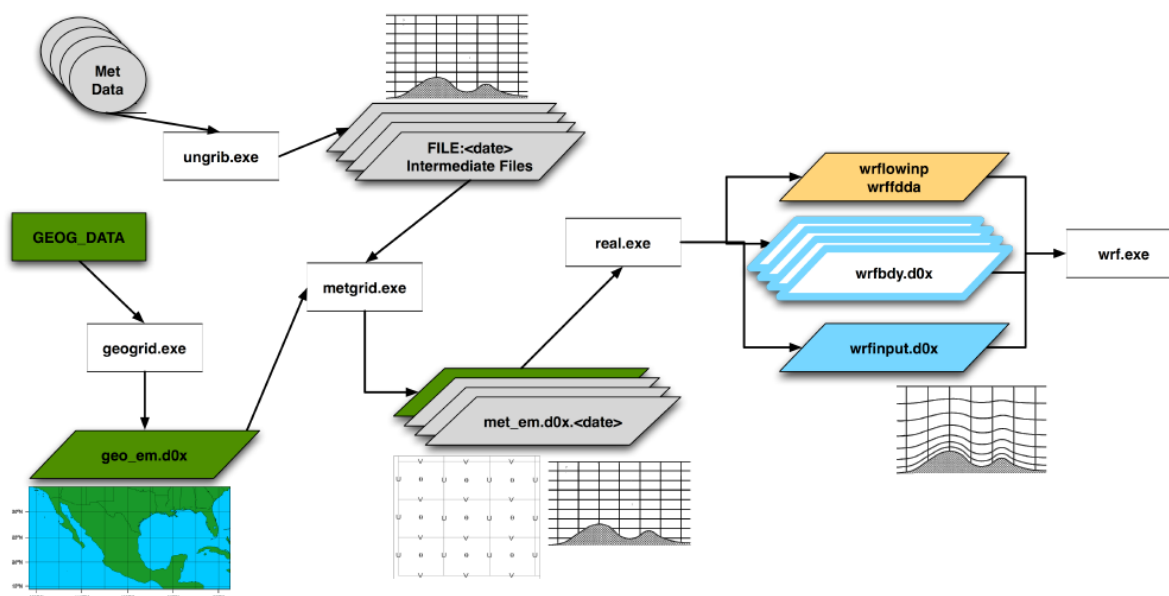
Para el desarrollo del Atlas Eólico se han empleado 20 años de la base de datos de CFSR *clusterizados* en 730 días.

Figura 31. Datos de reanálisis empleados por el modelo.



Fuente: elaboración propia

Figura 32. Uso de datos en el modelo WRF.

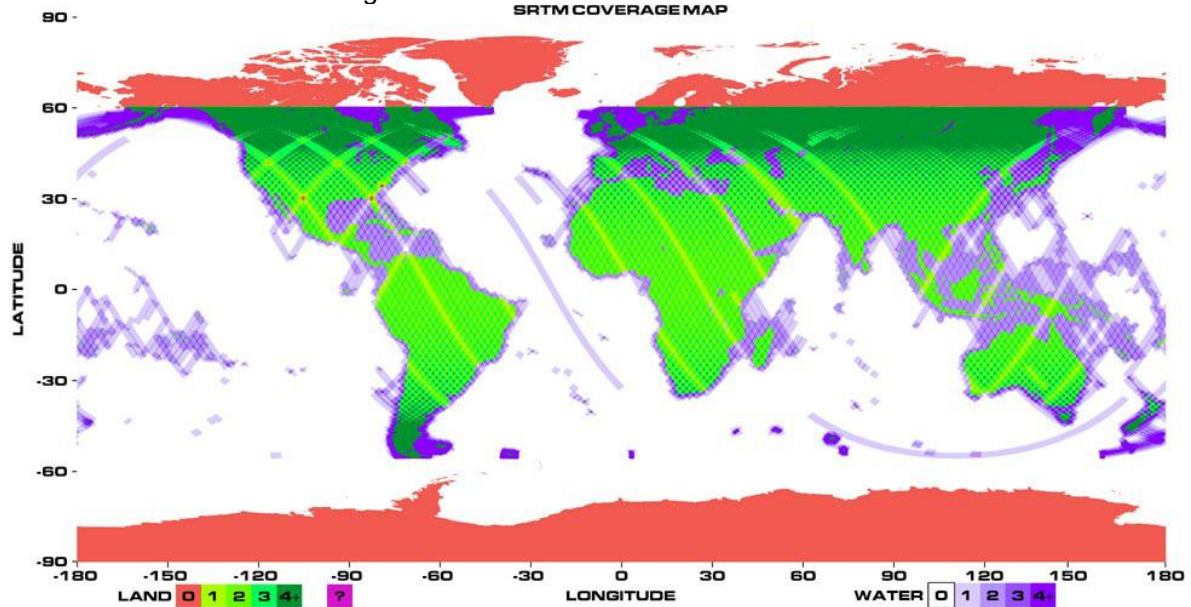


Fuente: NCAR.

## 2. Datos Topográficos

Se ha empleado la base de datos topográfica del SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) donde se obtuvieron datos de elevación a escala casi mundial para generar una base de datos topográficos digital completa de La Tierra. SRTM consistía en un sistema de radar especialmente modificado que voló a bordo del transbordador espacial Endeavour durante una misión de 11 días en febrero de 2000. SRTM es un proyecto internacional liderado por la National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) y la National Aeronautics and Space Administration (NASA). La resolución espacial de los datos de topografía es 3 segundos de arco (aproximadamente 90 m).

Figura 33. Cobertura de datos del SRTM.



Fuente: JLP/NASA.

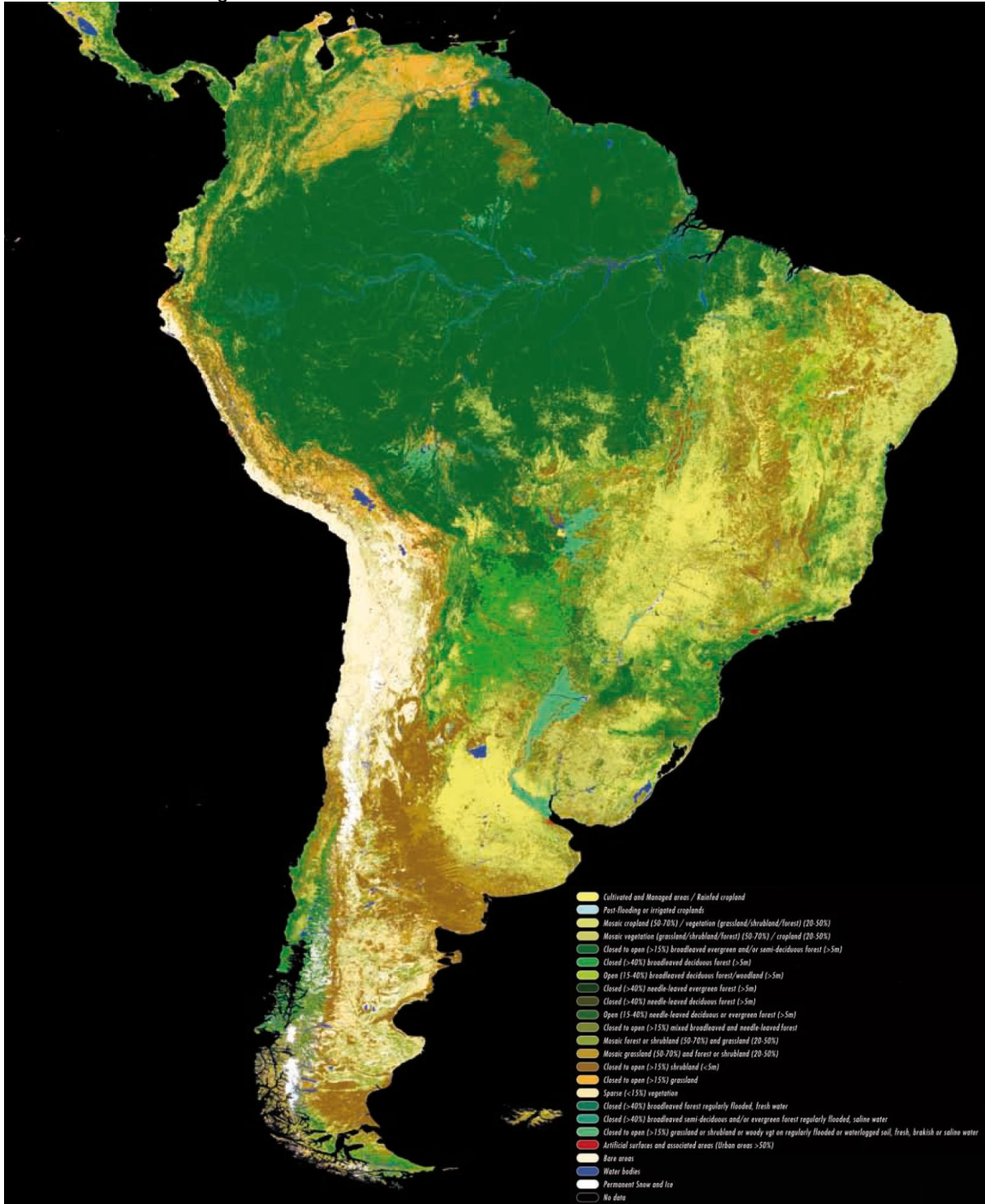
### 3. Datos de Rugosidad

Los datos de cobertura de la tierra empleados provienen de ESA GlobCover Land Cover 1, un producto derivado de una clasificación automática y regional afinada de una serie temporal de mosaicos de MERIS FR. Sus 22 clases de cobertura terrestre globales se definen junto con el Sistema de clasificación de cobertura terrestre de Naciones Unidas (LCCS). Cada mosaico está disponible en el formato de datos jerárquicos EOS2 (HDF) y se organiza en baldosas de 5 ° x 5 ° sin solapamiento. Por lo tanto, toda la Tierra está cubierta por 2.592 teselas (72 horizontales x 36 verticales). Solamente las teselas que incluyen la cobertura del suelo se procesan, lo que reduce el número de baldosas disponibles. Los productos GlobCover se basan en ENVISAT Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) datos Nivel 1B adquiridos en modo Resolución completa con una resolución espacial de 300 metros. Para la generación de los datos de nivel 1B, los datos brutos adquiridos se han remuestreado en una cuadrícula orientada, con valores de píxeles que han sido calibrados para coincidir con la radiancia de la parte superior de la atmósfera (TOA).

La base de datos ESA GLOBCOVER (300 m) se empleará para caracterizar las clases de suelo (rugosidad). Datos de la variación estacional de la ESA GLOBCOVER serán incluidos para describir mejor los efectos del albedo durante los períodos de invierno. Más información sobre la base de datos ESA GLOBCOVER puede verse en [Ref 15].



Figura 34. Base de datos ESA GLOBCOVER en Sudamérica.



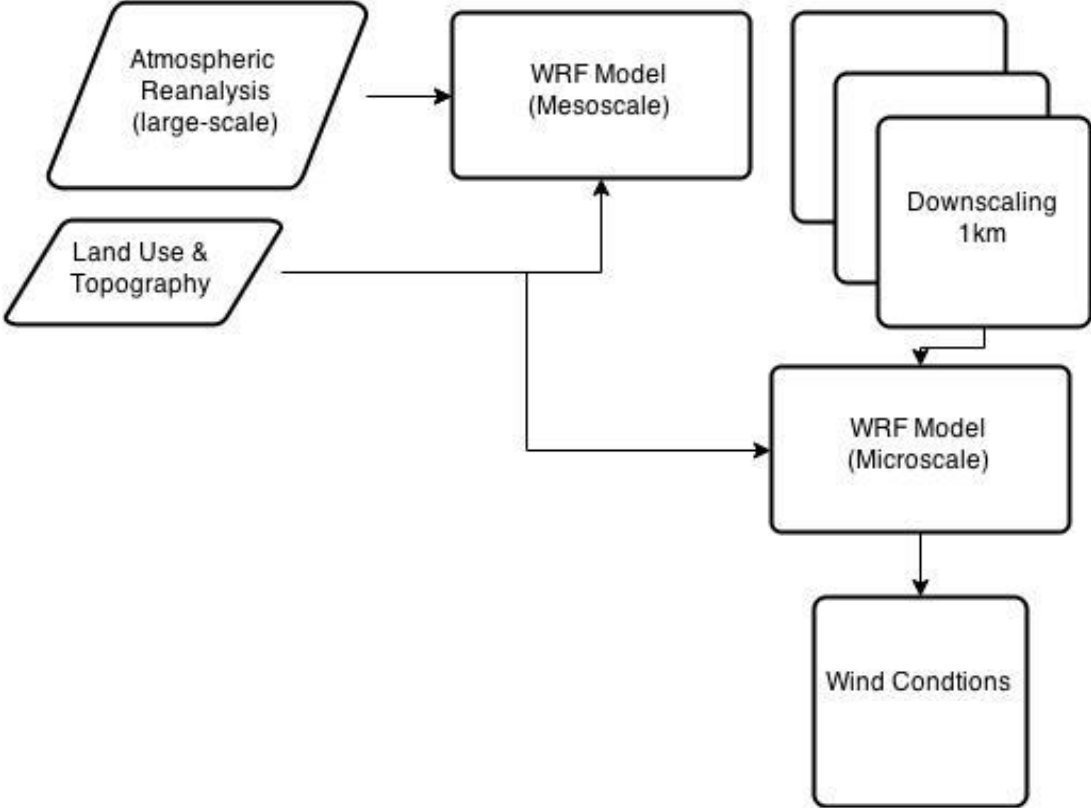
Fuente: ESA.

Vortex hace uso del modelo WRF (Weather & Research Forecast) con el fin de reducir la escala (“downscaling”) de los datos de reanálisis a la resolución final de 1 Km (1000 x 1000 m). En este proceso de downscaling, se utilizan varios dominios anidados de mayor a menor resolución de mallado, comenzando a 27 km (0.25°) y terminando a 1 km (0.008°). El modelo WRF ofrece diversas variables de salida en cada uno de los puntos de la malla 1000 m x 1000 m y por lo tanto no es necesario aplicar ningún método de interpolación para dar lugar a los resultados finales. Cada uno de los puntos de la malla se escribe directamente en los archivos finales, evitando cualquier problema o error de truncamiento derivado de técnicas de interpolación.

En relación con el tratamiento del terreno complejo, no se aplica ningún código diferente. El modelo WRF es capaz de modelar el viento a diferentes resoluciones y cada una de las escalas se trata de acuerdo con las ecuaciones de Navier-Stokes y las correspondientes parametrizaciones de la capa límite atmosférica (PBL) y de la capa límite superficial disponibles en el modelo, que son ampliamente aceptados por la comunidad de la industria eólica.

Más información acerca del modelo WRF puede encontrarse en el manual del modelo (ver referencia 7 en el Anexo A).

Figura 35. Metodología del modelado del Atlas Eólico.



Fuente: elaboración propia.

## **2.3- BASES DE DATOS Y PROCESADO DE LOS DATOS EMPLEADOS**

Además de las fuentes de datos empleadas en la modelización mesoescalar del Atlas Eólico, la aplicación Web-GIS, emplea una serie de bases de datos que permiten la identificación de los emplazamientos viables para el desarrollo posterior de un parque eólico. A continuación, se describen cada una de las bases de datos incluidas en la aplicación Web-GIS.

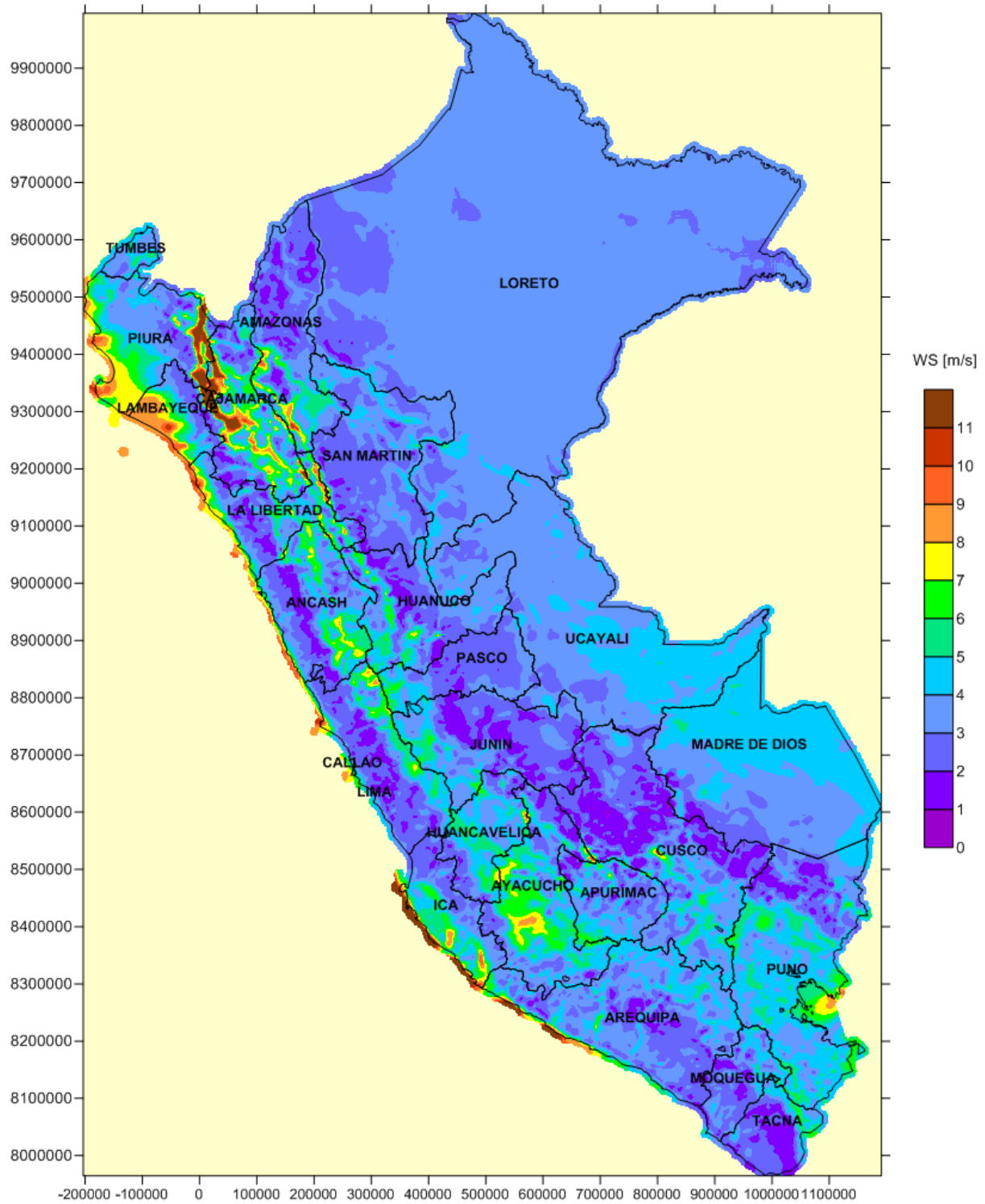
### **2.3.1.-Atlas de viento**

El Atlas de viento consiste en la velocidad media anual del viento a 7 alturas distintas (10 m, 25 m, 50 m, 75 m, 100 m, 125 m y 150 m) obtenidas con el modelo WRF comentado en el apartado anterior. La aplicación Web-GIS proporciona la siguiente información para estas 7 alturas:

- Velocidad media anual del viento
- Densidad de potencia media anual del viento
- Distribución anual media de frecuencias del viento (rosa de vientos)
- Distribución anual media de velocidad del viento (distribución de Weibull)
- Temperatura media anual del aire
- Presión media anual del aire
- Humedad relativa media anual del aire
- Densidad media anual del aire
- Intensidad de turbulencia media del aire (a partir de 3 m/s)

En el apartado 4.3 se detalla la metodología empleada para la obtención de estos parámetros. En los Anexos C a J se muestran los mapas obtenidos. A continuación, puede verse un ejemplo de mapa eólico del Perú a 100 metros de altura.

Figura 36. Mapa velocidad media anual del viento a 100 m (UMT-WGS84-S18).



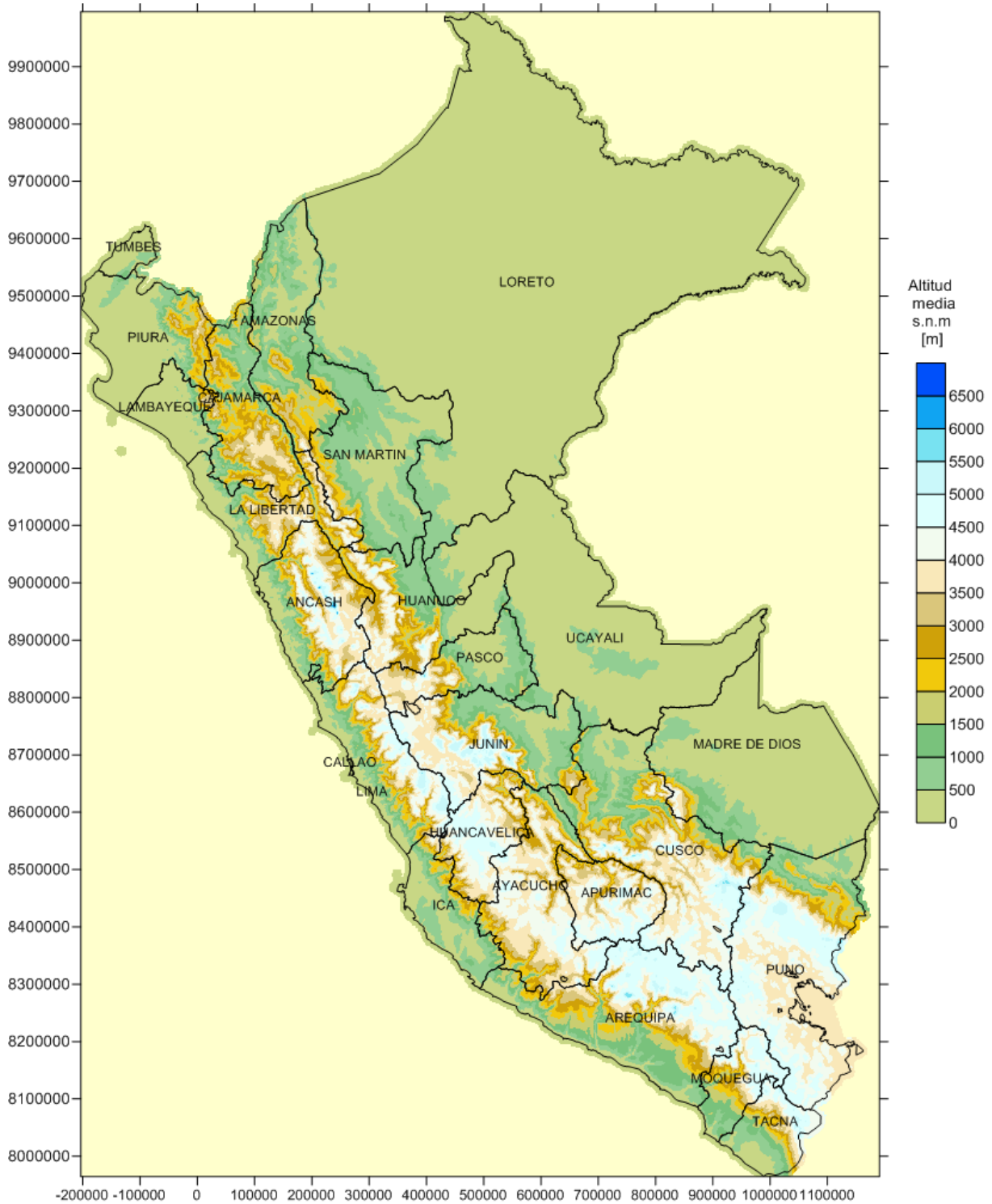
Fuente: elaboración propia.

### 2.3.2.-Modelo digital del terreno, Mapas de altitud y curvas de nivel

La aplicación Web-GIS del Atlas Eólico incluye un mapa digital (vectorial SIG formato .shp) topográfico del Perú con altitud y curvas de nivel cada 1000, 500 y 50 metros, cotas y puntos geodésicos. La información proviene del Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM) y del SRTM.

La aplicación también permite descargar mapas topográficos en formato digital.

Figura 37. Topografía digital del Perú empleada. SRTM (UTM-WGS84-S18).



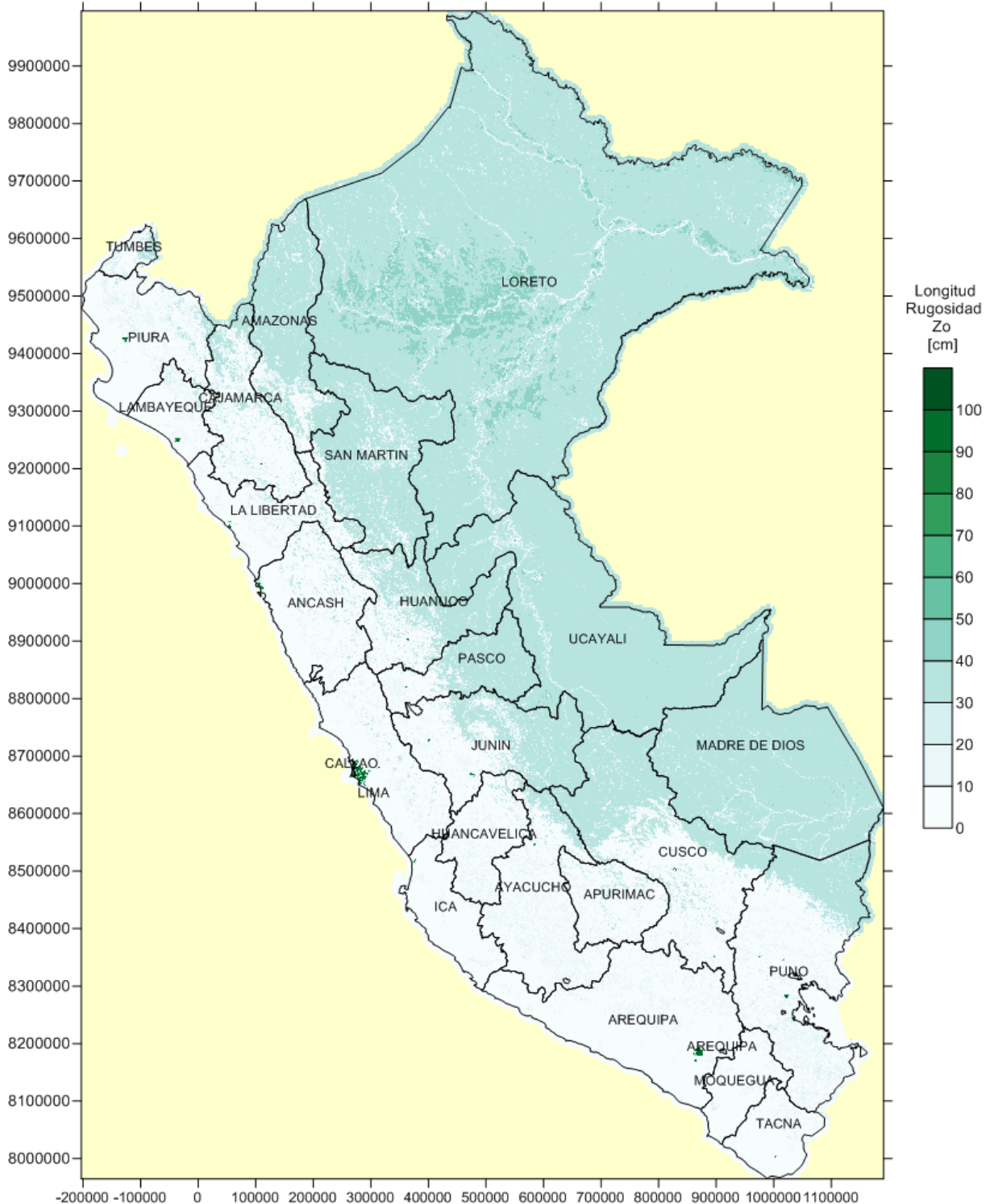
Fuente: Elaboración propia a partir de (SRTM).

### 2.3.3.-Mapa de rugosidades

La aplicación Web-GIS incluye un mapa de rugosidades del territorio del Perú. La aplicación permite visualizar la rugosidad de la zona de interés, así como descargar mapas de rugosidad. Se ha empleado la fuente de ESA GlobCover Land Cover 1.

El mapa de usos del suelo del Perú está también incluido en la aplicación. Esta información ha sido facilitada por el Ministerio de Agricultura y Riego del Perú (MINAGRI)

Figura 38. Mapa de rugosidades del terreno en metros (UTM-WGS84-S18).

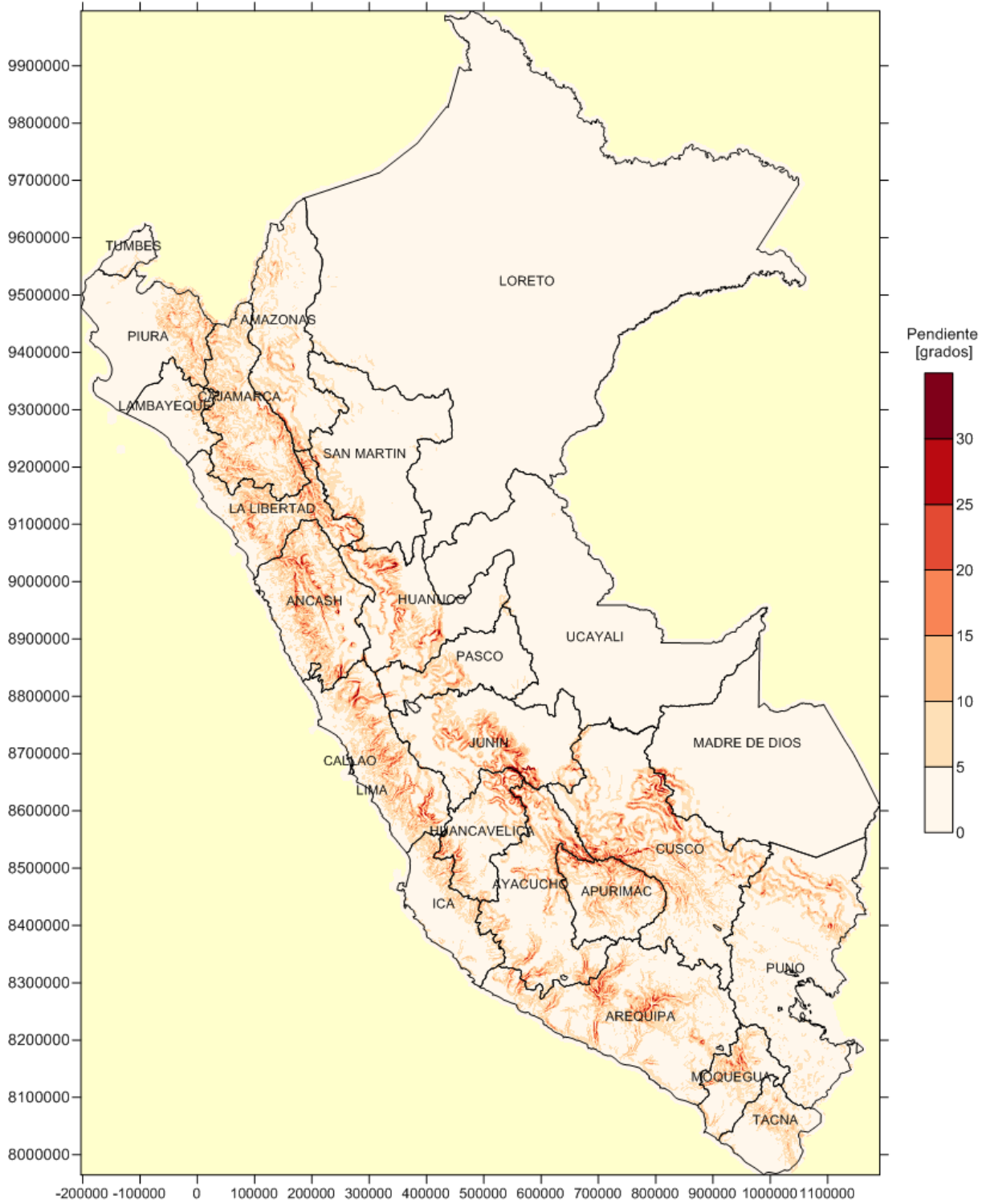


Fuente: Elaboración propia (a partir de ESA Globcover, Ref 15).

### 2.3.4.-Pendientes del terreno del Perú

A partir de los datos de elevación del SRTM se ha realizado un mapa de pendientes del terreno de todo el territorio del Perú. La aplicación Web-GIS incluye este mapa en formato raster.

Figura 39. Mapa de pendientes del terreno del Perú (UTM-WGS84-S18).

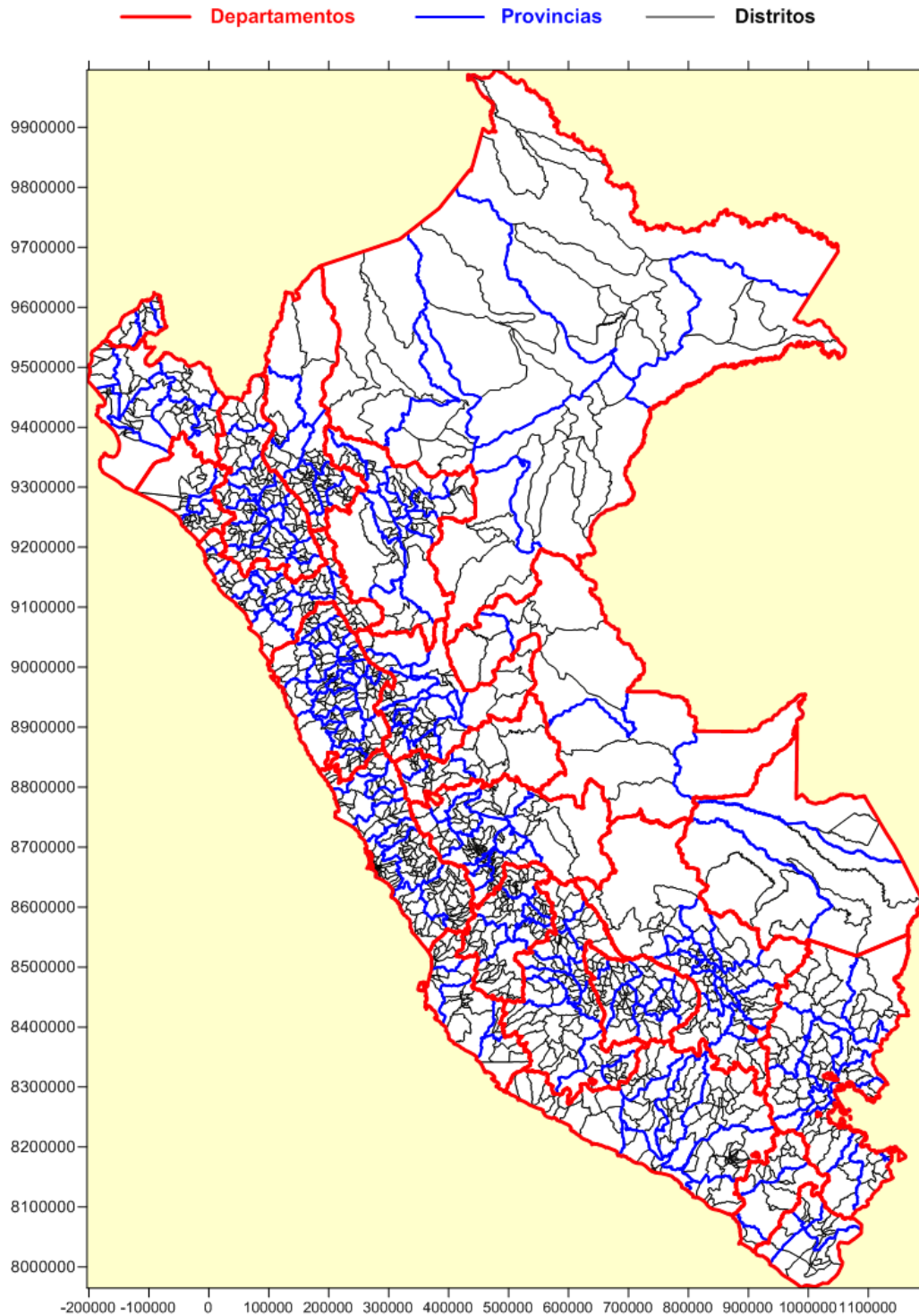


Fuente: elaboración propia (a partir de SRTM).

### 2.3.5.-Límites administrativos del Perú

La información sobre los límites administrativos (Provincias, Distritos y Departamentos) ha sido facilitada por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). Esta información puede consultarse en la aplicación Web-GIS. A continuación, se muestra un mapa con los límites considerados para la elaboración del Atlas.

Figura 40. Mapa de límites administrativos del Perú (UMT-WGS84-S18).



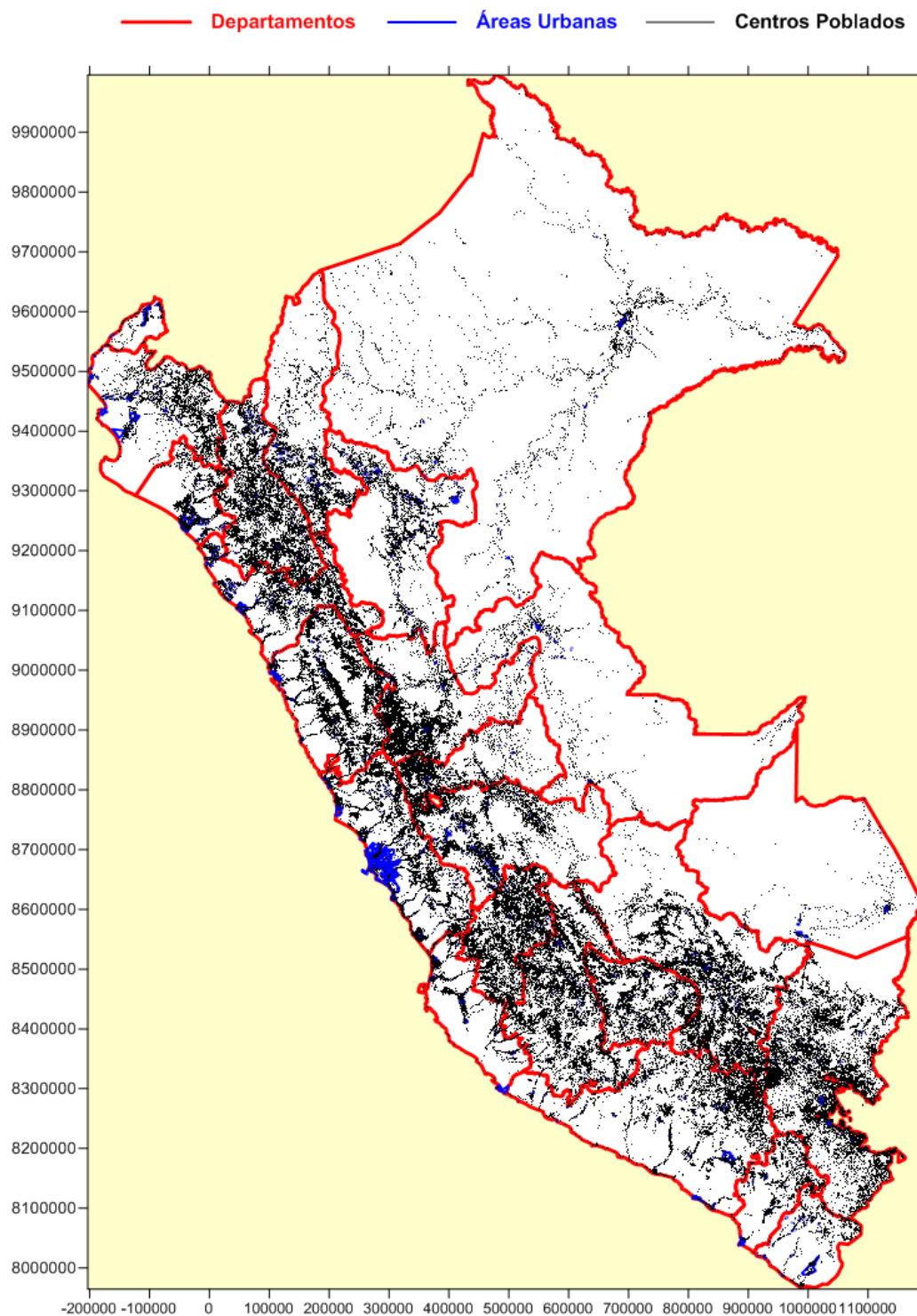
Fuente: INEI.



### 2.3.6.-Áreas urbanas

La aplicación proporciona distancias entre la zona de interés y los municipios más cercanos. La base de datos empleada contiene información sobre centros poblados y áreas urbanas y ha sido facilitada por el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) a partir de los datos del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) y del Proyecto de Mejoramiento de Electrificación Rural mediante Fondos Concursables (FONER). A continuación, se muestra un mapa con centros poblados y áreas urbanas consideradas para la elaboración del Atlas.

Figura 41. Mapa de centros poblados y áreas urbanas del Perú (UTM-WGS84-S18).

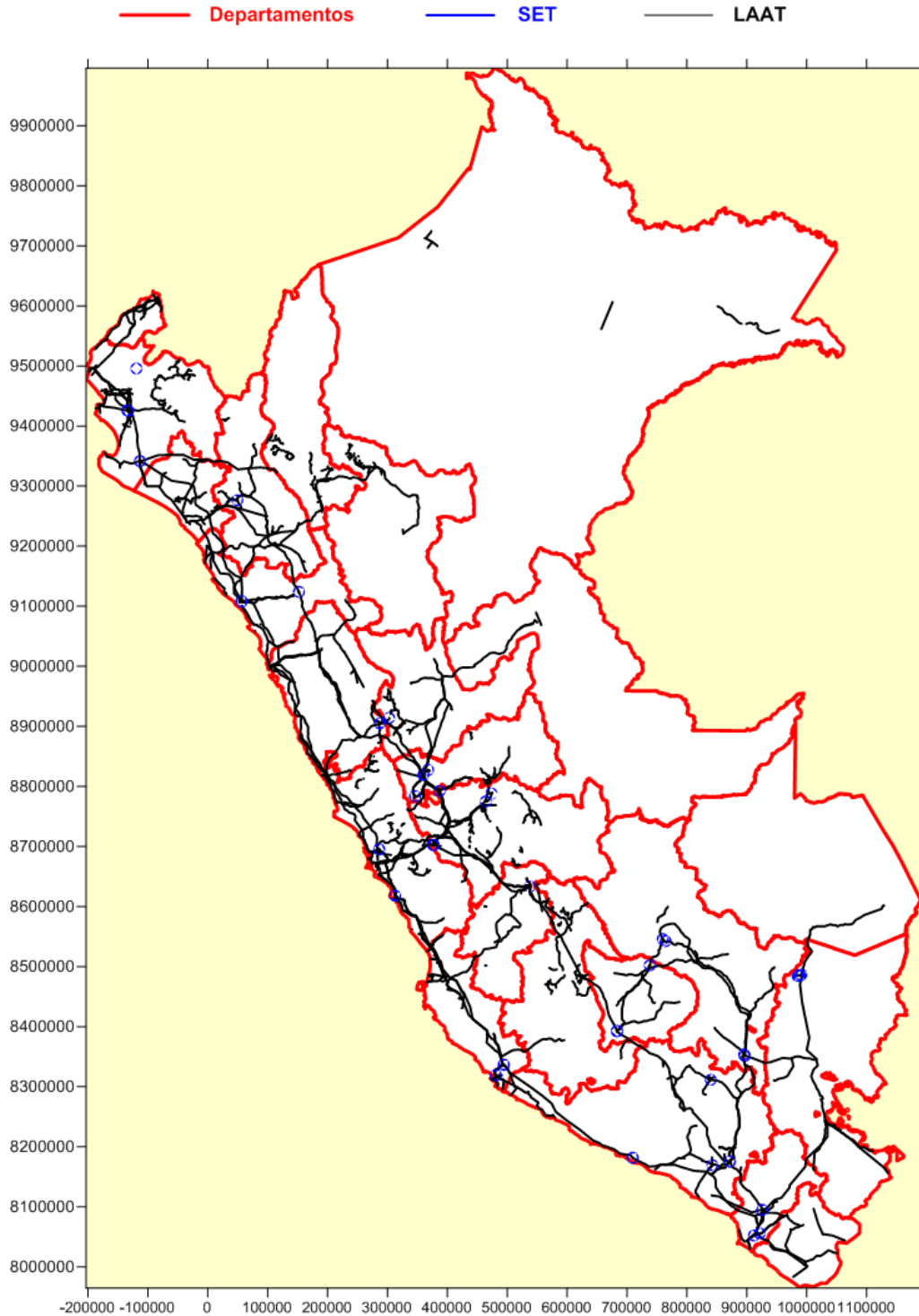


Fuente: INGEMMET y FONER.

### 2.3.7.-Principales líneas eléctricas y subestaciones del Perú

La aplicación Web-GIS incluye información con las principales líneas eléctricas (LAT) y subestaciones eléctricas del Perú (SET). Esto permite evaluar las posibilidades de evacuación eléctrica de cualquier emplazamiento seleccionado. La información ha sido proporcionada por el MINEM, los datos provienen de la Dirección General de Electricidad (DGE).

Figura 42. Mapa de las principales SET y LAT del Perú (UTM-WGS84-S18).

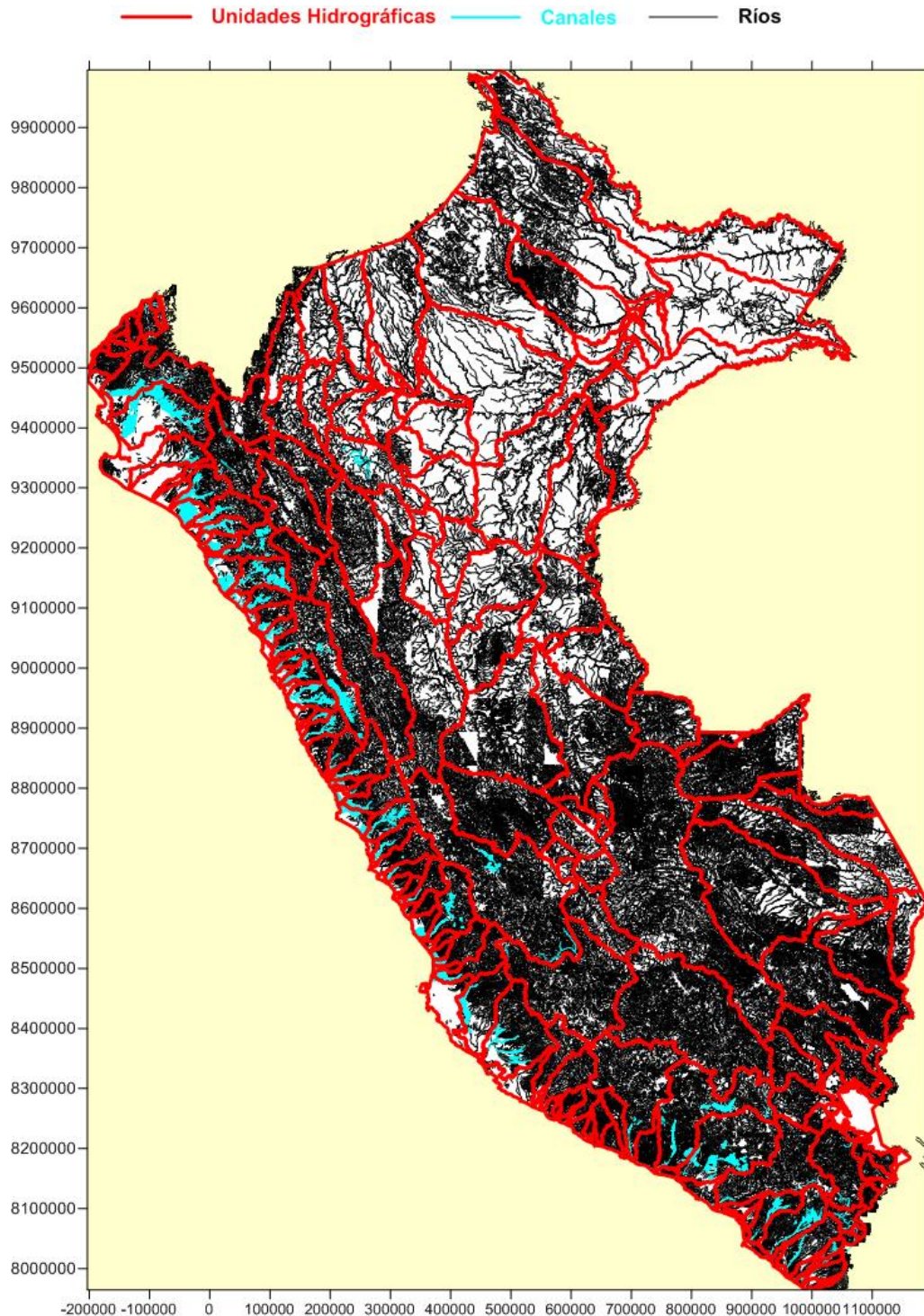


Fuente: DGE (MINEM).

### 2.3.8.-Principales unidades hidrográficas del Perú

La aplicación Web-GIS permite visualizar las principales unidades hidrográficas del territorio del Perú (ríos, canales y unidades hidrográficas). La información ha sido facilitada por la Autoridad Nacional del Agua (ANA). A continuación, se muestra un mapa con la información Considerada en la elaboración del Atlas.

Figura 43. Mapa de las principales cuencas hidrográficas del Perú (UTM-WGS84-S18).

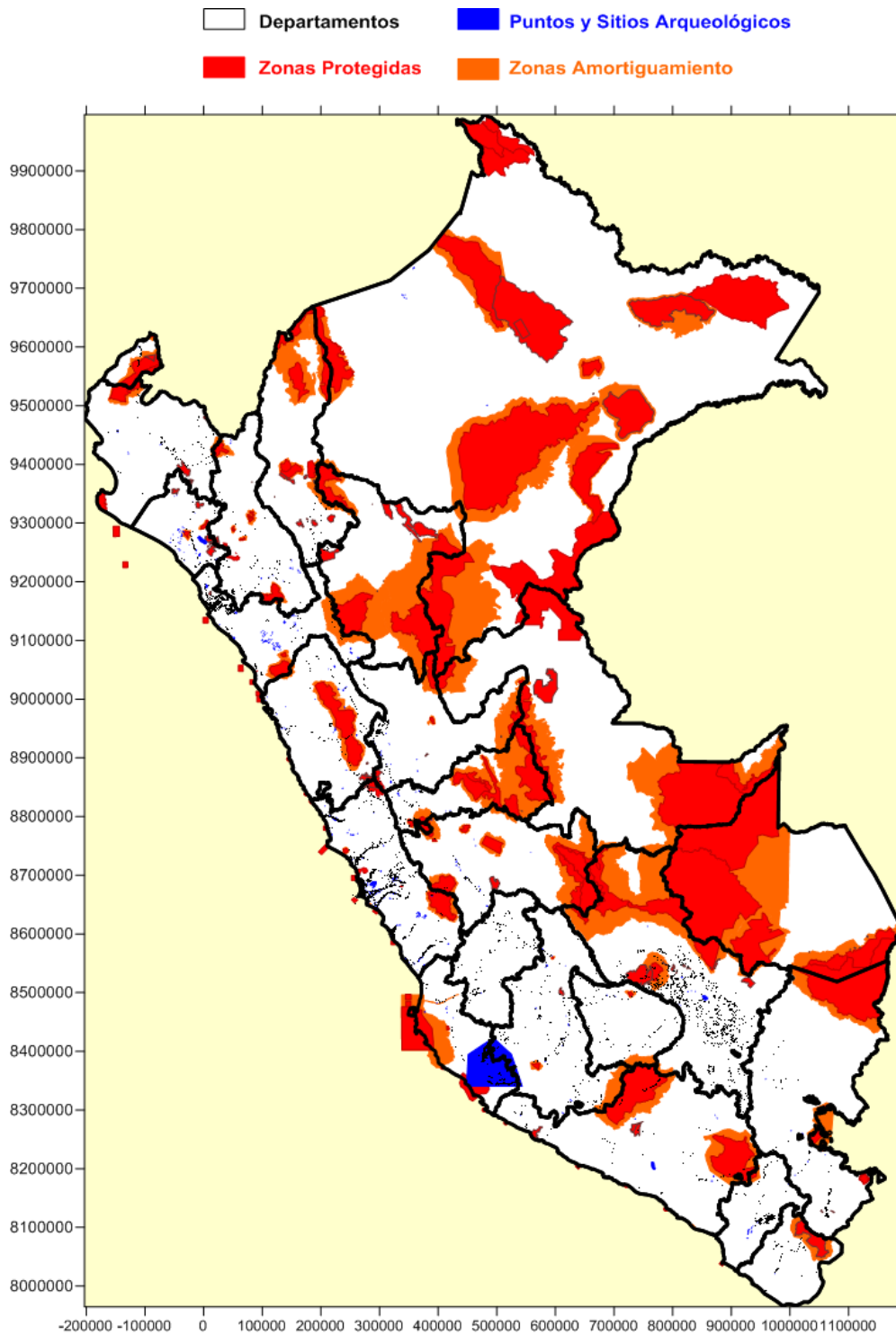


Fuente: ANA.

### 2.3.9.-Zonas de exclusión ambiental y arqueológica

A la hora de planificar un parque eólico es necesario tener en cuenta las posibles restricciones ambientales que puedan existir en la zona; la aplicación Web-GIS incorpora información sobre las Áreas naturales protegidas por el Estado, zonas de amortiguamiento, sitios y puntos arqueológicos y otros niveles de protección de áreas protegidas que se distribuyen en el ámbito regional, municipal y privado. Esta información ha sido facilitada por el Ministerio del Ambiente (MINAM) y Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP).

Figura 44. Mapa de las Áreas Naturales Protegidas del Perú (UTM-WGS84-S18).

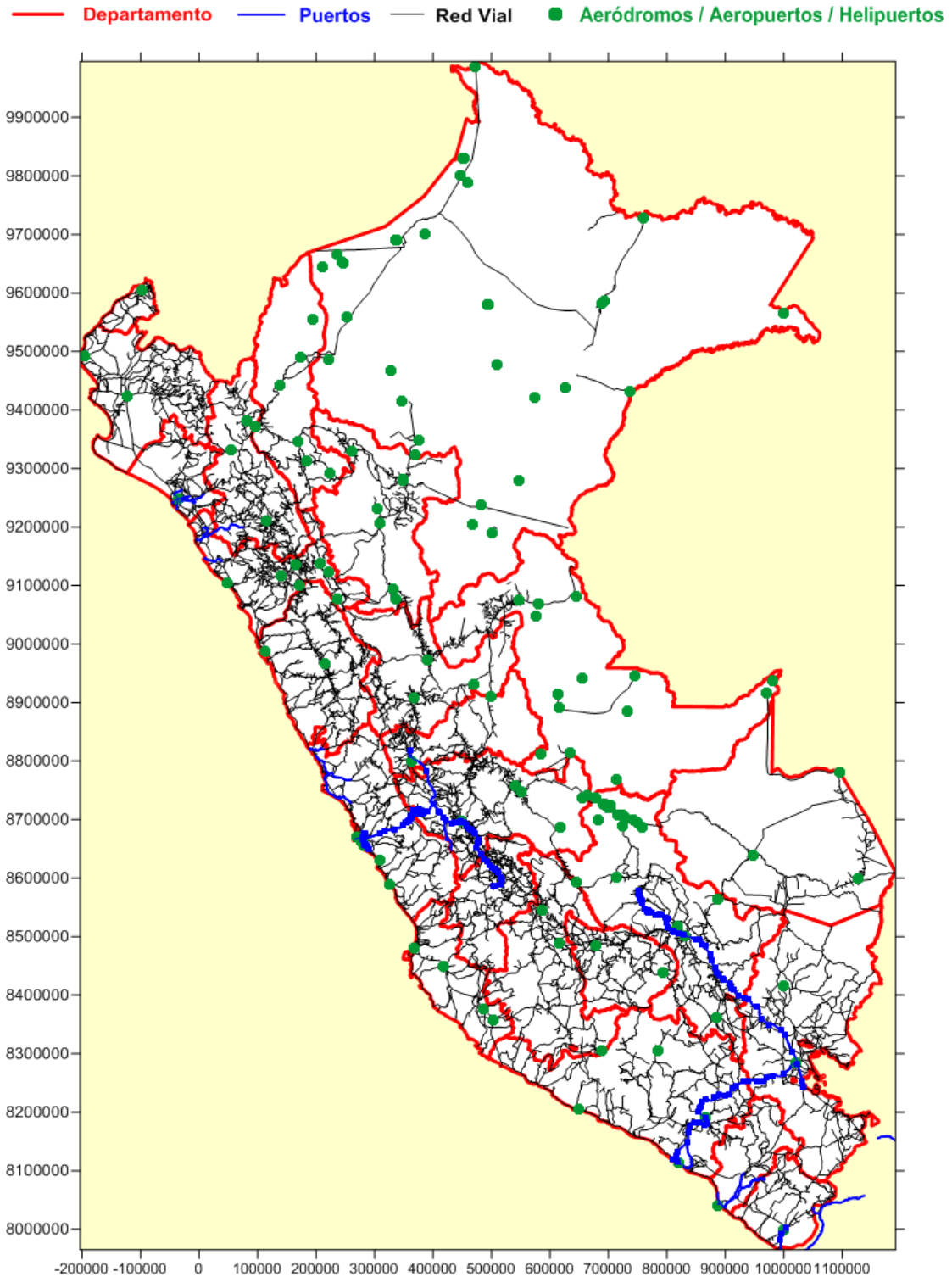


Fuente: ANA.

### 2.3.10.-Vías de transporte y comunicación del Perú

La aplicación Web-GIS permite visualizar las principales vías de transporte y comunicación del territorio del Perú (líneas férreas y estaciones de ferrocarril, carreteras, aeropuertos y puertos). La información ha sido facilitada por el MTC. A continuación, se muestra un mapa con la información incluida en la aplicación.

Figura 45. Mapa de las principales vías de comunicación del Perú (UTM-WGS84-S18).



Fuente: MTC.

### 2.3.11.-Resumen del estado de la información necesaria

A continuación, se muestra una tabla resumen con la fuente de las capas de información que han sido empleadas para la elaboración del Atlas Eólico.

*Tabla 7. Información (bases de datos) empleadas en la elaboración del Atlas Eólico.*

<b>Tema</b>	<b>Capas</b>	<b>Fuente</b>	<b>Ficheros</b>
Límites administrativos	Provincia	INEI	PROVINCIA_28_12_2014.shp
	Distrito	INEI	DISTRITO_28_12_2014.shp
	Departamento	INEI	DEPARTAMENTO_28_12_2014.shp
Urbano	Centros Poblados	ATLAS FONER	ccpp.shp
	Áreas urbanas	INGEMMET	urbageo.shp
Infraestructura eléctrica	Líneas transporte electricidad	DGE	Trans_WGS84.shp
	Subestaciones	DGE	SE_WGS84.shp
Zonas de exclusión ambiental y arqueológicas	Áreas naturales protegidas por el Estado		
	Otros niveles de protección de áreas protegidas que se distribuyen en el ámbito regional, municipal y privado	SERNANP	ANP_AdministracionNacional.shp
		SERNANP	ANP_AdministracionRegionalPrivada.shp
	Zona de amortiguamiento	SERNANP	ZonaAmortiguamiento.shp
	Sitios arqueológicos	MINAM	TEM_SOECON_SITIOS_ARQUEOLOGICOS.shp
Puntos arqueológicos	MINAM	TEM_SOECON_SITIOS_ARQUEOLOGICOS_PUNTOS.shp	

Tema	Capas	Fuente	Ficheros
Topografía	Curvas de nivel cada 500m y 1000m. Escala 1:500000	MINAM	Fisiografia_IGN_500000\C_nivel.shp
	Cotas	MINAM	Fisiografia_IGN_500000\Cota.shp
	Puntos geodésicos	MINAM	Fisiografia_IGN_500000\S_Geodesica.shp
	Curvas nivel, mapas 1:100000 cada 50m	MINEM	CurvasNivel.shp
	Raster DMT	MINEM	RasterSRTM
	Raster mapa de pendientes	CONSORCIO	Pendientes
	Ríos	ANA	Rio.shp
	Canales	ANA	canales.shp
	Unidades hidrográficas	ANA	UH.shp
Vías Comunicación	Líneas férreas		
	Red carre. Departamentos	MINAM	BAS_VIAS_FERREA.shp
	Red carre. Nacional	MINAM	BAS_VIAS_MTC_RED_DEPARTAMENTAL.shp
	Red carre. Vecinas	MINAM	BAS_VIAS_MTC_RED_NACIONAL.shp
	Aeropuertos	MINEM	aerodromo.shp
	Estaciones ferrocarril	MINEM	estacion_feroviaria.shp
	Puertos	MINEM	puerto.shp
Usos Suelo	Cobertura Suelos	MINAGRI	cove.shp
	Rugosidad	CONSORCIO	Rugosidad.shp

Tema	Capas	Fuente	Ficheros
Eólicos	Velocidad media anual	CONSORCIO	VORTEX_PERU_WSDP.shp
	Temperatura media anual		VORTEX_PERU_T100.shp
	Presión media anual		VORTEX_PERU_P100.shp
	Humedad relativa anual		VORTEX_PERU_RH100.shp
	Densidad del aire anual		VORTEX_PERU_D100.shp
	Intensidad de turbulencia media		VORTEX_PERU_IT.shp
	Distribución y parámetros de Weibull		VORTEX_PERU_AK.shp

*Fuente: elaboración propia.*

Finalmente se muestran una tabla con el listado de información que es visible en la aplicación, el que puede ser consultado y aquel que está disponible sólo en el MINEM.



Tabla 8. Información (bases de datos) incluidas en la aplicación Web-GIS (visualizable, consultable o que será entregada al MINEM).

Tema	Capas visibles en la aplicación	Capas disponibles para consulta en la aplicación	Resto de Capas entregadas al MINEM
Parámetros eólicos	<p>Velocidad media anual del viento (10/25/50/75/100/125/150) m</p> <p>Densidad de potencia media anual del viento (10/25/50/75/100/125/150) m</p> <p>Zonas preferentes para instalar parques eólicos</p> <p>Densidad media anual del aire a 100 m</p> <p>Temperatura media anual del aire a 100 m</p> <p>Presión media anual del aire a 100 m</p> <p>Humedad relativa media anual del aire a 100 m</p>	<p>Velocidad media anual del viento (10/25/50/75/100/125/150) m</p> <p>Densidad de potencia media anual del viento (10/25/50/75/100/125/150) m</p> <p>Distribución de frecuencias de velocidades A&amp;k (10/25/50/75/100/125/150) m</p> <p>Frecuencia “.tab” anual (10/25/50/75/100/125/150) m</p> <p>Dirección media anual del viento (10/25/50/75/100/125/150) m</p>	<p>Temperatura media anual del aire (10/25/50/75/100/125/150) m</p> <p>Presión media anual del aire (10/25/50/75/100/125/150) m</p> <p>Humedad relativa media anual del aire (10/25/50/75/100/125/150) m</p> <p>Densidad media anual del aire (10/25/50/75/100/125/150) m</p> <p>Velocidad media mensual del viento (10/25/50/75/100/125/150) m</p> <p>Densidad de potencia media mensual del viento (10/25/50/75/100/125/150) m</p> <p>Frecuencia “.tab” mensual (10/25/50/75/100/150) m</p>
Zonas exclusión ambiental y arqueológico	<p>Áreas Naturales Protegidas por el Estado</p> <p>Otros niveles de protección</p> <p>Zonas de amortiguamiento</p> <p>Puntos Arqueológicos</p> <p>Sitios Arqueológicos</p>		
Límites administrativos	<p>Límites administrativos: Departamentos</p> <p>Límites administrativos: Provincias</p> <p>Límites administrativos: Distritos</p>	-	-

Tema	Capas visibles en la aplicación	Capas disponibles para consulta en la aplicación	Resto de Capas entregadas al MINEM
Infraestructura eléctrica	Líneas eléctricas de alta tensión Subestaciones eléctricas Subestaciones eléctricas de distribución Subestaciones eléctricas de transformación	-	-
Urbano	Centros poblados Áreas urbanas	-	-
Topografía	Curvas de nivel del terreno cada 50 m. Escala 1: 100 000 Raster pendientes del terreno Ríos Canales Quebradas Lagos Unidades Hidrográficas Raster DTM Cotas del terreno Puntos geodésicos Curvas de nivel en metros. Escala 1:500 000 Cobertura de usos del suelo	Rugosidad del terreno	Pendientes Vectorial Unidades geográficas

<b>Tema</b>	<b>Capas visibles en la aplicación</b>	<b>Capas disponibles para consulta en la aplicación</b>	<b>Resto de Capas entregadas al MINEM</b>
Vías de comunicación	Red de carreteras nacionales		
	Red de carreteras departamentales		
	Red de carreteras vecinales	-	-
	Líneas férreas		
	Estaciones de ferrocarril		
	Aeropuertos		
	Puertos		
<b>TOTAL CAPAS</b>	<b>52</b>	<b>36</b>	<b>282</b>

*Fuente: elaboración propia.*

## 2.4- METODOLOGÍA PARA OBTENER LAS PRINCIPALES VARIABLES

### 2.4.1.-Velocidad del viento

La salida del modelo WRF proporciona velocidad media anual del viento, así como las velocidades medias mensuales en cada uno de los puntos de malla (resolución 1 km) y a cualquier altura entre el nivel del suelo y la troposfera, en el caso del Atlas Eólico del Perú las alturas establecidas son 10 m, 25 m, 50 m, 75 m, 100 m, 125 m y 150 m.

### 2.4.2.-Densidad del aire

La salida del modelo WRF proporciona también los valores de presión, temperatura y humedad relativa del aire en cada uno de los puntos de malla (resolución 1 km) para las alturas seleccionadas. Esto permite estimar la densidad de energía eólica, haciendo uso de la velocidad del viento y la densidad (escala horaria); la ley general de los gases del aire se utiliza para derivar los valores de densidad, a partir de la presión y la temperatura. El valor de la densidad se calcula a partir de las ecuaciones que aparecen en la IEC-61400-12-1 [Ref 14], i.e.:

$$\rho = \frac{B}{R_0 \cdot T} \quad (22)$$

donde

B es la presión atmosférica [Pa];

T es la temperatura absoluta [K];

R<sub>0</sub> es la constante de los gases en el aire seco [287.05 J/kg·K];

### 2.4.3.-Densidad de potencia del viento

La densidad de potencia del viento se define como la potencia eólica aprovechable por unidad de área (m<sup>2</sup>) y se calcula para cada punto del Atlas Eólico según la expresión:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (23)$$

donde

P es la potencia [W];

A es el área [m<sup>2</sup>];

ρ es la densidad del aire [kg/m<sup>3</sup>];

v es la velocidad media en dicho punto [m/s].

Basado en la densidad de potencia del viento, se ha realizado una clasificación de la densidad de potencia del viento, conforme al siguiente cuadro:

Tabla 9. Clasificación de la densidad de potencia del viento.

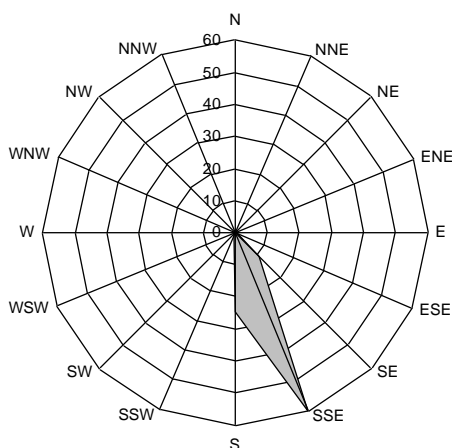
Clase de potencia del viento	Clasificación del potencial del recurso	Densidad de potencia (W/m <sup>2</sup> )
1	Pobre	0 – 200
2	Escaso	200 – 300
3	Moderado	300 – 400
4	Bueno	400 – 500
5	Excelente 1	500 – 600
6	Excelente 2	600 – 800
7	Excelente 3	> 800

Fuente: MINEM (TdR).

#### 2.4.4.-Dirección del viento

Los valores de dirección del viento se obtienen directamente de la salida del modelo WRF. La aplicación Web-GIS proporciona los valores de la dirección del viento como una distribución en frecuencias por sector, esto se hace dividiendo la dirección del viento en 16 sectores de 22.5 grados centrados en el norte, es decir agrupando los valores de dirección en intervalos de  $-11.25^\circ$  a  $11.25^\circ$ , de  $11.25^\circ$  a  $33.75^\circ$  etcétera. La distribución de la dirección del viento se presenta en porcentaje.

Figura 46. Ejemplo de distribución de frecuencias por dirección (rosa de los vientos) que puede ser obtenida para cada punto del Atlas.



Fuente: elaboración propia.

#### 2.4.5.-Distribución en frecuencias de la velocidad del viento y parámetros de Weibull

La distribución de frecuencias de la velocidad del viento se obtiene por "binado" de la velocidad del viento en intervalos (bins) de 1 m/s; esto es agrupando en intervalos de velocidad de 1 m/s de anchura (desde 0 m/s a 1 m/s, de 1 m/s a 2 m/s y así sucesivamente). La distribución en frecuencias de la velocidad se presenta como un histograma en porcentaje.

La distribución en frecuencias del viento, se puede aproximar a una distribución de Weibull que sigue la expresión:

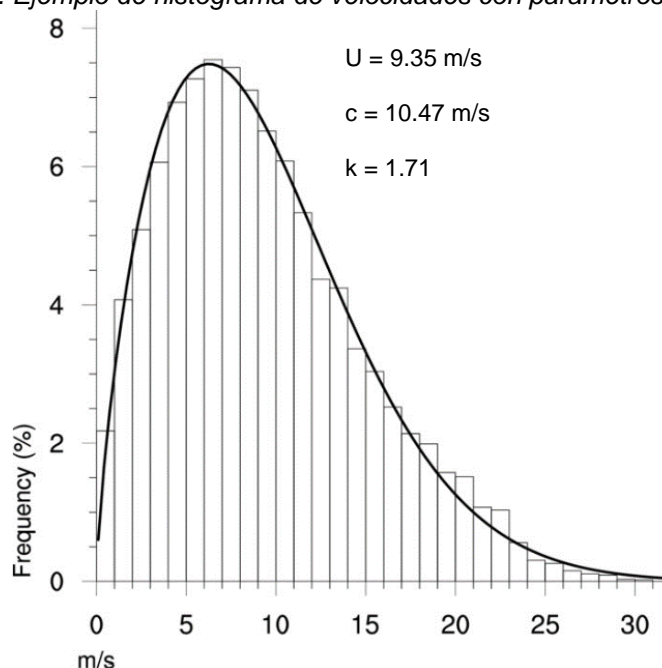
$$f(U) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right] \quad (24)$$

donde

U es la velocidad del viento [m/s];  
k es el factor de escala de la distribución,  
c es el factor de forma de la distribución [m/s].

A partir de la distribución en frecuencias de la velocidad del viento, los parámetros de la distribución de Weibull se calculan utilizando el método de la máxima verosimilitud un método muy utilizado en la práctica puesto que proporciona estimadores consistentes y normalmente distribuidos para muestras grandes.

Figura 47. Ejemplo de histograma de velocidades con parámetros de Weibull.



Fuente: elaboración propia.

#### 2.4.6.-Intensidad de turbulencia media

La intensidad de turbulencia se define como el cociente entre la desviación típica de la velocidad del viento y la propia velocidad del viento.

$$IT = \frac{\sigma_v}{v} \quad (25)$$

La aplicación Web-GIS proporciona el valor promedio de la intensidad de turbulencia para velocidades mayores de 3 m/s (velocidad a partir de la cual entran en funcionamiento la mayoría de aerogeneradores del mercado). Este valor se obtiene directamente a partir del modelo WRF.

## 2.5- PRODUCCIÓN ANUAL MEDIA

La aplicación desarrollada permite estimar el potencial energético aprovechable; para ello se calcula la producción anual estimada de energía en cada punto del Atlas.

#### 2.5.1.-Curva de Potencia

La aplicación del Atlas Eólico incorpora un modelo genérico de curva de potencia de aerogenerador de 3 MW. Esta curva varía en función de la velocidad media del emplazamiento, de acuerdo con las clases de emplazamiento definidas en la IEC-61400-1, Ed.2&3 [Ref 13]; de tal forma que la curva de potencia se adecue a las características de cada emplazamiento.

Tabla 10. Clase de emplazamiento empleadas en la aplicación Web-GIS.

Velocidad media anual del emplazamiento	Clase de curva de potencia empleada
$8.5 \text{ m/s} < V_{\text{med}}$	Clase I
$7.5 \text{ m/s} < V_{\text{med}} \leq 8.5 \text{ m/s}$	Clase II
$V_{\text{med}} \leq 7.5 \text{ m/s}$	Clase III

Fuente: IEC-61400-1 [Ref 13].

### 2.5.2.-Producción anual esperada

La producción anual esperada (AEP) se calcula de acuerdo a la norma IEC-61400-12-1 [Ref 14], es decir aplicando la curva de potencia a la distribución de frecuencia de velocidad de viento en cada punto.

$$AEP = N_h \sum_{i=1}^N [F(V_i) - F(V_{i-1})] \cdot \left( \frac{P_{i-1} + P_i}{2} \right) \quad (26)$$

Donde

- AEP es la producción anual de energía;
- $N_h$  es el número de horas en un año ( $\approx 8760$ );
- $N$  es el número de bins;
- $V_i$  es la velocidad del viento normalizada y promediada en el bin  $i$ ;
- $P_i$  es la potencia normalizada y promediada en el bin  $i$ ;

y

$$F(V) = 1 - \exp \left[ - \frac{\pi}{4} \cdot \left( \frac{V}{V_{AVE}} \right)^k \right] \quad (27)$$

donde

- $F(V)$  es la función de distribución de probabilidad acumulada de Weibull para velocidad del viento
- $V_{AVE}$  es la velocidad media anual a altura de buje;
- $V$  es la velocidad del viento.
- $k$  es el parámetro de forma de la distribución de Weibull

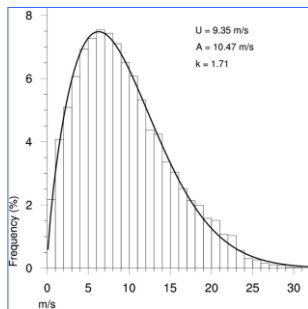
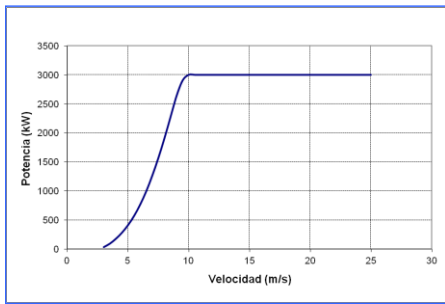
En este caso, la aplicación Web-GIS proporciona un valor de  $k$  específico para cada punto del Atlas Eólico.

La suma se inicia poniendo  $V_{i-1}$  igual a  $V_i - 0.5 \text{ m/s}$  y  $P_{i-1}$  igual a  $0.0 \text{ kW}$  (esto es iniciando el primer bin de la curva en 0).

A continuación, se muestra un esquema del cálculo de la producción:

Figura 48. Esquema del cálculo de la producción.

Curva de Potencia



Distribución Frecuencias

Producción  
anual media

Fuente: elaboración propia.

### 2.5.3.-Curva de Potencia

Se han elegido por tanto tres curvas de potencia genéricas, una adecuada para cada clase de emplazamiento.

La tabla siguiente muestra los valores de estas tres curvas de potencia para una densidad del aire de  $1.12 \text{ kg/m}^3$ .



Tabla 11. Empleo de curvas de potencia según IEC (densidad 1.12 kg/m<sup>3</sup>).

WS [m/s]	Clase I	Clase II	Clase III
	Potencia [kW]	Potencia [kW]	Potencia [kW]
3.0	0	0	19
3.5	0	32	78
4.0	38	116	155
4.5	98	225	252
5.0	171	350	372
5.5	259	495	518
6.0	361	661	696
6.5	480	858	907
7.0	618	1087	1154
7.5	781	1346	1435
8.0	966	1639	1750
8.5	1170	1955	2092
9.0	1391	2266	2447
9.5	1625	2549	2757
10.0	1874	2772	2944
10.5	2131	2907	3000
11.0	2378	2974	3000
11.5	2593	3000	3000
12.0	2760	3000	3000
12.5	2865	3000	3000
13.0	2929	3000	3000
13.5	2966	3000	3000
14.0	2991	3000	3000
14.5	2996	3000	3000
15.0	3000	3000	3000
15.5	3000	3000	3000
16.0	3000	3000	3000
16.5	3000	3000	3000
17.0	3000	3000	3000
17.5	3000	3000	3000
18.0	3000	3000	3000
18.5	3000	3000	3000
19.0	3000	3000	3000
19.5	3000	3000	3000
20.0	3000	3000	3000
20.5	3000	3000	3000
21.0	3000	3000	3000
21.5	3000	3000	3000
22.0	3000	3000	3000
22.5	3000	3000	3000
23.0	3000	3000	3000
23.5	3000	3000	3000
24.0	3000	3000	3000
24.5	3000	3000	3000
25.0	3000	3000	3000

Fuente: elaboración propia.

#### 2.5.4.-Corrección por densidad

La producción de un aerogenerador depende (entre otros factores) de la densidad específica del aire. Este hecho se ha tenido en cuenta en la aplicación Web-GIS usando las expresiones recogidas en la IEC-61400-12-1 [Ref 14].

Para un aerogenerador con control de potencia activa (como los que se han considerado en la aplicación), puede aplicarse una normalización a la velocidad del viento en función de la densidad del aire:

$$V_n = V \cdot \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1/3} \quad (28)$$

donde

- $V_n$  es la velocidad del viento normalizada;
- $V$  es la velocidad del viento promediada en un intervalo;
- $\rho$  es la densidad del aire de referencia;
- $\rho_0$  es la densidad del aire promediada en el intervalo.

#### 2.6- MODELO DE EXTRAPOLACIÓN VERTICAL ENTRE NIVELES INTERMEDIOS

La salida del modelo WRF proporciona velocidad media anual del viento, así como las velocidades medias mensuales en cada uno de los puntos de malla (resolución 1 km) y a las 7 alturas establecidas para el Atlas Eólico: 10 m, 25 m, 50 m, 75 m, 100 m, 125 m y 150 m. No obstante, la aplicación Web-GIS permite conocer la velocidad del viento a cualquier altura intermedia, comprendida entre estos 7 niveles, para ello se ha establecido un modelo lineal para extrapolar la velocidad del viento con la altura a partir de los valores que proporciona el modelo para los 7 valores de altura seleccionados.

Si queremos conocer la velocidad media anual ( $V_m$ ) de un punto en una altura ( $h_x$ ) comprendida entre cualquiera de 2 de los 7 niveles mencionados ( $h_{inf}$  y  $h_{sup}$ ), la aplicación proporciona la misma a partir de una estimación lineal mediante la siguiente expresión:

$$V_x = v_{inf} + \left( \frac{\Delta V}{\Delta h} \right) \cdot (h_x - h_{inf}) \quad (29)$$

donde

- $h_{inf}$  es la altura del nivel inferior más cercano a la altura deseada
- $v_{inf}$  es la velocidad media del viento en el nivel inferior.
- $\Delta h$  ( $h_{sup} - h_{inf}$ ) es la diferencia entre dos alturas consecutivas cualesquiera de las alturas disponibles (10/25/50/75/100/125/150 metros).
- $\Delta V$  ( $V_{sup} - V_{inf}$ ) es la diferencia entre 2 velocidades medias correspondientes a las alturas anteriores
- $h_x$  es la altura sobre el suelo de la velocidad que queremos conocer.
- $V_x$  es la velocidad que queremos conocer

Por ejemplo, si queremos conocer en un punto la velocidad media anual a 90 metros de altura, la aplicación Web-GIS la calculará a partir de las velocidades medias de los 2 niveles más cercanos que son obtenidos por el modelo, en este ejemplo se emplearían las velocidades medias a 75 y 100 metros; la aplicación entonces proporciona el valor a la altura intermedia deseada (90m) mediante la siguiente expresión:

$$V_{90m} = v_{75m} + \left( \frac{V_{100} - V_{75}}{100 - 75} \right) \cdot (90 - 75) \quad (30)$$

Así si tenemos 6.0 m/s a 75 m de altura y 6.3 m/s a 100 metros de altura, la aplicación nos devuelve un valor de 6.2 m/s a 90 m de altura.

## 2.7- INCERTIDUMBRE Y FACTORES QUE AFECTAN A LA PRECISIÓN EN LA ESTIMACIÓN DEL VIENTO MEDIO

Los principales factores que afectan a la precisión en la estimación del viento medio y que contribuyen a la incertidumbre de los resultados son:

- Incertidumbre en las bases de datos de topografía
- Incertidumbre en las bases de datos de rugosidad
- Incertidumbre en las bases de datos de reanálisis
- Incertidumbre del modelo de mesoescala

La incertidumbre en las bases de datos (de topografía, rugosidad y de reanálisis) puede afectar a las estimaciones del potencial eólico, por lo que han seleccionado fuentes de datos con una incertidumbre pequeña:

- Se ha empleado la base de datos topográfica del SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) donde se obtuvieron datos de elevación a escala casi mundial para generar una base de datos topográficos digital completa de La Tierra. La resolución espacial de los datos de topografía es 3 segundos de arco (aproximadamente 90 m).
- Los datos de cobertura de la tierra empleados provienen de ESA GlobCover Land Cover 1. Los productos GlobCover se basan en ENVISAT Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) datos Nivel 1B adquiridos en modo Resolución completa con una resolución espacial de 300 metros.
- El modelo emplea como datos atmosféricos de entrada una de las fuentes de la última generación de proyectos de reanálisis: NCEP/CFSR. La resolución atmosférica global del CFSTR es aproximadamente de unos 38 km (T382) con 64 niveles que se extienden desde la superficie hasta 0.26 hPa. CFSTR se inicializa 4 veces al día (0000, 0600, 1200 y 1800 UTC), y los productos (cada 6 horas) de la superficie atmosférica, oceánica y terrestre están disponibles cada 0.3°, 0.5°, 1.0°, 1.9° y de 2.5° grados horizontales de resolución. Para el desarrollo del Atlas Eólico se han empleado 20 años de la base de datos de CFSTR *clusterizados* en 730 días.

La incertidumbre de los resultados se estima mediante la ejecución de algunas configuraciones diferentes de modelo WRF, esto es diferentes esquemas de turbulencia y condiciones iniciales ligeramente distintas que perturban el modelo y nos dan una indicación de la sensibilidad de la región estudiada frente a algunos cambios en el modelo. Los resultados emitidos por las diferentes configuraciones son entonces post-procesados y mezclados con el fin de tener una idea de la incertidumbre en la velocidad media del viento.

La modelización del Atlas de Perú se ha realizado con dos esquemas de capa límite:

- 1) Mellor-Yamada-Janick
- 2)YSU

Ambas opciones son las más extendidas dentro de la comunidad de modelización de WRF puesto que cada una de ellas representa mejor algunas situaciones meteorológicas. Es bien conocido que el esquema de capa límite constituye probablemente la fuente mayor de variabilidad en los resultados de los modelos de mesoescala como WRF.

También se han rodado dos tiempos de *spin-up*, eso es, aquel periodo de simulación que sirve para calentar al modelo pero que no se entrega al usuario. La combinación de las dos capas límites juntamente con la duración del spin-up permite una buena estimación de la incertidumbre.

## **2.8- CONSIDERACIONES EN LA LECTURA DE MAPAS**

Los mapas generados para el Atlas Eólico y que pueden verse en la aplicación Web-GIS permiten obtener directamente el viento en cualquier punto del País para cualquier altura comprendida entre 10 y 150 metros; así como su altitud y el parámetro de rugosidad que el modelo ha utilizado para realizar los cálculos, entre otras informaciones. Para interpretar y ajustar las estimaciones de la velocidad del viento se han de tener en cuenta los siguientes puntos:

1. En los cálculos se ha supuesto que todos los puntos están libres de obstáculos susceptibles de alterar o de impedir el curso del viento. No se consideran obstáculos los árboles si son habituales en el entorno del punto de interés porque sus efectos ya se han tenido en cuenta por el modelo. Las singularidades, como puede ser una edificación aislada o un grupo de árboles en un espacio abierto, sí que se consideran obstáculos.
2. La resolución del modelo es de 1 km x 1 km, por lo que se debe tener en cuenta que generalmente, los emplazamientos situados a una altura superior a la media del elemento de cuadrícula de 1000x1000 m<sup>2</sup> son más ventosos que los que puedan estar por debajo, salvo en aquellas zonas donde puedan apreciarse perfiles verticales negativos.
3. Las alteraciones del parámetro de rugosidad de la superficie (determinado esencialmente por la edificación y el tipo de vegetación) pueden causar un impacto importante en el potencial eólico de un emplazamiento determinado. Si la rugosidad es mucho más pequeña que la utilizada por el modelo, la velocidad media puede ser mayor de lo esperado. Los valores típicos de rugosidad van de 0.001 m en campo abierto sin árboles o arbustos significativos, a 0.1 m en terrenos mayoritariamente arbustivos, y a 1 m o más en zonas pobladas y/o con muchos árboles. Estos valores han sido relacionados indirectamente con la medida de la vegetación; en realidad se trata de una escala de longitud que se utiliza en las ecuaciones que gobiernan la estructura de la capa límite.

### 3. ANÁLISIS, RESULTADOS Y VALIDACIÓN DEL ATLAS EÓLICO

#### 3.1- CAMPAÑA DE MEDIDAS

A pesar de que el modelo VORTEX (y su núcleo WRF) es uno de los modelos más validados en el mundo debido a su gran comunidad de usuarios, los resultados obtenidos serán validados in-situ por el CONSORCIO.

El SENAMHI posee una red extensa de torres meteorológicas, sin embargo, este tipo de estaciones registra medidas normalmente a 10 metros de altura. Debido a la altura de estas estaciones y a la presencia de obstáculos alrededor, estos datos no suelen ser suficientes para la formación de una base de datos confiable para realizar la validación del modelo. Además, es necesario disponer del historial completo de la estación (informe de instalación, informes de sustitución de equipos, etc.) para poder asegurar la trazabilidad de los datos que sean usados en la validación; lo cual no siempre es posible.

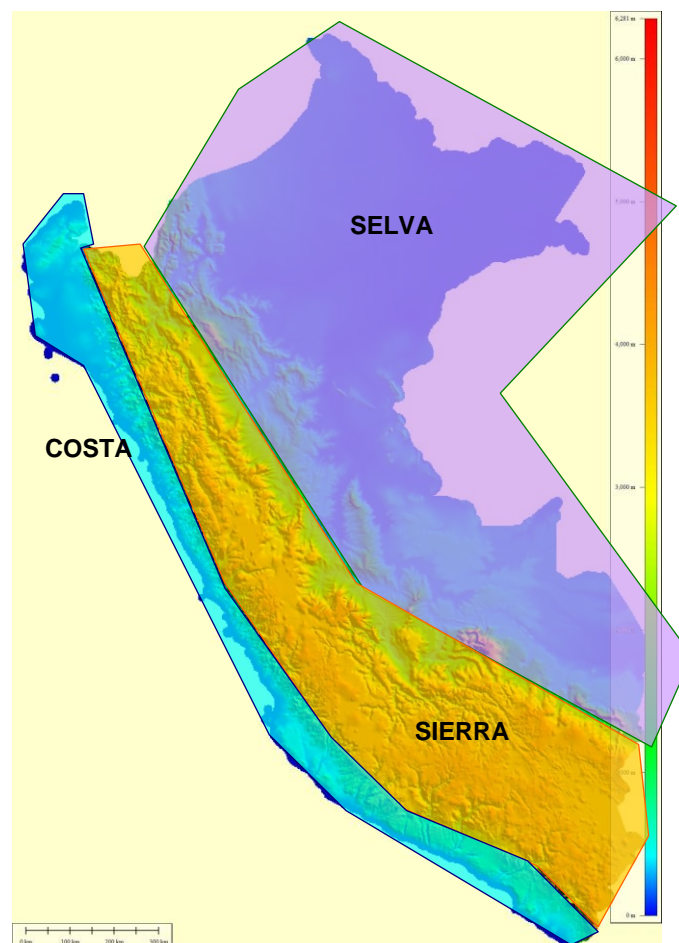
El CONSORCIO ha planteado una campaña de medida de validación empleando 3 torres meteorológicas de 20 metros de altura durante un periodo de 6 meses, y un equipo de medición remota (SODAR) durante un periodo de 3 meses.

#### 3.2- PLANIFICACIÓN DE LA CAMPAÑA DE MEDIDAS. SELECCIÓN DE EMPLAZAMIENTO

Si se analiza el mapa geográfico del Perú, se pueden distinguir 3 zonas muy diferenciadas:

- Zona de costa
- Zona de sierra
- Zona de selva

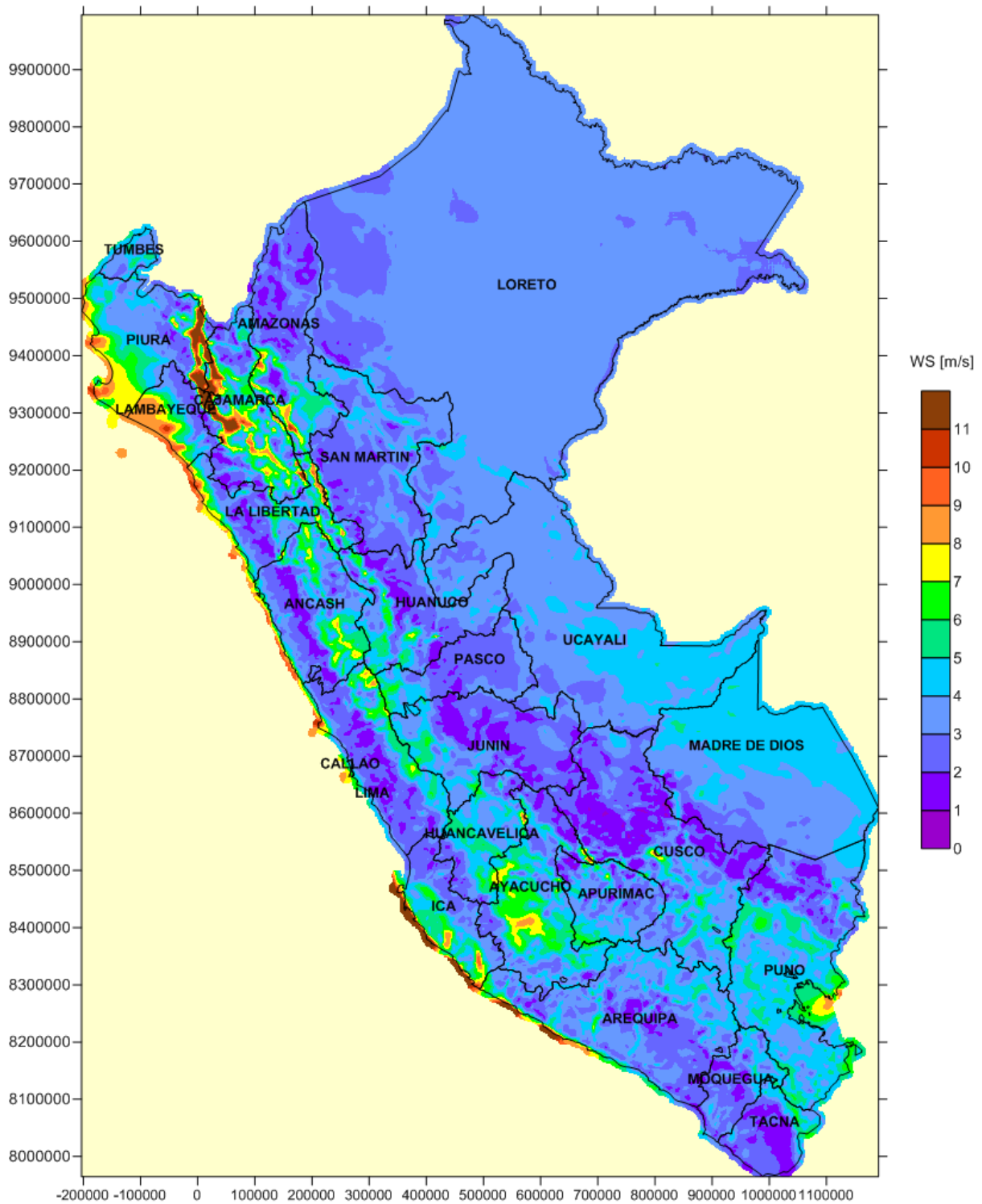
Figura 49. Ejemplo: Zonificación topográfica del Perú.



*Fuente: elaboración propia (datos de elevación de SRTM).*

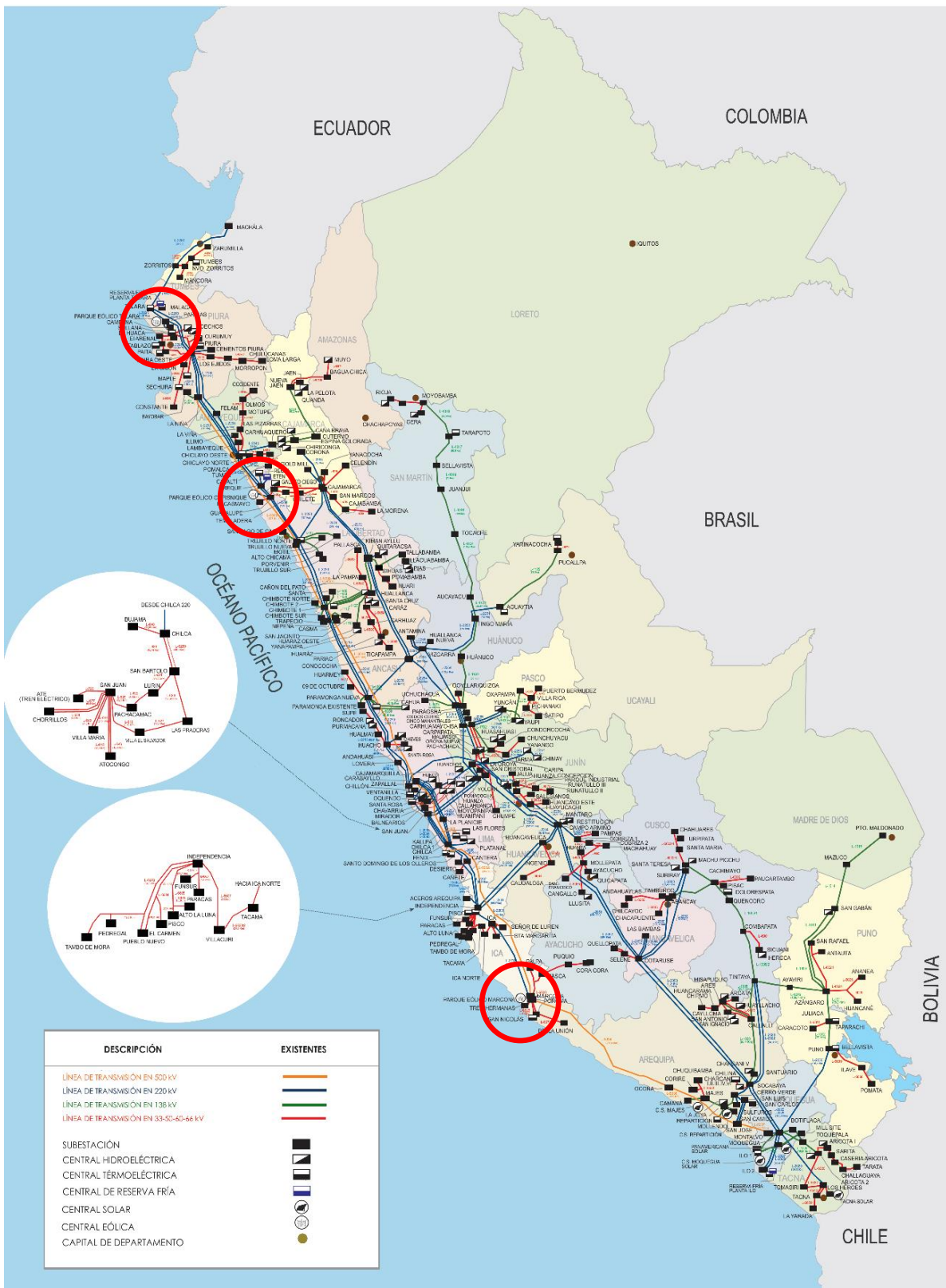
Un primer análisis del recurso eólico del Perú muestra que las zonas con mayor potencial eólico se encuentran en las zonas de costa, así como en ciertas regiones de la sierra, mientras que las zonas de selva tienen un potencial mucho menor que el resto.

Figura 50. Atlas Eólico del Perú a 100 m (resolución 1 km).



Puede verse también como el desarrollo de los parques eólicos en el Perú se ha producido en la zona de la costa.

Figura 51. Sistema eléctrico interconectado nacional (agosto 2015). La ubicación de los parques eólicos existentes en el país aparece rodeada en rojo.



Fuente: COES – SINAC.



La mayoría de las campañas de medidas realizadas en el Perú hasta hoy se han desarrollado en las zonas costeras. Por tanto, el conocimiento del recurso eólico que se tiene de esta zona es superior al de las otras.

No obstante, las campañas de medidas que se han venido realizando se han limitado a la instalación de torres meteorológicas de unos 80 metros de altura. En algunos casos se han observado situaciones de perfiles verticales (variación del viento con la altura) que se apartan de lo esperado. Estas situaciones de perfil vertical anómalo son de especial interés en el caso de los grandes aerogeneradores modernos, cuyas palas alcanzan alturas superiores a los 150 metros.

La zona de la costa representa por tanto el lugar ideal para instalar un sistema de medida remota como el SODAR que permite medir los parámetros de interés eólico hasta alturas de 150 ó 200 metros. La ubicación del SODAR será propuesta por el CONSORCIO en función de las siguientes características:

- Emplazamiento viable con un potencial eólico de interés para el desarrollo de futuros parques eólicos.
- Accesibilidad adecuada para poder llegar con el SODAR.
- Condiciones de seguridad suficientes para evitar robos.
- Emplazamientos no complejos desde el punto de vista de la topografía.
- Ausencia de obstáculos cercanos.

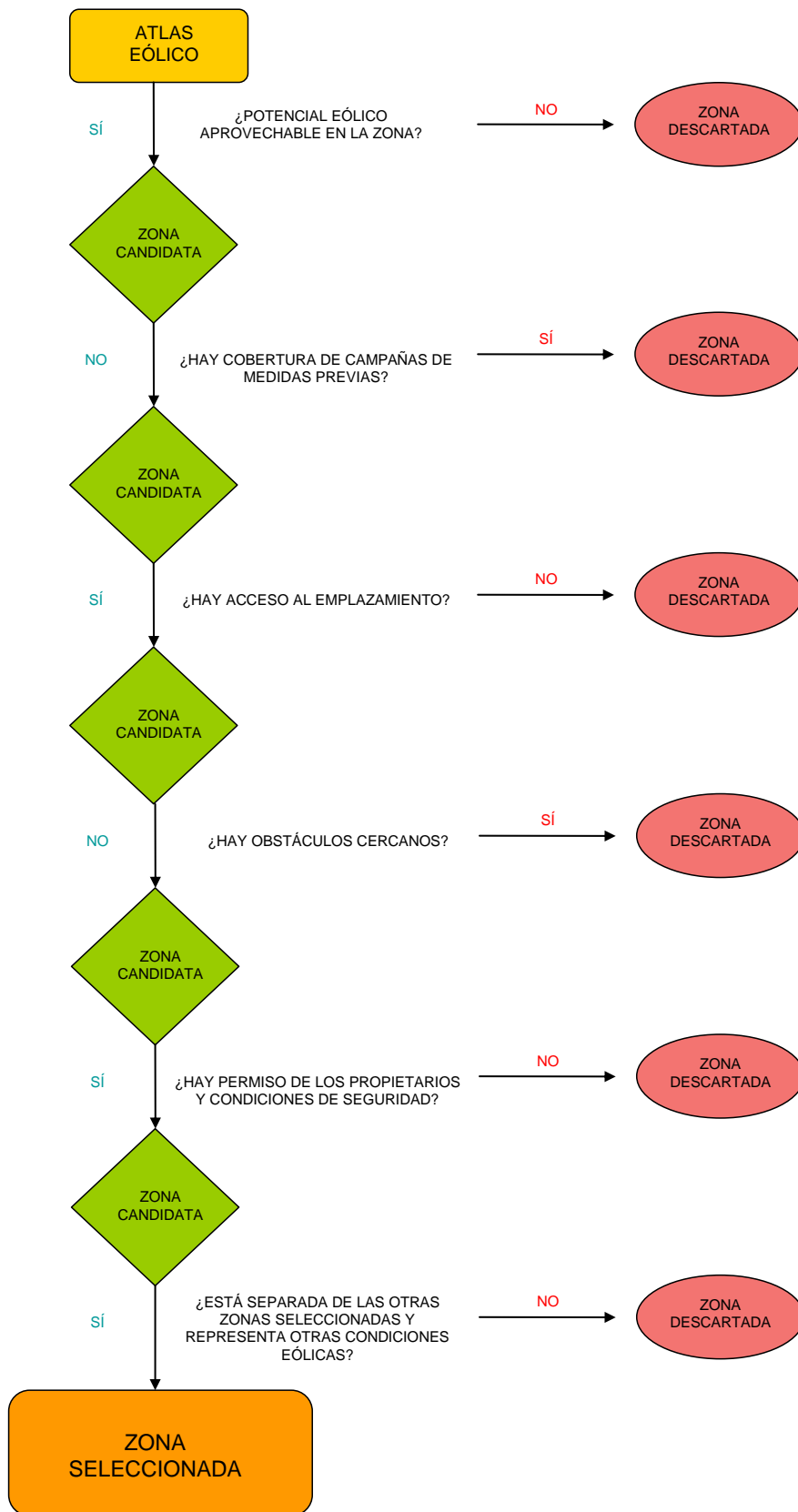
En cuanto a las torres meteorológicas, se han ubicado en emplazamientos con déficit de medidas hasta la fecha.

En la *Figura 50* puede verse como existen algunas zonas en la sierra que pueden resultar de interés desde el punto de vista del recurso eólico disponible. Dado que existe un menor conocimiento de estas áreas (puesto que no se han llevado a cabo campañas de medidas eólicas intensivas) es necesario validar los resultados del Atlas Eólico en estas zonas. Por lo tanto, se instalaron 2 torres meteorológicas en estas zonas de sierra.

Por último, en la zona sur del Perú tampoco existen registros de medida basados en campañas eólicas, por lo que era recomendable validar el Atlas en esta zona con una tercera torre meteorológica.

La imagen siguiente muestra un esquema del proceso seguido para la elección de los emplazamientos de validación del Atlas Eólico.

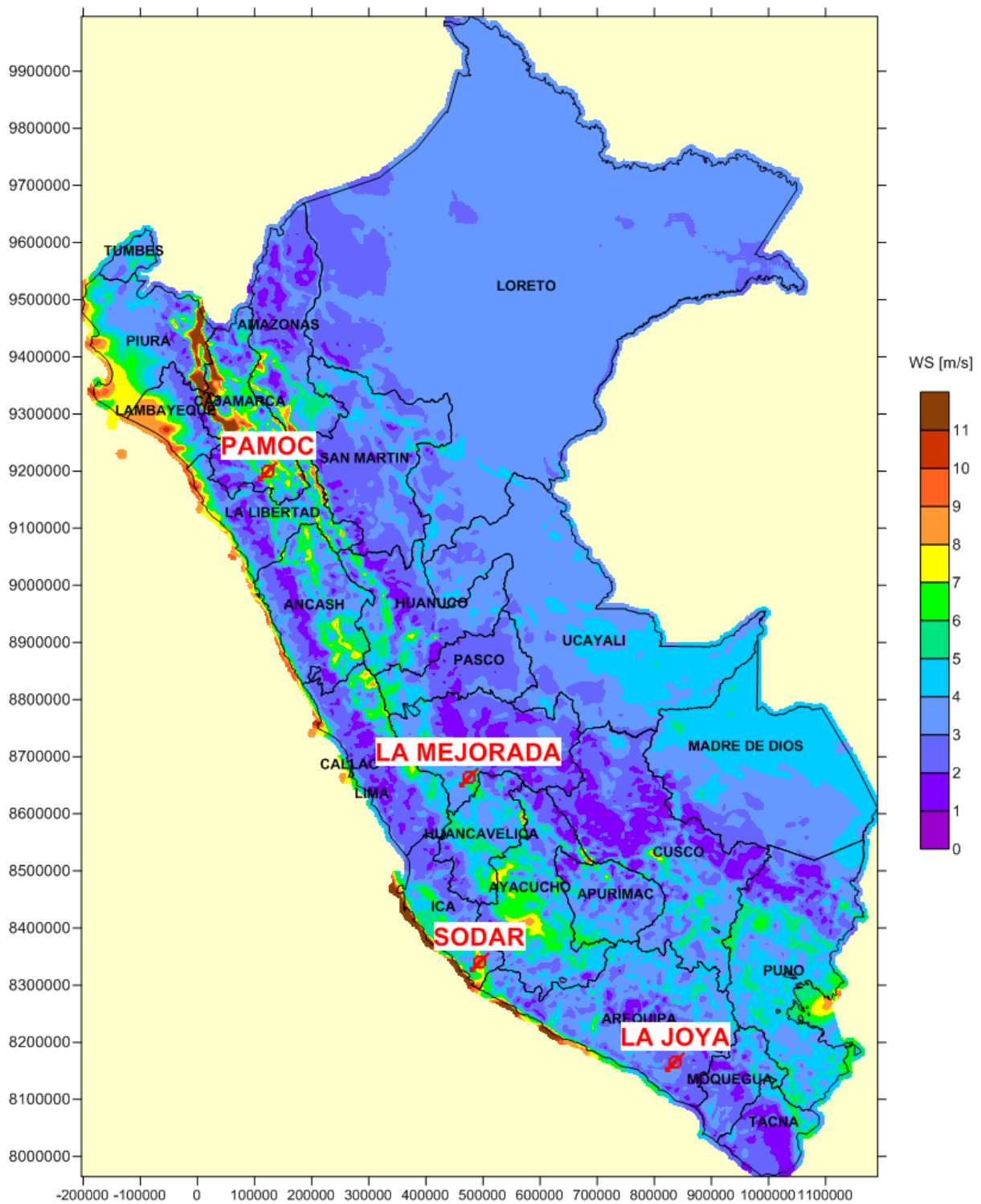
Figura 52. Esquema de selección de emplazamientos de medida para validación.



Fuente: elaboración propia.

La imagen se muestra una imagen con las zonas donde se está desarrollando la campaña de medidas.

Figura 53. Zonas de medida. (Atlas Eólico a 100 m, resolución 1 km).



Fuente: elaboración propia.

### **3.3- ACUERDOS CON PROPIETARIOS Y VISITAS PRELIMINARES**

A lo largo del mes de enero de 2016 se llegó a acuerdos con los particulares propietarios de los terrenos y se realizaron las visitas preliminares a los emplazamientos de la sierra, donde ha sido necesario valorar los emplazamientos y los accesos de manera preliminar.

- El día 22 de enero de 2016 se realizó la visita preliminar al emplazamiento PAMOC. Esta torre meteorológica se fue instalada en el municipio de Huaraclla.
- El día 23 de enero de 2016 se realizó la visita preliminar al emplazamiento LA MEJORADA. Esta torre meteorológica fue instalada en el municipio de Huancayo.
- El emplazamiento de la estación LA JOYA es una zona semi-desértica de fácil acceso. Por lo que no fue necesario realizar una visita previa. Esta torre meteorológica fue instalada en el municipio de La Joya – San José.

Los informes de visita de las torres meteorológicas pueden verse en el Informe de Avance 1 [Ref 9].

### **3.4- CONFIGURACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDIDA**

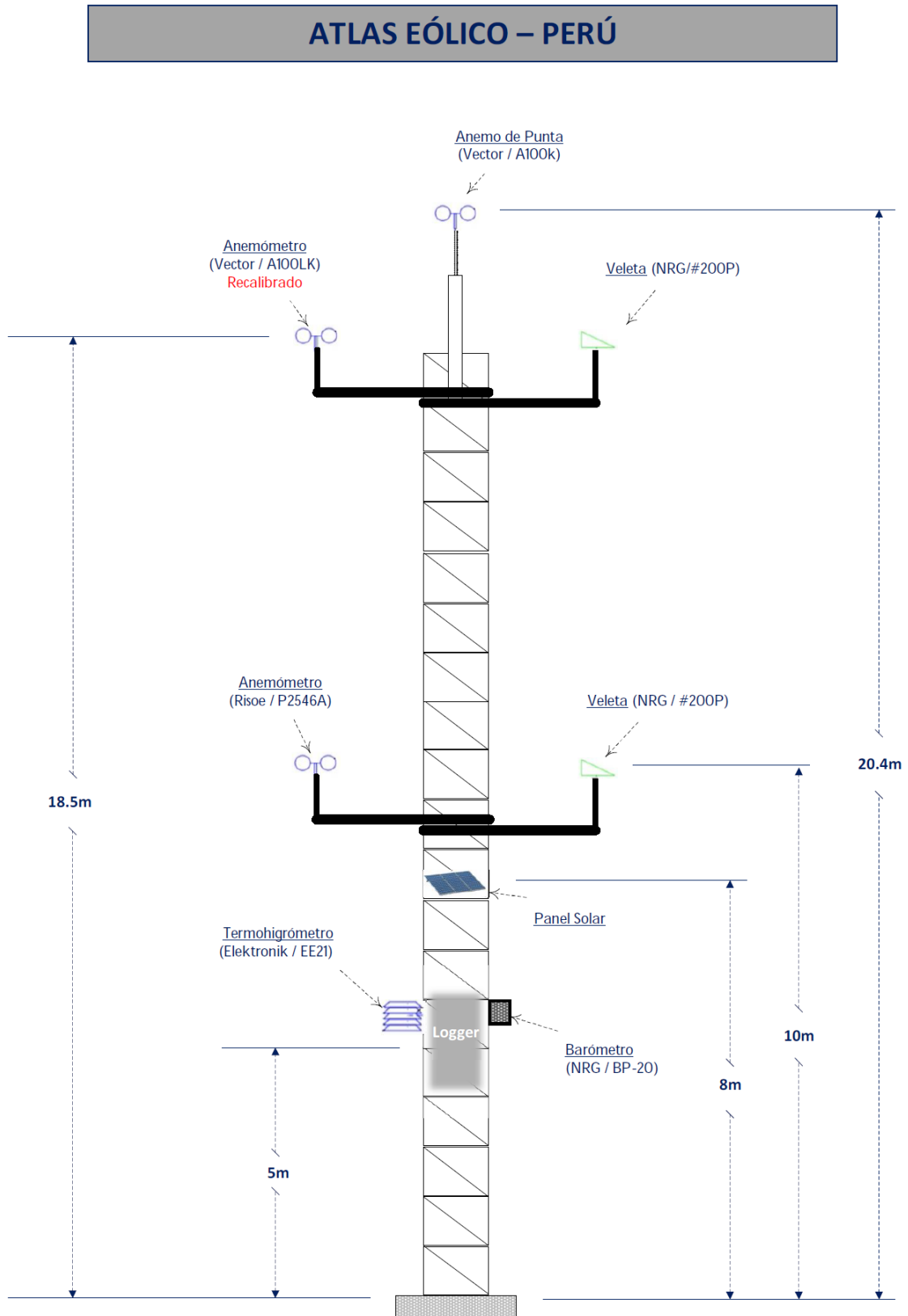
#### **3.4.1.-Torres meteorológicas**

Las 3 torres que se han instalado son todas de 20 metros de altura, los equipos que se han colocado en las mismas son los siguientes:

- 3 anemómetros para medir la velocidad del viento, modelos Vector A100k y Risoe P2546A, colocados a 20.4 m, 18.5 m (redundante) y 10 metros de altura.
- 2 veletas para medir la dirección del viento, modelo NRG 200P, colocadas a 18.5 m y 10 metros de altura.
- 1 termohigrómetro modelo Elektronik EE21 para medir la temperatura y la humedad relativa, se sitúa a la misma altura que el data logger (5 metros).
- 1 barómetro modelo NRG BP20 para medir la presión atmosférica, se sitúa a la misma altura que el data logger (5 metros).
- 1 sistema de adquisición de datos (data logger o SAD) modelo Campbell CR800 para registrar los datos medidos por los equipos, se sitúa a una altura de 5 metros.
- 1 sistema de comunicación: modem + antena para realizar la descarga telemática de los datos almacenados en el data logger.
- 1 sistema de alimentación: panel solar + baterías para alimentar los equipos, el modem y el data logger, se situará a una altura de 8 metros.

A continuación puede verse un esquema de montaje de las torres de 20 metros.

Figura 54. Esquema de torre meteorológica de 20 metros.



Fuente: elaboración propia.

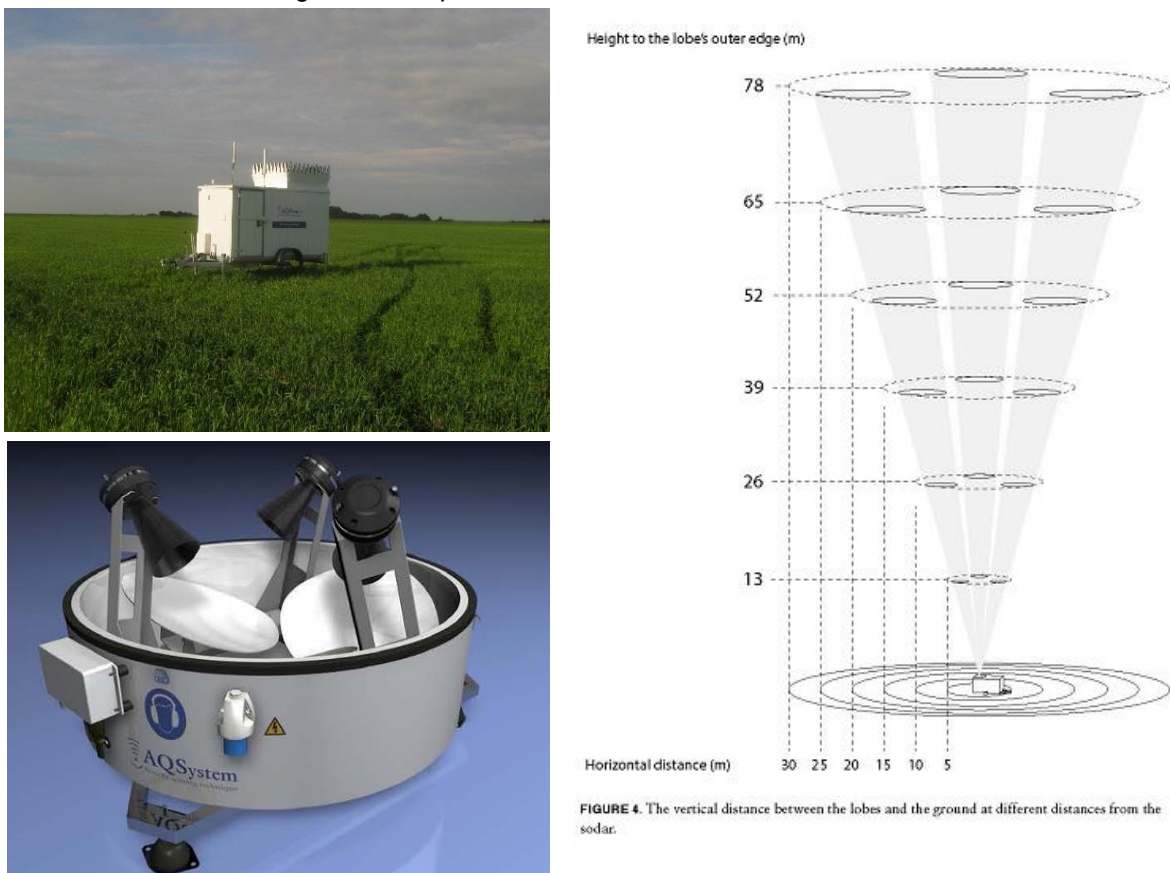
### 3.4.2.- Sistema de medida remota: SODAR

El SODAR es un sistema de medida remota para detección de viento y estructura térmica en la baja atmósfera. El sistema utiliza los mismos principios que el radar, usando ondas acústicas en vez de microondas. El sistema detecta la energía acústica de la atmósfera y a partir del estudio del desplazamiento Doppler y de la energía recibida consigue información sobre las condiciones atmosféricas: perfiles verticales de viento, presencia de capas de inversión térmica y altura de niebla.

Este sistema ha sido utilizado hasta la fecha en numerosas áreas: Predicción de dispersión de contaminantes atmosféricos, Pronóstico meteorológico, Predicción de altura de nieblas, Detección de cizalladura de viento en aeropuertos, Implantación de planes de emergencia en centrales nucleares, Estudios de vientos locales y en terreno complejo, etc.

Este método, presenta muchas ventajas respecto a los sistemas tradicionales de medida del viento (anemómetros y veletas), ya que permite prescindir de la torre de medida y caracterizar el viento a distintas alturas (hasta 150 ó 200 metros) de una manera muy sencilla.

Figura 55. Esquema de funcionamiento de un SODAR.



Fuente AQSystem/Elaboración propia.

### 3.5- INSTALACIÓN DE LAS TORRES METEOROLÓGICAS

#### 3.5.1.-Emplazamiento PAMOC

El día 22 de enero de 2016 se realizó la visita preliminar al emplazamiento PAMOC. Esta torre meteorológica se ha instalado en el municipio de Huaraclla. El día 2 de febrero se realizó la instalación de la torre meteorológica. A continuación, se muestran las coordenadas donde se ha instalado la torre y sus principales características, así como unas imágenes del emplazamiento. El informe de instalación de la torre puede verse en el Informe de Avance 2.

Tabla 12. Coordenadas de la torre PAMOC (UTM – WGS84, Zona 17).

Nombre	Lugar	Coord. X [m]	Coord. Y [m]	Coord. Z [m]
PAMOC	Cajamarca – Huaraclla	787030	9200079	2581

Fuente: elaboración propia.

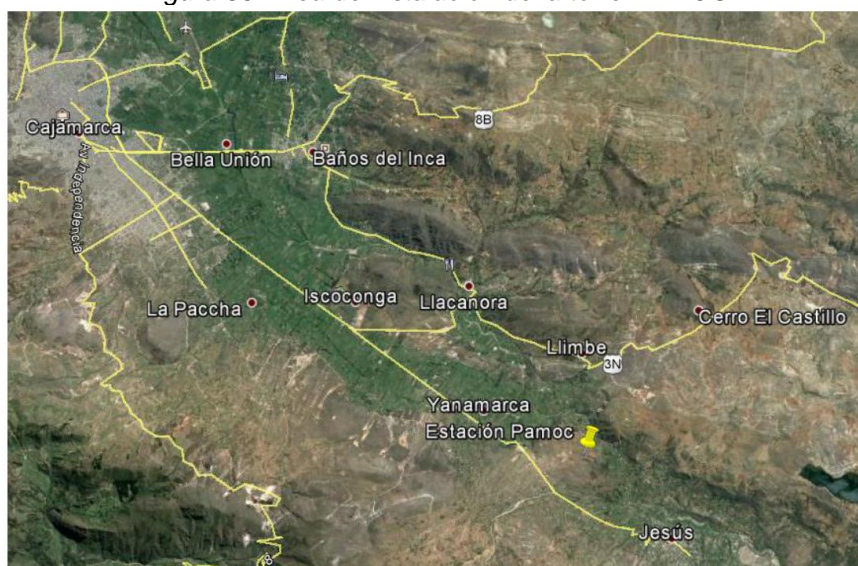
Tabla 13. Configuración de la torre PAMOC.

CONFIGURACIÓN ACTUAL											
Equipo	Marca/Modelo	Código	N° Serie	Altura (m)	Orientación Brazo (1)	N° Calibración	Canal	Slope programado	Offset programado	Cabecero datos	Medida
Anemómetro 1	Vector/ A100K	ACA1664	3604-EVA1	20.20	-	18491AC	C1	0.05035	0.18427	C1	3.71 m/s
Anemómetro 2	Vector/ A100LK	ACA0464	3487-CKNW	18.20	159°	17311AC	C2	0.05058	0.23436	C2	2.45 m/s
Anemómetro 3	Windsensor/P2546A	ACA0623	6220	11.00	159°	9889AC	C3	0.61806	0.17391	C3	1.35 m/s
Veleta 1	NRG/ #200P	VTA0579	-	18.10	339°	-	A 1	2.5	159	A 1	140 °
Veleta 2	NRG/ #200P	VTA0578	-	10.10	339°	-	A 2	2.5	159	A 2	148 °
Sensor Temperatura	Elektronik/ EE21-FT6A26/T24	STM0305	110601000034	4.70	-	-	A 3	62.50	-45.00	A 3	16.92 °C
Sensor Humedad							A 4	62.50	-25.00	A 4	65.85 %
Presión	NRG/ BP-20	SPR0253	180514328	4.70	-	-	A 5	217.9	107.90	A 5	740.76 hPa
Sist. Adquisición datos	CR800/Campbel	SAD065	35609	4.70	-	-	-	-	-	-	-
Lista de equipos calefactados:											

- (1) En las orientaciones de los brazos **NO** está considerada la declinación magnética.  
 (2) Promedio de almacenamiento de datos: 10min. Frecuencia de muestreo: 1Hz. Software: Nomad2

Fuente: elaboración propia.

Figura 56. Área de instalación de la torre PAMOC.



Fuente: Google Earth.

*Figura 57. Torre meteorológica PAMOC.*



*Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 58. Fotografía desde la torre PAMOC hacia el NE.*



*Fuente: Elaboración propia.*

*Figura 59. Fotografía desde la torre PAMOC hacia el SO.*



*Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 61. Torre meteorológica LA MEJORADA.*



*Fuente: Elaboración propia.*

Figura 62. Fotografía desde la torre LA MEJORADA hacia el E.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 63. Fotografía desde la torre LA MEJORADA hacia el O.



Fuente: Elaboración propia.

### 3.5.3.-Emplazamiento LA JOYA

El emplazamiento de la estación LA JOYA es una zona semi-desértica de fácil acceso. Por lo que no ha sido necesario realizar una visita previa. Esta torre meteorológica se ha instalado en el municipio de San José. El día 13 de febrero de 2016 se realizó la instalación de la torre meteorológica. A continuación, se muestran las coordenadas donde se ha instalado la torre y sus principales características, así como unas imágenes del emplazamiento. El informe de instalación de la torre puede verse en el Informe de Avance 2.

Tabla 16. Coordenadas preliminares de la torre LA JOYA (UTM – WGS84, Zona 19).

Nombre	Lugar	Coord. X [m]	Coord. Y [m]	Coord. Z [m]
LA JOYA	Arequipa – San José	196976	8164985	1467

Fuente: elaboración propia.

Tabla 17. Configuración de la torre LA JOYA.

CONFIGURACIÓN ACTUAL											
Equipo	Marca/Modelo	Código	Nº Serie	Altura (m)	Orientación Brazo (1)	Nº Calibración	Canal	Slope programado	Offset programado	Cabecero datos	Medida
Anemómetro 1	Vector/ A100K	ACA1657	3597-EUZ4	20.10	-	17618AC	C1	0.05075	0.19194	Ane20m	7.40 m/s
Anemómetro 2	Vector/ A100LK	ACA0380	2802-HFV	18.00	115°	16178AC	C2	0.04972	0.20458	Ane18m	7.10 m/s
Anemómetro 3	Windsensor/P2546A	ACA0621	6218	10.80	115°	9887AC	C3	0.61977	0.15530	Ane10m	6.49 m/s
Veleta 1	NRG/ #200P	VTA0563	-	17.90	295°	-	SE1	360	115	Vane18m	184 °
Veleta 2	NRG/ #200P	VTA0562	-	10.70	295°	-	SE2	360	115	Vane10m	186 °
Sensor Temperatura	Elektronik/ EE21-FT6A26/T24	STM0312	111010000285	5.20	-	-	SE3	0.025	-45.00	Temp	26.31 °C
Sensor Humedad							SE4	0.025	-25.00	RH	51.76 %
Presión	NRG/ BP-20	SPR0254	180514320	5.20	-	-	DIF3	0.2179	106.60	Barom	856.64 hPa
Sist. Adquisición datos	CR800/Campbell	SAD0606	35610	5.20	-	-	-	-	-	-	-
Lista de equipos calefactados:											

(1) En las orientaciones de los brazos **NO** está considerada la declinación magnética.

(2) Promedio de almacenamiento de datos: 10min. Frecuencia de muestreo: 1Hz. Software: LoggerNet 4.3

Fuente: elaboración propia.

Figura 64. Área de instalación de la torre LA JOYA.



Fuente: Google Earth.

*Figura 65. Torre meteorológica LA JOYA.*



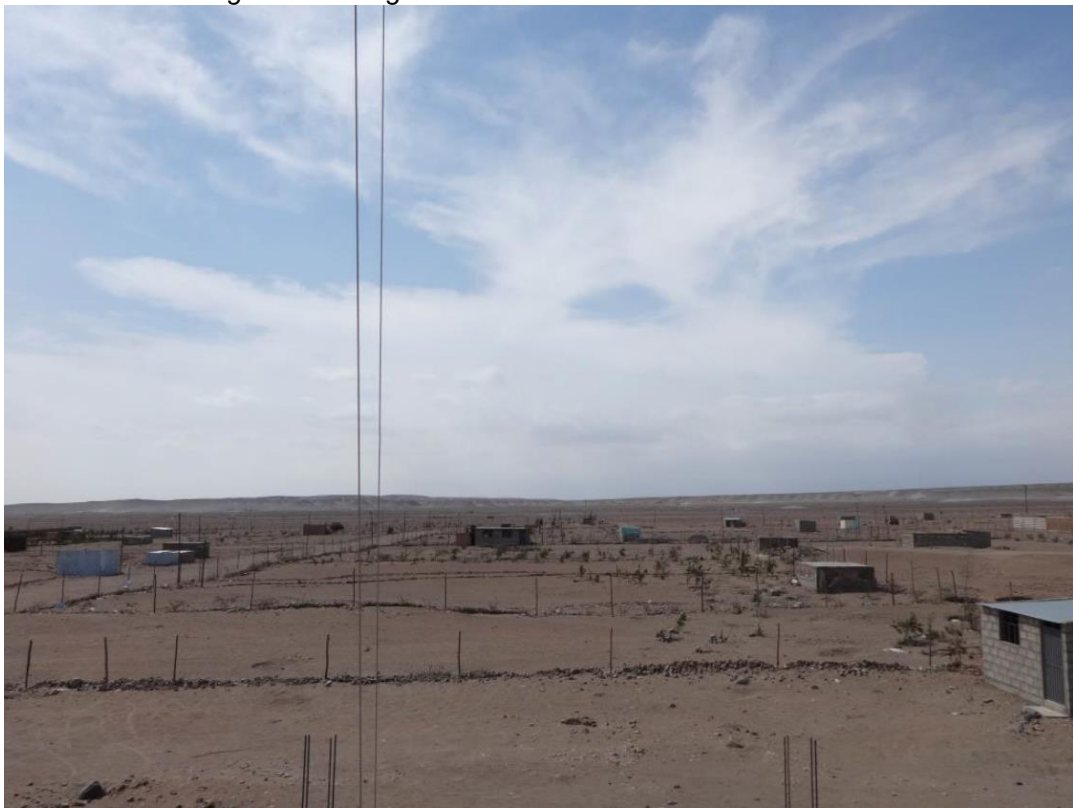
*Fuente: Elaboración propia.*

Figura 66. Fotografía desde la torre LA JOYA hacia el E.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 67. Fotografía desde la torre LA JOYA hacia el O.



Fuente: Elaboración propia.

### 3.6- INSTALACIÓN DEL SODAR

El emplazamiento del sistema de medida remota SODAR es una zona semi-desértica de fácil acceso. Por lo que no ha sido necesario realizar una visita previa. Este equipo de medida remota se ha instalado en el municipio de Poroma el día 8 de junio de 2016. A continuación, se muestran las coordenadas donde se ha instalado el SODAR y sus principales características, así como unas imágenes del emplazamiento.

Tabla 18. Coordenadas preliminares del SODAR (UTM – WGS84, Zona 18).

Nombre	Lugar	Coord. X [m]	Coord. Y [m]	Coord. Z [m]
SODAR	Ica – Poroma	494148	8339959	495

Fuente: elaboración propia.

Tabla 19. Configuración del SODAR.

EQUIPO DE MEDICION REMOTA	
Tecnología	SODAR
Fabricante	AQSystem
Marca y modelo	AQSystem AQ500
Código	SOD004
Nº de serie	-
Alturas de medidas	De 20 a 150m. Intervalos: 5m.
Orientación (1)	270º
Versión del software	9S30
Tipo medida	3 haces acústicos
Ángulo haz	15º
Calefactado	Sí

(1) La orientación está referida al norte magnético.

DESCRIPCIÓN EMPLAZAMIENTO:				
Coordenadas leídas SODAR (x, y):	(494148, 8339959)	Altitud:	495 metros	
Proyección:	UTM	Huso:	18H	Datum: WGS84
Declinación magnética: 2.29º W				

Fuente: elaboración propia.



Tabla 20. Especificaciones técnicas del SODAR.

## Antenna Specification

Description	AQ500	Note
Antenna configuration	3 horn offset focus	
Speakers	3	
Transmitting frequency	3144Hz	
Beams	3	
Beam angles	15	
Beam width	12 degrees	
Acoustic Power output (Max)	17W	
Pulse repetition	Multimode	
Pulse power (Max)	300W	
Weight	70kg	
*Dimensions (Width x Height)	1.0m x 1.4m	
Antenna cable	50m	Stand Alone

\* Including wind shield

## Ambient Conditions

Description	AQ500
Humidity Antenna	10 - 100%
Humidity outdoor enclosure	10 - 100%
Oper. temp antenna	-40 to +60 deg C
Oper. temp outdoor enclosure	-20 to +30 deg C

<b>Description</b>	<b>AQ500</b>
Max Height	150m
Min Height	20m
Receiver gain	110dB
Receiver filter	4th order Chebyshev
Resolution	5m
Averaging time	10min
Horizontal speed range	0 - 50m/s
Accuracy of hor. Speed	≤0.1m/s
Vertical resolution	0.05m/s
Vertical speed range	+/- 10m/s
Accuracy of wind direction	2 - 3 deg
Signal to noise ratio	Yes
Noise suppression	Yes
Sigma -horiz. Speed	Yes
Sigma - vert. speed	Yes, option
Sigma- wind direction	Yes, option
Wind shear	Yes, option
Confidence / error class	Yes
Back scatter process, FFT pts	1024

*Fuente: AQSystem.*

Figura 68. Área de instalación del SODAR.



Fuente: Google Earth.

Figura 69. Sistema de medición remota SODAR.



Fuente: Elaboración propia.

*Figura 70. Fotografía desde el SODAR hacia el E.*



*Fuente: Elaboración propia.*

*Figura 71. Fotografía desde el SODAR hacia el O.*



*Fuente: Elaboración propia.*

### 3.7- GESTIÓN DE LOS DATOS DE LA CAMPAÑA DE MEDIDAS

Barlovento dispone de un software propio de gestión automática de medidas: GESMED® que permite el control inmediato del estado de las estaciones y ofrece los datos revisados de forma inmediata.

*Figura 72. Acreditaciones en campaña de medidas de Barlovento.*



*Fuente: elaboración propia.*

Los datos de las torres meteorológicas han sido introducidos dentro de la herramienta GESMED®, el CONSORCIO ha realizado un seguimiento de los mismos, así como un tratamiento de calidad conforme a los procedimientos internos de Barlovento y a la guía de MEASNET [Ref 16].

### 3.8- CAMPAÑA DE MEDIDAS: VALIDACIÓN

Una vez transcurrido el periodo de medida, se ha procedido al desmontaje de las torres y SODAR instalados.

Las medidas registradas han sido analizadas y aquellas que han superado el proceso de calidad han sido empleadas para realizar una validación final del recurso eólico, realizando los últimos ajustes a los datos del Atlas Eólico.

Un esquema general del proceso de elaboración del Atlas Eólico se muestra a continuación.

#### 4. DESCRIPCIÓN REGIONAL DEL POTENCIAL EÓLICO EN EL PERÚ

##### 4.1- POTENCIAL EÓLICO DESARROLLADO

Actualmente el potencial eólico desarrollado en el Perú es el siguiente:

*Tabla 21. Potencial eólico en operación y desarrollo en la actualidad (año 2016).*

PARQUE EÓLICO	POTENCIA INSTALADA	DEPARTAMENTO	ESTADO
P.E. Marcona	32 MW	Ica	En operación
P.E. Cupisnique	83.15 MW	La Libertad	En operación
P.E. Talara	30.86 MW	Piura	En operación
P.E. Tres Hermanas	90 MW	Ica	En operación
P.E. Parque Nazca	126 MW	Ica	Autorizado. En desarrollo
P.E. Huambos	18 MW	Cajamarca	Autorizado. En desarrollo
P.E. Duna	18 MW	Cajamarca	Autorizado. En desarrollo

*Fuente: MINEM.*

Como puede verse hay 236 MW en operación actualmente en el Perú. Además, existen otros 172 MW que han sido autorizados en la cuarta subasta RER para suministro de energía al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN).

La tabla siguiente muestra la energía eólica total desarrollada actualmente por Departamento.

*Tabla 22. Potencial eólico desarrollado en el Perú por Departamento.*

DEPARTAMENTO	POTENCIA INSTALADA Y AUTORIZADA
Ica	248 MW
La Libertad	83.15 MW
Piura	30.86 MW
Cajamarca	36 MW

*Fuente: Osinergmin.*

Como puede verse la energía eólica se ha desarrollado hasta el momento en cuatro Departamentos.

#### **4.2- POTENCIAL EÓLICO TOTAL**

Se han identificado las zonas preferentes para la futura prospección detallada in situ y que serían de interés para la instalación de aerogeneradores o parques eólicos. Para este análisis, se han tenido en cuenta los siguientes criterios:

- Densidad de potencia desde moderado a excelente ( $P/A > 300 \text{ W/m}^2$ ) a 100 m.
- Distribución de frecuencia del viento favorable.
- Pendiente del terreno menor o igual al 20%.
- Cercanía a las vías de acceso transitables.
- Cercanía a los centros poblados, a las Líneas y Subestaciones de Media y Alta Tensión existentes.
- Parques eólicos existentes.
- Altitud del emplazamiento inferior a 3500 metros de altura.

#### **4.3- POTENCIAL EÓLICO APROVECHABLE**

A efectos del Atlas Eólico, se considera potencial eólico aprovechable aquel potencial que cumple los requisitos del apartado anterior (5.2) y que además cumpla:

- Estar fuera de las zonas inadecuadas para la construcción de aerogeneradores y parque eólicos (zonas arqueológicas, parques nacionales, reservas naturales, zonas históricas, áreas naturales protegidas, zonas recreacionales, etc.).

#### **4.4- POTENCIAL EÓLICO EXCLUÍDO**

El potencial eólico excluido es aquel potencial que aun cumpliendo los requisitos del apartado 5.2, no se puede aprovechar debido a que la construcción de los aerogeneradores y parques eólicos no estará permitida por las disposiciones legales (zonas arqueológicas, parques nacionales, reservas naturales, zonas históricas, etc.).

La tabla siguiente muestra el potencial eólico por Departamento.

Tabla 23. Potencial eólico (MW) en el Perú (100 m) según el Atlas Eólico.

DEPARTAMENTO	POTENCIAL EÓLICO APROVECHABLE (MW)	POTENCIAL EÓLICO EXCLUÍDO (MW)	POTENCIAL EÓLICO TOTAL (MW)
Amazonas	129	288	417
Ancash	708	108	816
Apurímac	0	0	0
Arequipa	1020	156	1176
Ayacucho	0	0	0
Cajamarca	891	282	1173
Callao	0	0	0
Cuzco	0	0	0
Huancavelica	0	0	0
Huánuco	0	0	0
Ica	2280	3015	5295
Junín	0	0	0
La Libertad	921	264	1185
Lambayeque	7017	2097	9114
Lima	429	189	618
Loreto	0	0	0
Madre de Dios	0	0	0
Moquegua	0	0	0
Pasco	0	0	0
Piura	7098	1503	8601
Puno	0	0	0
San Martín	0	0	0
Tacna	0	0	0
Tumbes	0	0	0
Ucayali	0	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>20493</b>	<b>7902</b>	<b>28395</b>

Fuente: Elaboración propia.



## **5. ATLAS EÓLICO DEL PERÚ**

### **5.1- RESUMEN**

El propósito del presente estudio ha sido actualizar el Atlas Eólico del Perú, así como promover el fortalecimiento de las capacidades del sector para evaluar el aprovechamiento de la energía eólica con fines energéticos.

El objetivo clave de la metodología técnica empleada ha sido proporcionar una caracterización de las condiciones del viento validada y de alta calidad, de 1 km de resolución final y cobertura terrestre completa en todo el Perú, incluyendo una extensión ("*buffer*") de dos millas náuticas en aquellas zonas que limitan con el mar.

La metodología empleada por el CONSORCIO se ha basado en el estado del arte de las tecnologías de modelado del recurso eólico multiescala, y ha sido diseñada para cubrir todas las especificaciones requeridas y suministrar los entregables solicitados al más alto nivel de precisión, de acuerdo con el cronograma del proyecto.

El enfoque del presente proyecto se basa en los siguientes requisitos:

- El uso de tecnología de mesoescala como la herramienta para elaborar la caracterización del recurso eólico en el Atlas Eólico.
- El empleo garantizado de las mejores técnicas y conocimientos sobre el tratamiento de datos de para la realización del Atlas Eólico.
- El compromiso activo con el MINEM de todas las aplicaciones potenciales del Atlas Eólico, incluyendo trabajar con él para mejorar los resultados obtenidos a partir de datos reales.

### **5.2- TRABAJOS DESARROLLADOS**

Los trabajos a desarrollados en el presente estudio para la elaboración del Atlas Eólico de todo el territorio del Perú (incluyendo 2 millas náuticas) han sido los siguientes:

- Análisis y depurado de los datos atmosféricos de entrada de los modelos de reanálisis CFSR del NCEP (Nacional Center for Environmental Prediction).
- Elección adecuada del periodo de datos a introducir al modelo meteorológico.
- Modelización meteorológica mesoescalar mediante el modelo numérico WRF, con una resolución final de resultados de 1 km.
- Elaboración de un informe final (incluyendo mapas eólicos y evaluación del potencial) más un soporte digital adecuado para visualizar los resultados.
- Integración de dicho atlas en un sistema de información geográfica (SIG) junto con otras capas que proporcionan información adicional complementaria (restricciones ambientales, localización de líneas eléctricas, etc.).
- Elaboración de un plan de requerimientos de acciones e infraestructuras, dirigido a fortalecer la capacidad del sector para validar el potencial eólico y evaluar el aprovechamiento de la energía eólica para fines de generación eléctrica.
- Realización de un taller de capacitación con el propósito de difundir los resultados finales del Atlas Eólico. El objetivo de dicho taller de capacitación es exponer todo el trabajo desarrollado por el consultor y transmitir el conocimiento necesario para llevar a cabo el desarrollo y mantenimiento del atlas; así como recibir el "feedback" necesario por parte del MINEM y del BID antes de la entrega definitiva del Atlas Eólico.

Como consecuencia de estos trabajos, a lo largo de los 11 meses de duración del proyecto se han elaborado toda una serie de entregables entre los que destacan:

- Entregable 1: Informe del plan de trabajo e información técnica necesaria para la elaboración del Atlas Eólico.
- Entregable 2: Metodología para el desarrollo del Atlas Eólico actualizado y el plan de requerimientos.
- Informe de Avance 1: Información disponible para el estudio. Campaña de medidas: selección de emplazamientos.
- Informe de Avance 2: Recopilación de información disponible para el estudio. Campaña de medidas: instalación y puesta en marcha.
- Entregable 3: Atlas Eólico preliminar.
- Estudio de caracterización preliminar de proyectos eólicos.
- Plan de requerimientos de acciones e infraestructuras.

### 5.3- PRODUCTOS FINALES

Los productos finales del Atlas Eólico del Perú son los siguientes:

1. Documento del Atlas Eólico actualizado.

El presente documento contiene un resumen ejecutivo con todas las actividades realizadas durante el desarrollo del estudio, así como el análisis y conclusiones de las mismas; se incluye también la metodología completa empleada para el desarrollo del Atlas Eólico, así como los principales mapas de viento y densidad de potencia en los distintos anexos.

2. Aplicación Web-GIS del Atlas Eólico.

El Atlas Eólico se ha integrado en un sistema de información geográfica (SIG) junto con otras capas que proporcionan información adicional complementaria (restricciones ambientales, localización de líneas eléctricas, etc.). Este sistema SIG ha sido implementado en una plataforma web de libre acceso. El objetivo de dicha web es proporcionar información de utilidad sobre la viabilidad de proyectos eólicos para fines energéticos; tanto para la implementación de parques eólicos como para sistemas pequeños de electrificación rural, o urbana para la aplicación de generación distribuida. Además, la plataforma web permite la obtención de los siguientes resultados para las alturas indicadas:

- Datos de ubicación del punto seleccionado, incluyendo Departamento, Provincia, Distrito, altitud, distancias a elementos de interés tales como líneas eléctricas, carreteras, y rugosidades.
- Información sobre zonas excluyentes tales como reservas naturales, zonas históricas, parques nacionales, áreas arqueológicas, etc.
- Datos del recurso eólico del punto seleccionado, incluyendo toda la información de utilidad para posteriores desarrollos de proyectos, como velocidad, dirección, densidad de potencia, distribución de Weibul, producción de aerogenerador, etc.

3. Manual de uso del software y de interpretación del Atlas Eólico.

La aplicación Web-GIS del Atlas Eólico cuenta con un manual que describe todas las funcionalidades del Atlas, así como su estructura interna de forma que se facilite su mantenimiento y actualización posterior.

4. Plan de requerimientos de acciones e infraestructuras.

El plan incluye la elaboración de una propuesta de acciones e infraestructuras necesarias cuyo fin sea validar el potencial eólico y evaluar su aprovechamiento para fines energéticos, así como mantener el Atlas Eólico actualizado en los próximos años. En dicho plan se incluye una propuesta de mantenimiento del Atlas Eólico y un calendario con las siguientes etapas.

5. Aplicación para sistemas aislados: Micro-Renova Perú

La aplicación digital permite obtener una primera estimación del potencial energético de un sistema de generación de energía de pequeña potencia mediante energía mini-eólica en el ámbito rural o urbano para la aplicación de generación distribuida. La aplicación realiza el cálculo tanto para sistemas conectado a red con autoconsumo, como para sistemas no conectados a red.

## ANEXO A. REFERENCIAS Y FUENTES DE DATOS

La tabla siguiente muestra fuentes de datos y las referencias utilizadas.

Tabla 24. Referencias y fuentes de datos.

No.	Nombre / Descripción	Origen / Autor	Archivos / Hardware	Fecha
Ref 1.	SBCC-05/PROSEMER-MINEM Estudio para el aprovechamiento eólico con fines energéticos y actualización del Atlas Eólico del Perú	PROSEMER /MINEM	SBCC 05 – Solicitud de propuestas – Atlas Eólico	Marzo 2015
Ref 2.	Acta N°009-2015-SBCC-05/PROSEMER-MINEM/BID 13202 Apertura de sobres de precio	PROSEMER /MINEM	Apertura de sobres de precios	Junio 2015
Ref 3.	Inicio del servicio de consultoría "Estudio para el aprovechamiento eólico con fines energéticos y actualización del Atlas Eólico del Perú	PROSEMER /MINEM	e-mail: Inicio del servicio de consultoría "Estudio para el aprovechamiento eólico con fines energéticos y actualización del Atlas Eólico del Perú" Interno BRN	Octubre 2015
Ref 4.	Estudio para el aprovechamiento eólico con fines energéticos y actualización del Atlas Eólico del Perú Términos de Referencia	PROSEMER /MINEM	TdR con NO	Agosto 2014
Ref 5.	Acta N°011-2015-SBCC-05/PROSEMER/MINEM/BID 13202 Acta de cierre de negociación	PROSEMER /MINEM	Acta 011-2015-SBCC-05	Julio 2015
Ref 6	Propuesta Técnica Extensa	Barlovento Renovables Latinoamérica  Barlovento Recursos Naturales  Vortex Factoría de Calculs	Propuesta Técnica	Mayo 2015
Ref 7	Entregable 1 : Informe de plan de trabajo e información técnica necesaria	Barlovento Renovables Latinoamérica  Barlovento Recursos Naturales  Vortex Factoría de Calculs	Entregable-1_rev01	Diciembre 2015

No.	Nombre / Descripción	Origen / Autor	Archivos / Hardware	Fecha
Ref 8	Entregable 2: Metodología para el desarrollo del Atlas eólico actualizado y el plan de requerimientos	Barlovento Renovables Latinoamérica  Barlovento Recursos Naturales  Vortex Factoría de Calculs	Entregable-2_rev02	Enero 2016
Ref 9	Informe de Avance 1: Recopilación de información disponible para el estudio. Campaña de medidas: selección de emplazamientos	Barlovento Renovables Latinoamérica  Barlovento Recursos Naturales  Vortex Factoría de Calculs	Informe-Avance-1_rev01	Febrero 2016
Ref 10	Informe de Avance 2: Recopilación de información disponible para el estudio. Campaña de medidas: instalación y puesta en marcha	Barlovento Renovables Latinoamérica  Barlovento Recursos Naturales  Vortex Factoría de Calculs	Informe-Avance-2_rev01	Marzo 2016
Ref 11	WRF: ARW version 3 Modeling System User's Guide	WRF users page	<a href="http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/ARWUsersGuideV3.pdf">http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/ARWUsersGuideV3.pdf</a>	Julio 2015
Ref 12	NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)	NCEP	Saha, S., et al. 2010. <i>NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) 6-hourly Products, January 1979 to December 2010</i> . Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. <a href="http://dx.doi.org/10.5065/D69K487J">http://dx.doi.org/10.5065/D69K487J</a> .	2016
Ref 13	IEC 61400-1 Ed.3 Amendment	IEC	IEC 61400-1 Ed.3 Amendment	2010
Ref 14	IEC 61400-12-1 Ed.3	IEC	IEC 61400-12-1 Ed.3	2005
Ref 15	ESA GLOBCOVER	ESA	<a href="http://due.esrin.esa.int/page_globcover.php">http://due.esrin.esa.int/page_globcover.php</a>	2016
Ref 16	MEASNET Procedure: Evaluation of site-specific wind conditions. Version 2, April 2016	MEASNET	Measnet_SiteAssessment_V2.0.pdf	2016

Fuente: elaboración propia.

**ANEXO B. GLOSARIO DE TÉRMINOS**

*Tabla 25. Glosario de términos por orden alfabético empleados en el documento.*

<b>TÉRMINO</b>	<b>SIGNIFICADO</b>
ANA	Autoridad Nacional del Agua
AEMET	Agencia Española de Meteorología
AFWA	Air Force Weather Agency
ARPS	Advanced Regional Prediction System
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
CFSR	Climate Forecast System Reanalysis
CLIENTE	Ministerio de Energía y Minas del Perú
COAMPS	Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System
COES - SINAC	Sistema Eléctrico Interconectado Nacional del Perú
CONSORCIO	Barlovento Renovables Latinoamérica, Barlovento Recursos Naturales y Vortex FdC
CPN	Centro de Predicción Numérica (SENAMHI)
DGE	Dirección General de Electricidad
ENAC	Entidad Nacional de Acreditación de España
ESA	European Space Agency
ESA GLOBCOVER	ESA GlobCover Land Cover 1. Datos de cobertura de La Tierra
FAA	Federal Aviation Administration
FONER	Proyecto de Mejoramiento de Electrificación Rural mediante Fondos Concursables
FSL	Forecast System Laboratory
GESMED®	Software de Gestión de Medidas, propiedad de Barlovento Recursos Naturales, S.L.
GFS	Global Forecast System
HIRLAM	High Resolution Limited Area Model
IEA	International Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission
IGN	Instituto Geográfico Nacional Peruano
INEI	Instituto Nacional de Estadística e Informática
INGEMMET	Instituto Geológico Minero y Metalúrgico
JPL	Jet Propulsion Laboratory (NASA)
LAT	Línea de Alta Tensión
LIDAR	Light Detection and Ranging

<b>TÉRMINO</b>	<b>SIGNIFICADO</b>
MASS	Mesoscale Atmospheric Simulation System
MC2	Mesoscale Compressible Community model
MEASNET	International Network for Harmonised and Recognised Measurements in Wind Energy
MINAGRI	Ministerio de Agricultura y Riego del Perú
MINAM	Ministerio del Ambiente del Perú
MINEM	Ministerio de Energía y Minas del Perú
MM5	Fifth-Generation NCAR / Penn State Mesoscale Model
MTC	Ministerio de Transportes y Comunicación del Perú
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCAR	Nacional Center for Atmospheric Research
NCEP	Nacional Center for Environmental Prediction
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (USA)
OSINERGMIN	Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Mina
PROSEMER	Programa para la Gestión Eficiente y Sostenible de los Recursos Energéticos del Perú
RAMS	Regional Atmospheric Model System
SAD	Sistema de Adquisición de Datos
SEIN	Sistema Eléctrico Interconectado Nacional
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
SERNANP	Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado
SET	Subestación Eléctrica
SIG	Sistema de Información Geográfica
SODAR	Sonic Detection and Ranging
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TdR	Términos de Referencia. Estudio para el aprovechamiento eólico con fines energéticos y actualización del Atlas Eólico del Perú.
UCAR	University Corporation for Atmospheric Research
UTM	Universal Transversal Mercator
WGS 84	World Geodetic System 1984
WPD	Densidad de potencia del viento (Wind Power Density)
WRF	Weather Research and Forecasting Model
WS	Velocidad del viento (Wind Speed)

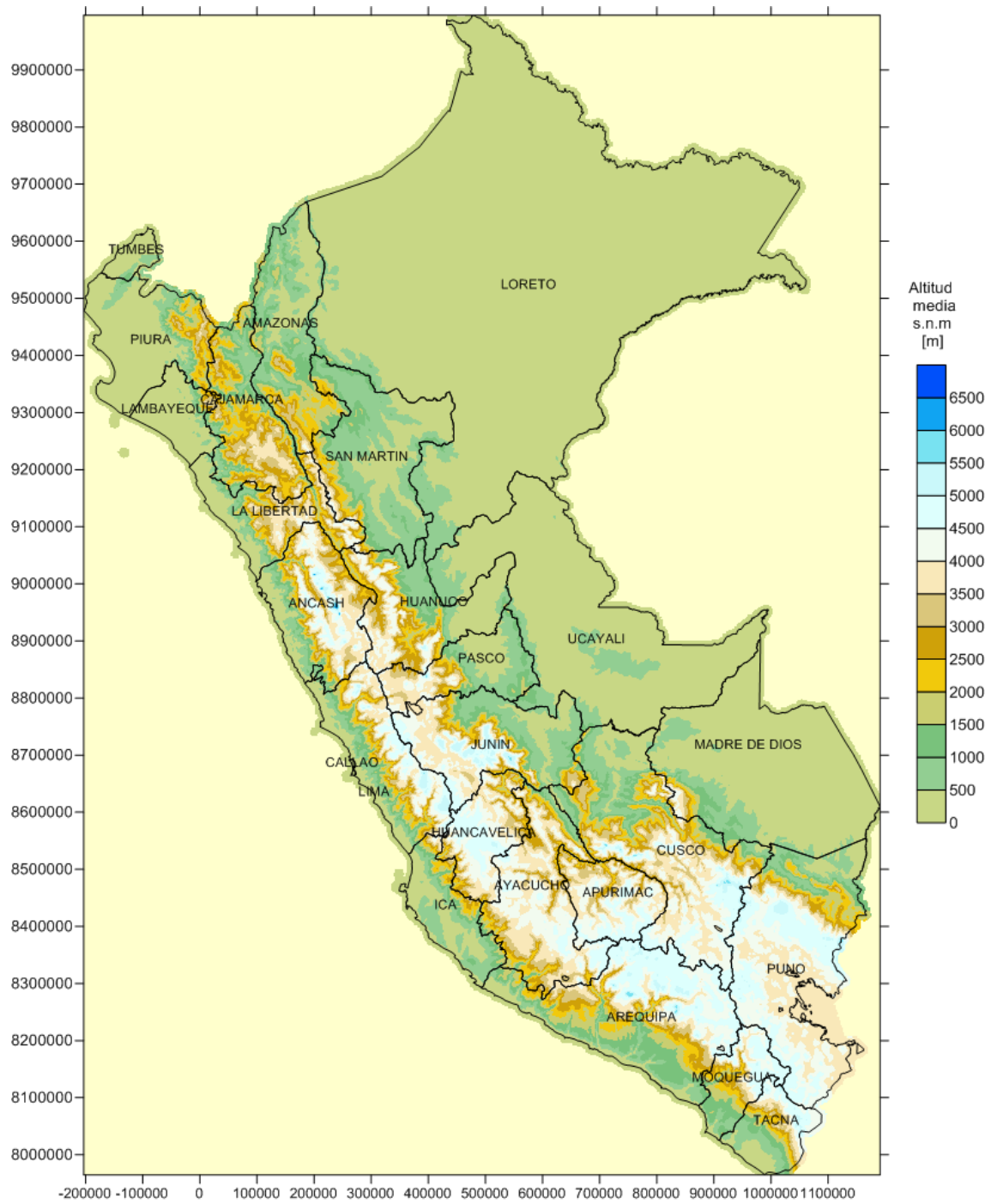
*Fuente: elaboración propia.*

# **ANEXO C.**

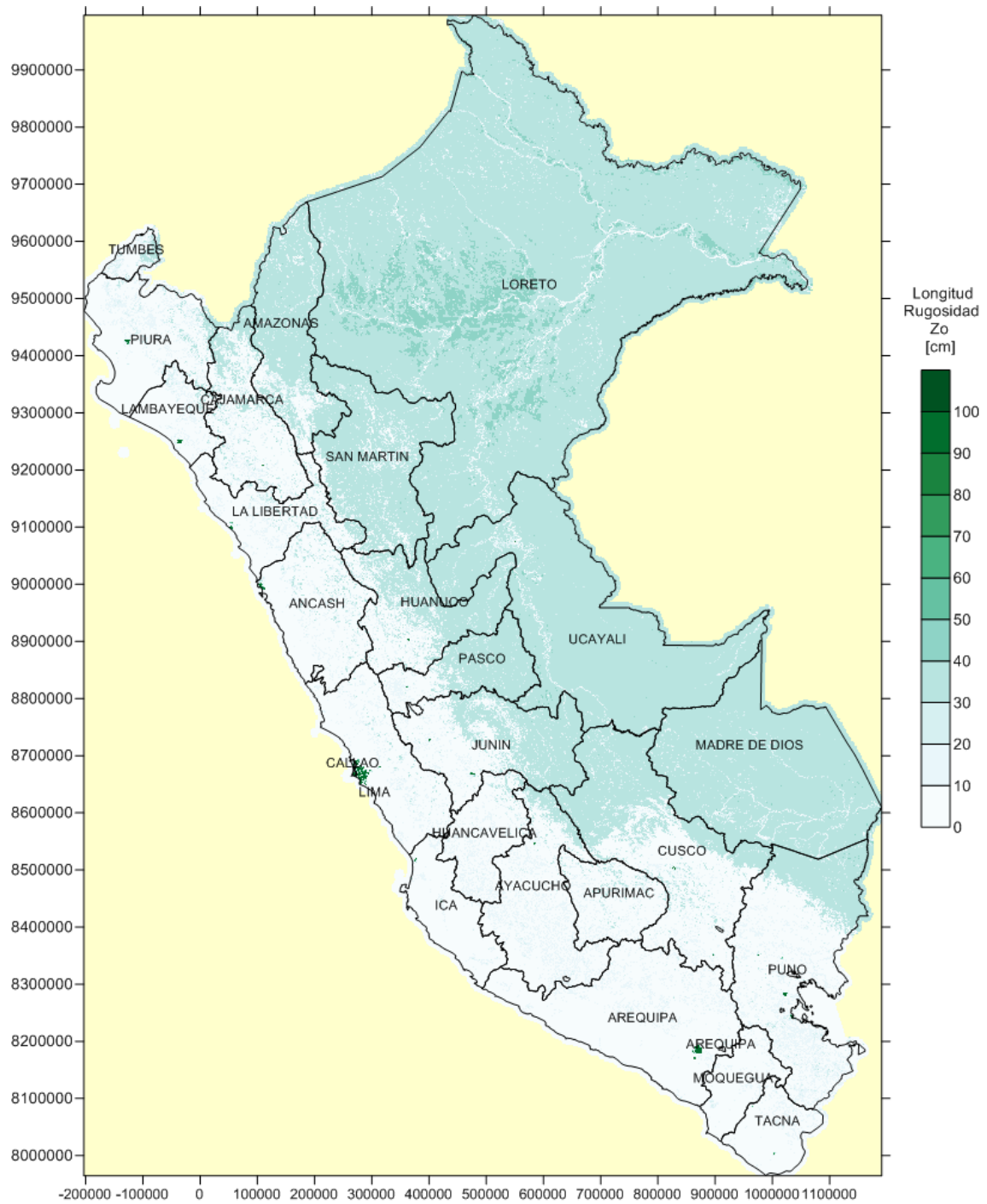
# **MAPAS DEL TERRENO**



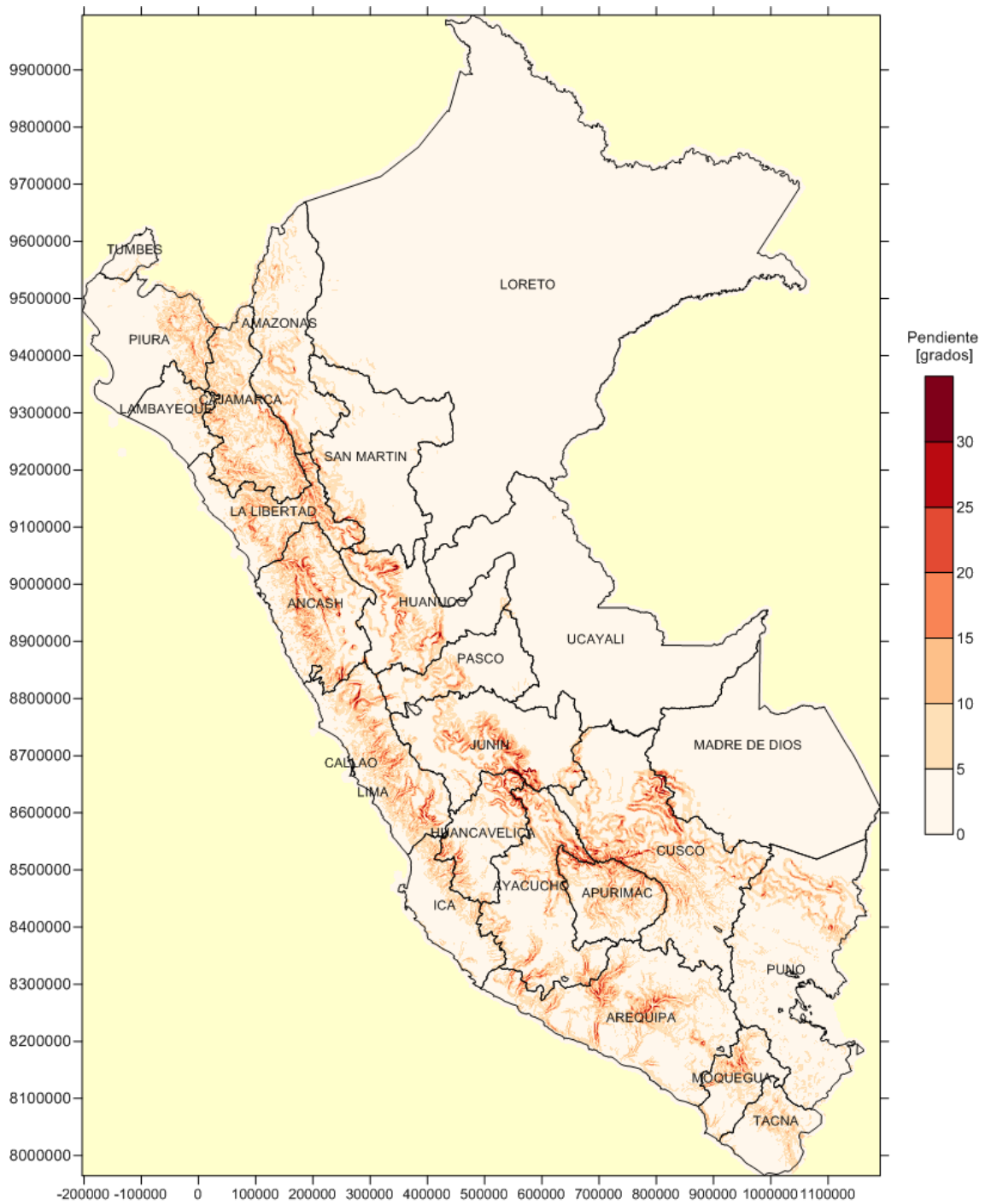
### C.1. TOPOGRAFÍA DEL TERRENO



## C.2. RUGOSIDAD DEL TERRENO

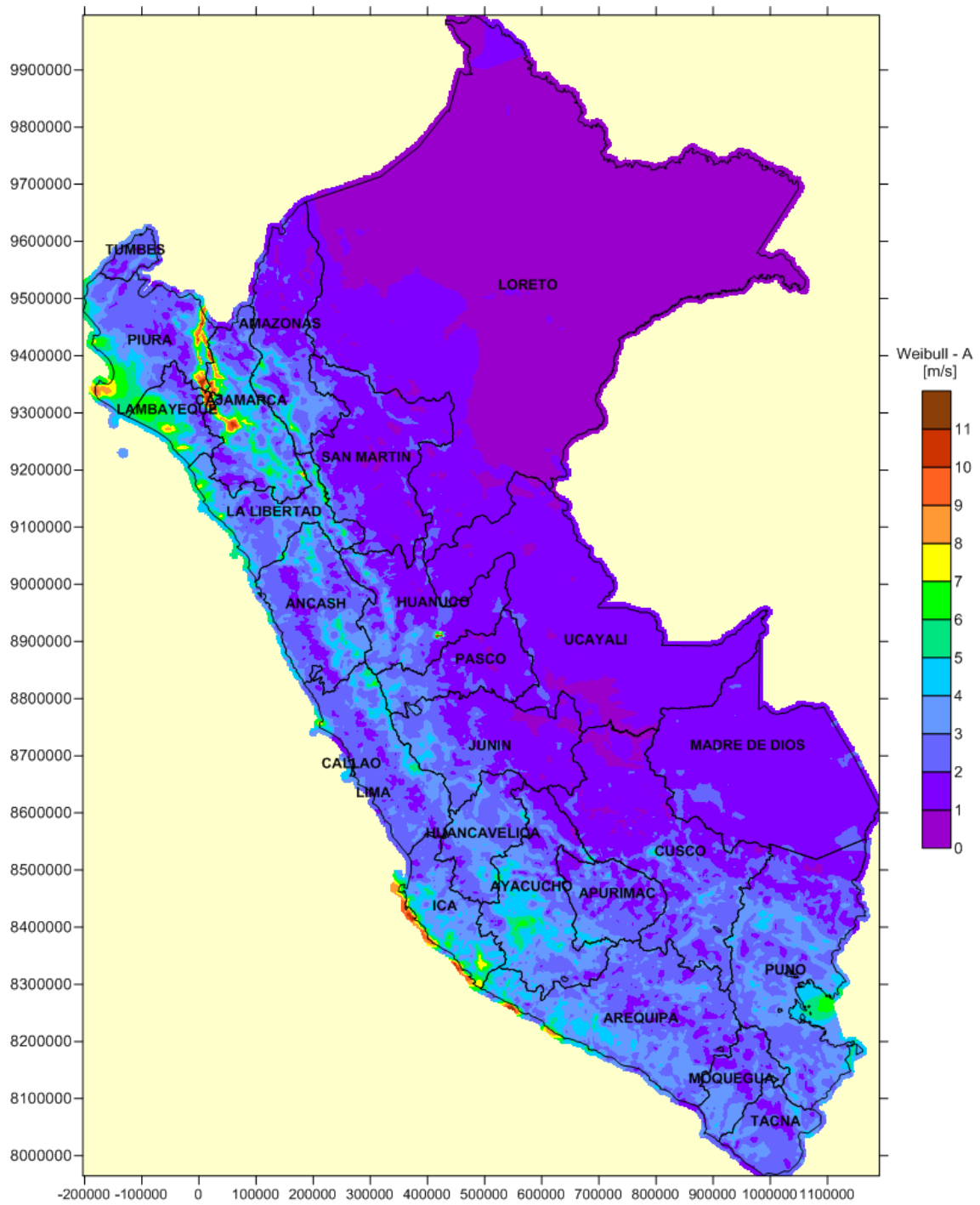


### C.3. PENDIENTE DEL TERRENO

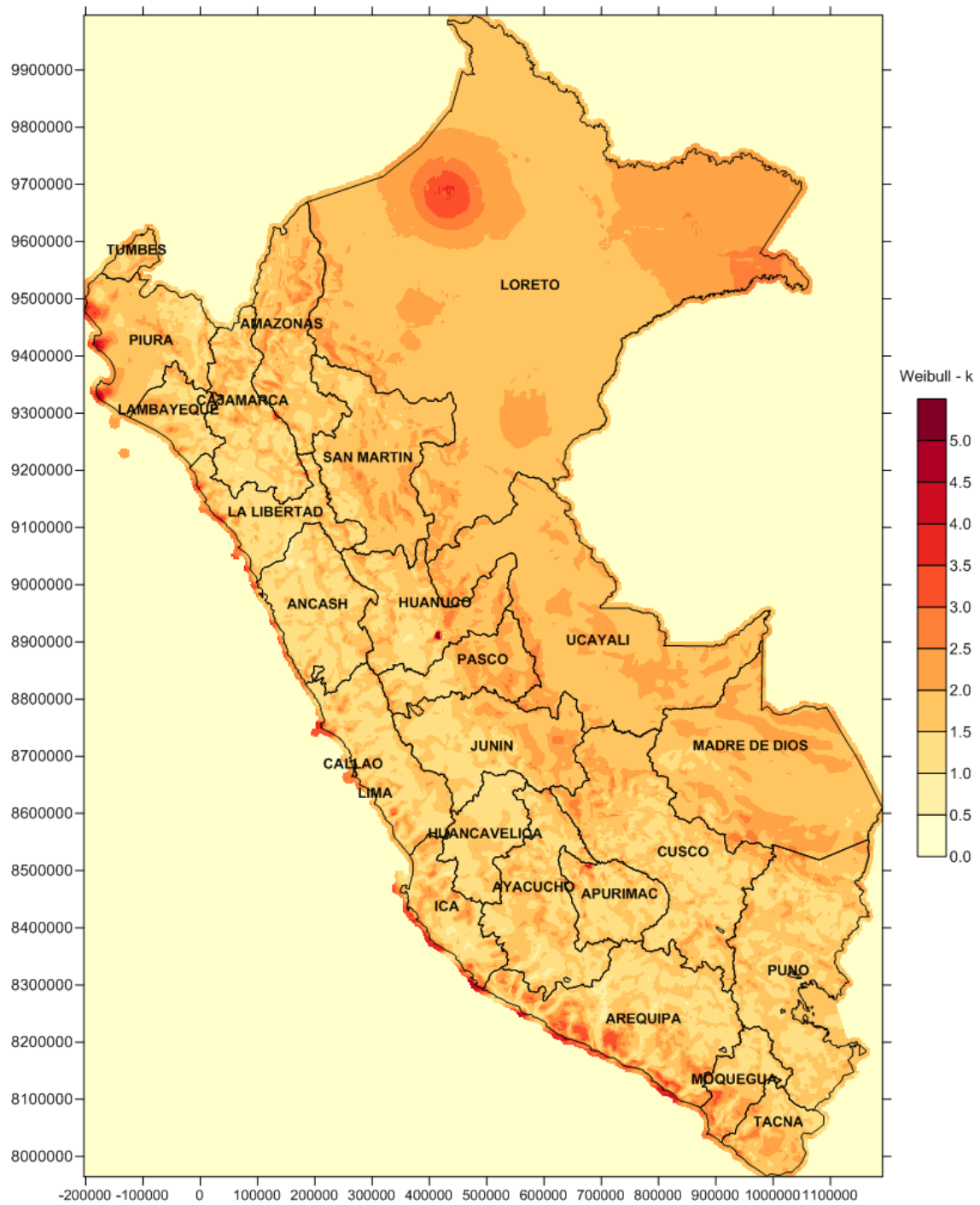


**ANEXO D.**  
**MAPAS DE PARÁMETROS DE**  
**WEIBULL**

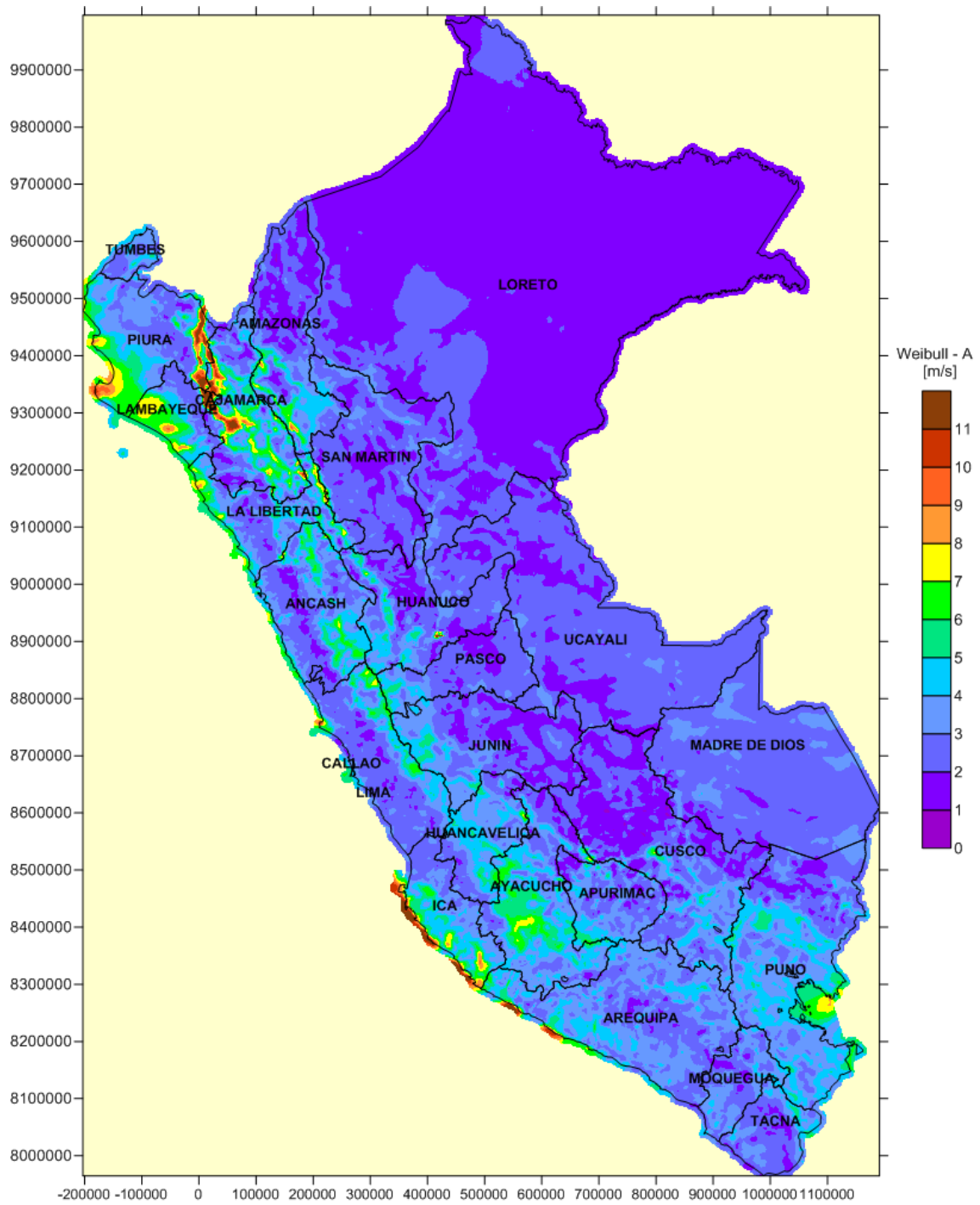
### D.1. FACTOR DE ESCALA DE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL A 10 m



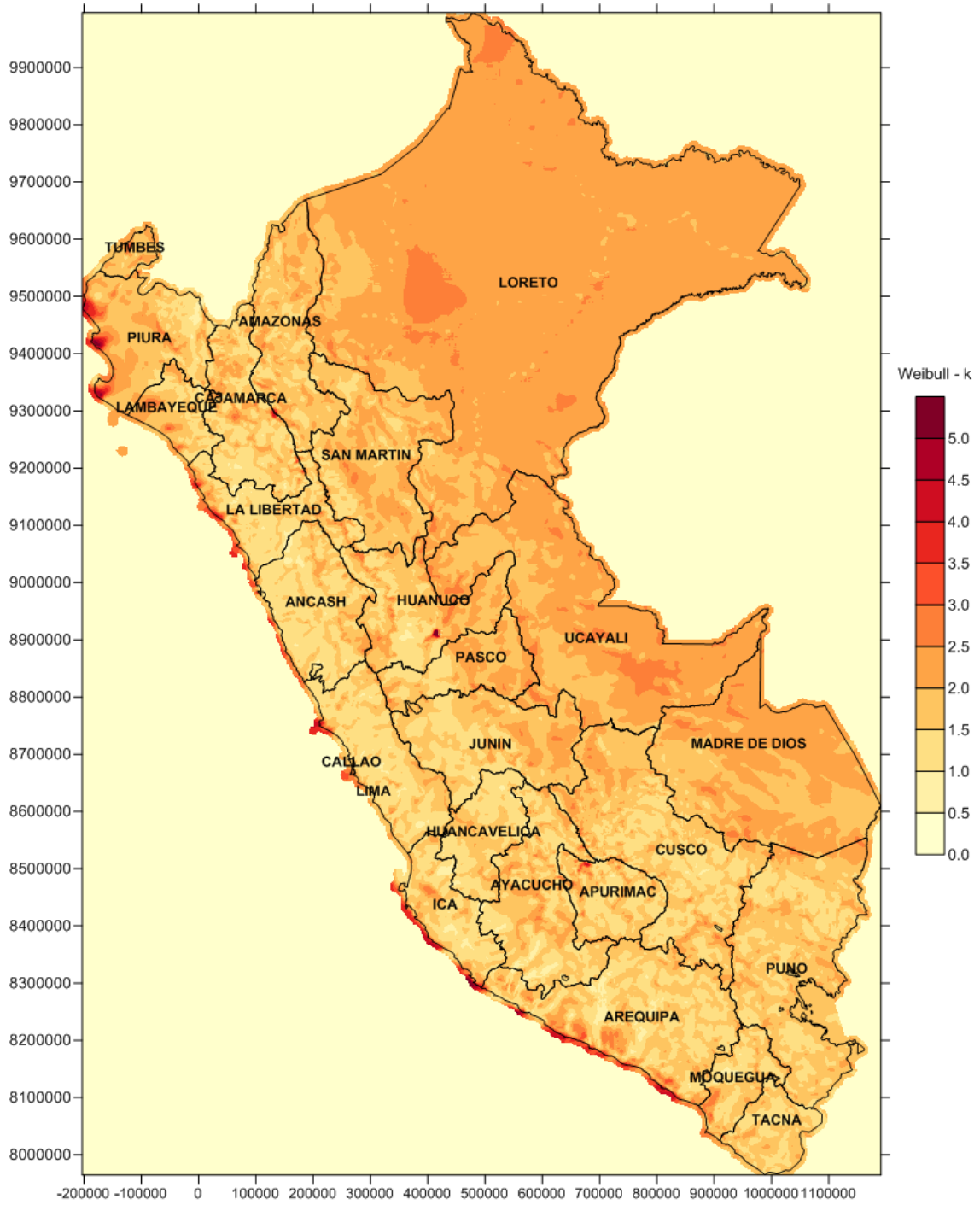
## D.2. FACTOR DE FORMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL A 10 m



### D.3. FACTOR DE ESCALA DE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL A 25 m

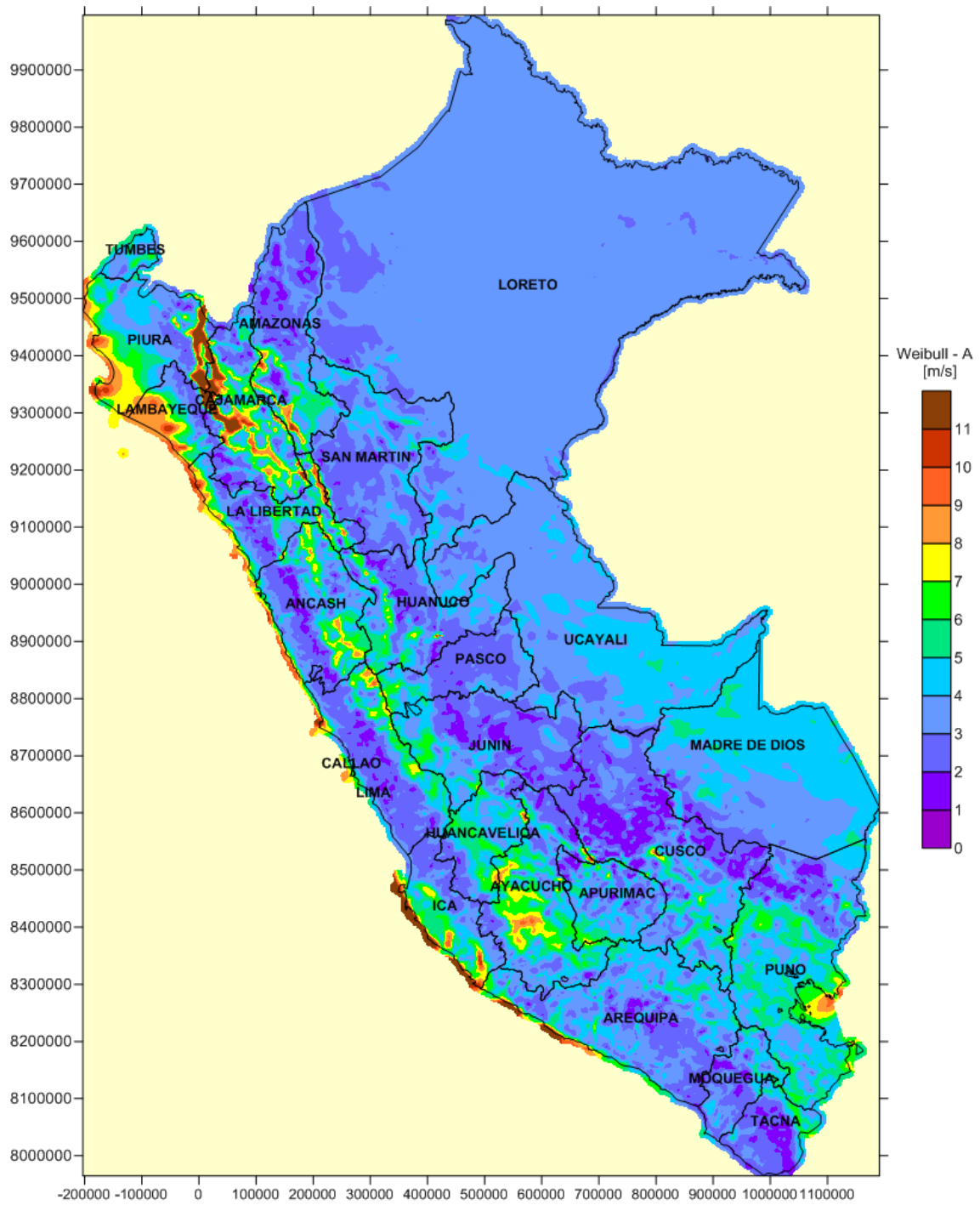


D.4. FACTOR DE FORMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL A 25 m

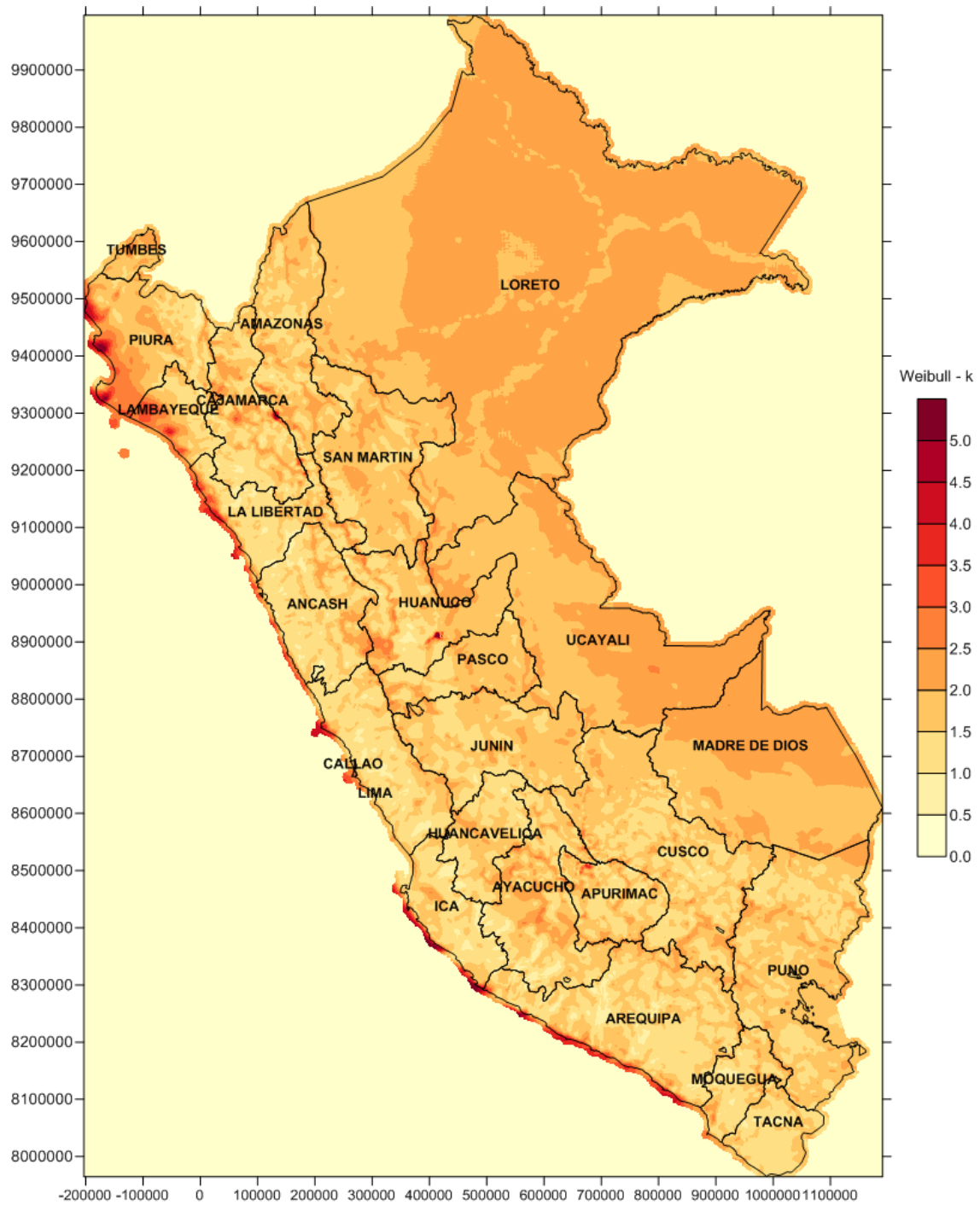




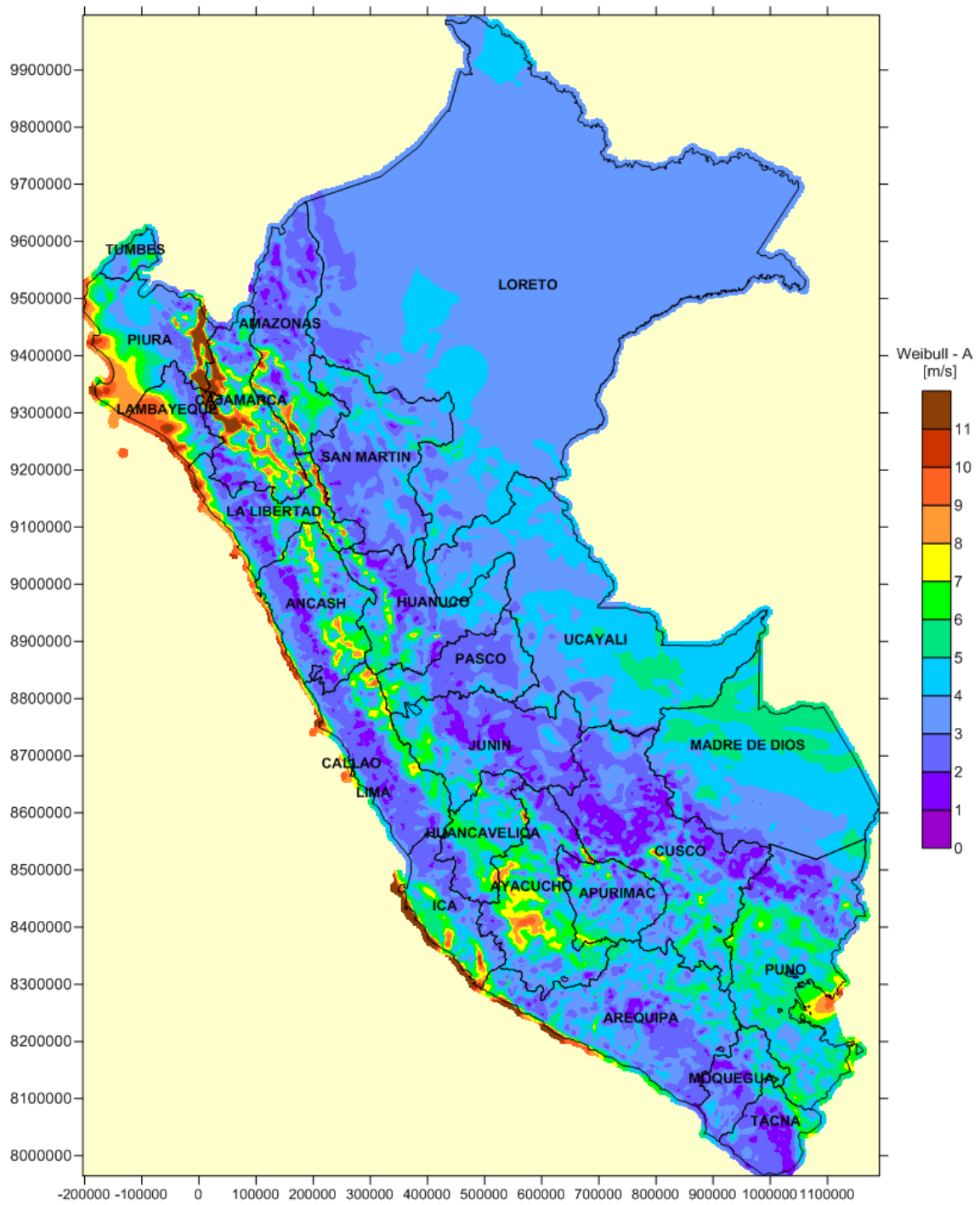
D.5. FACTOR DE ESCALA DE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL A 75 m



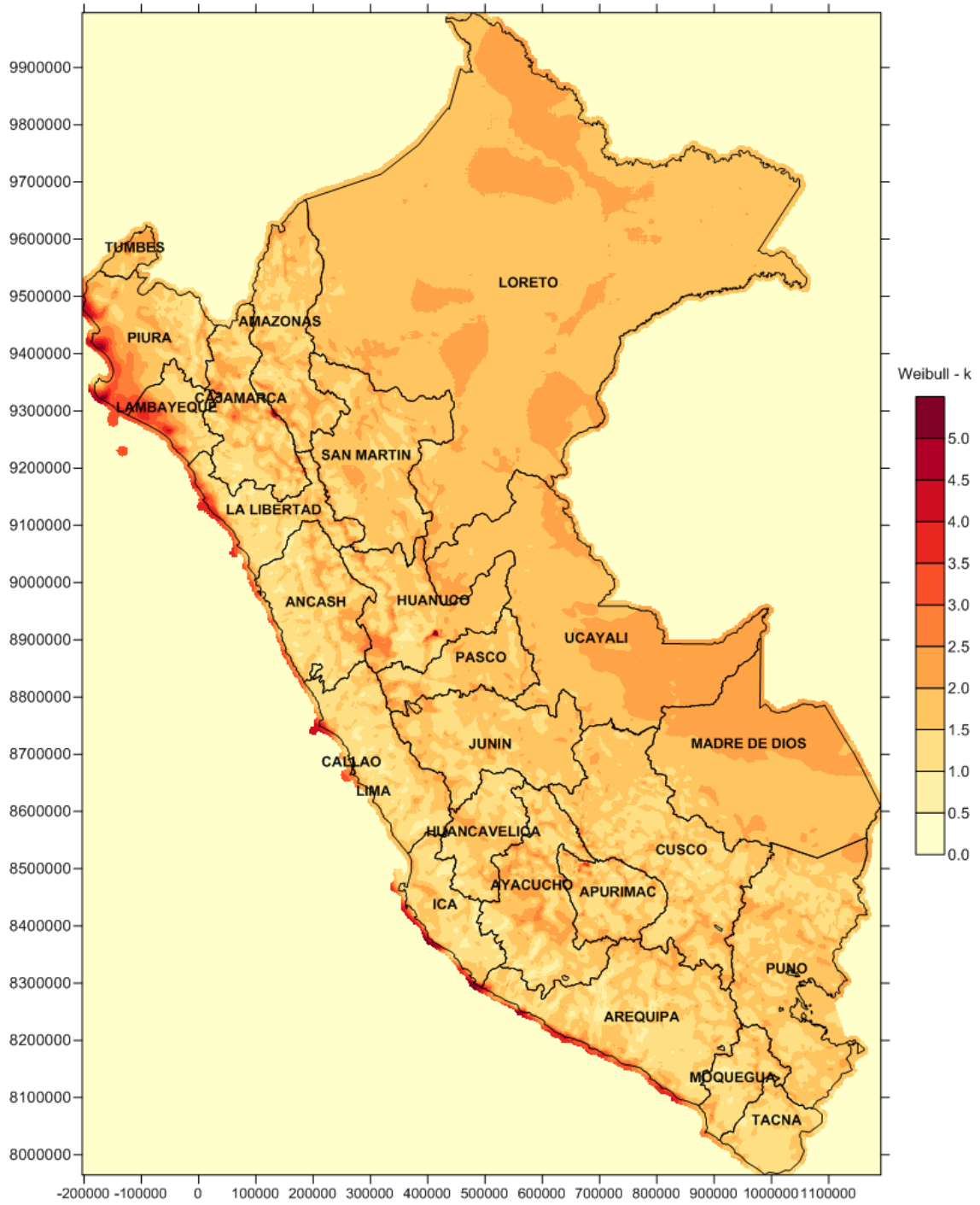
D.6. FACTOR DE FORMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL A 75 m



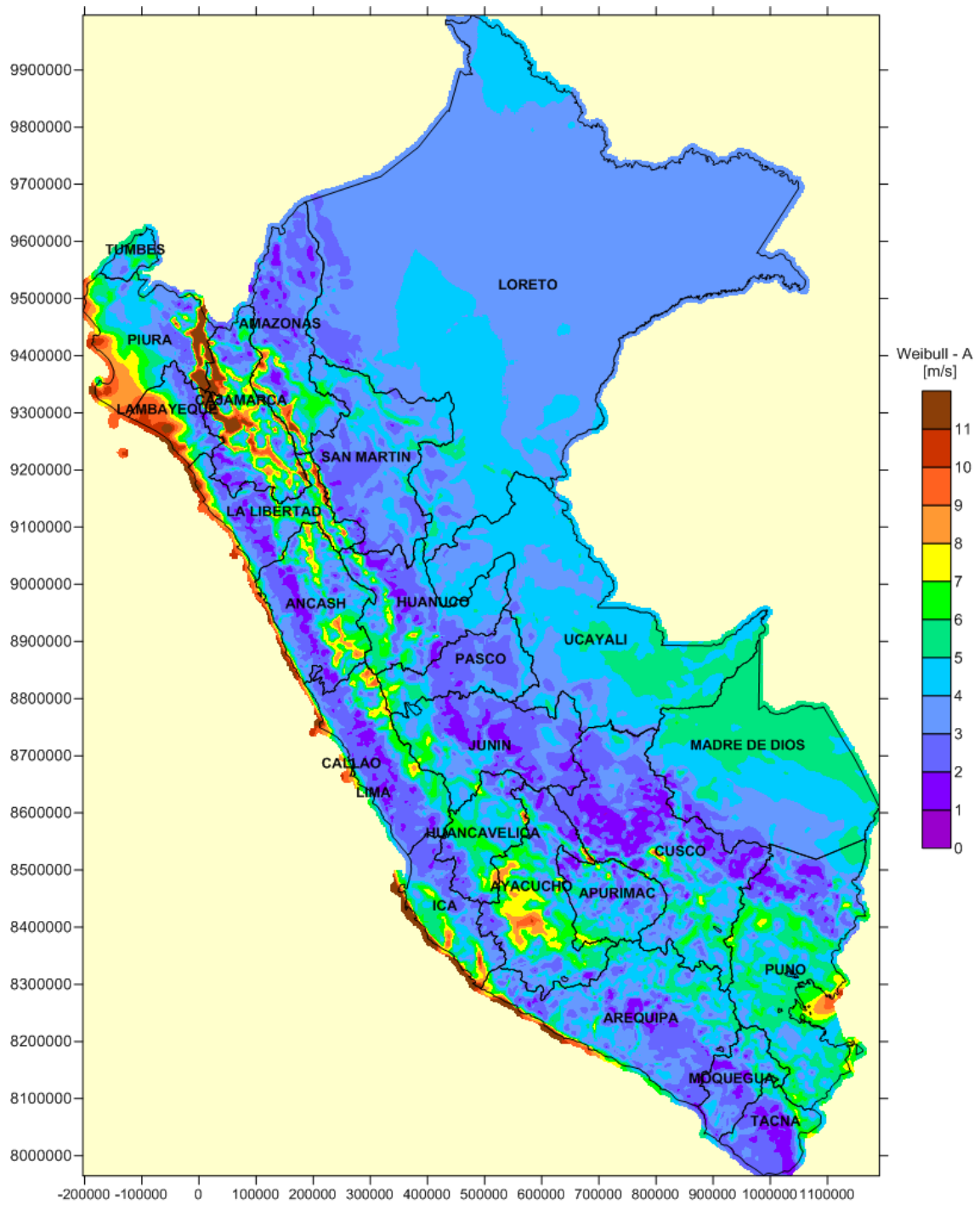
### D.7. FACTOR DE ESCALA DE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL A 100 m



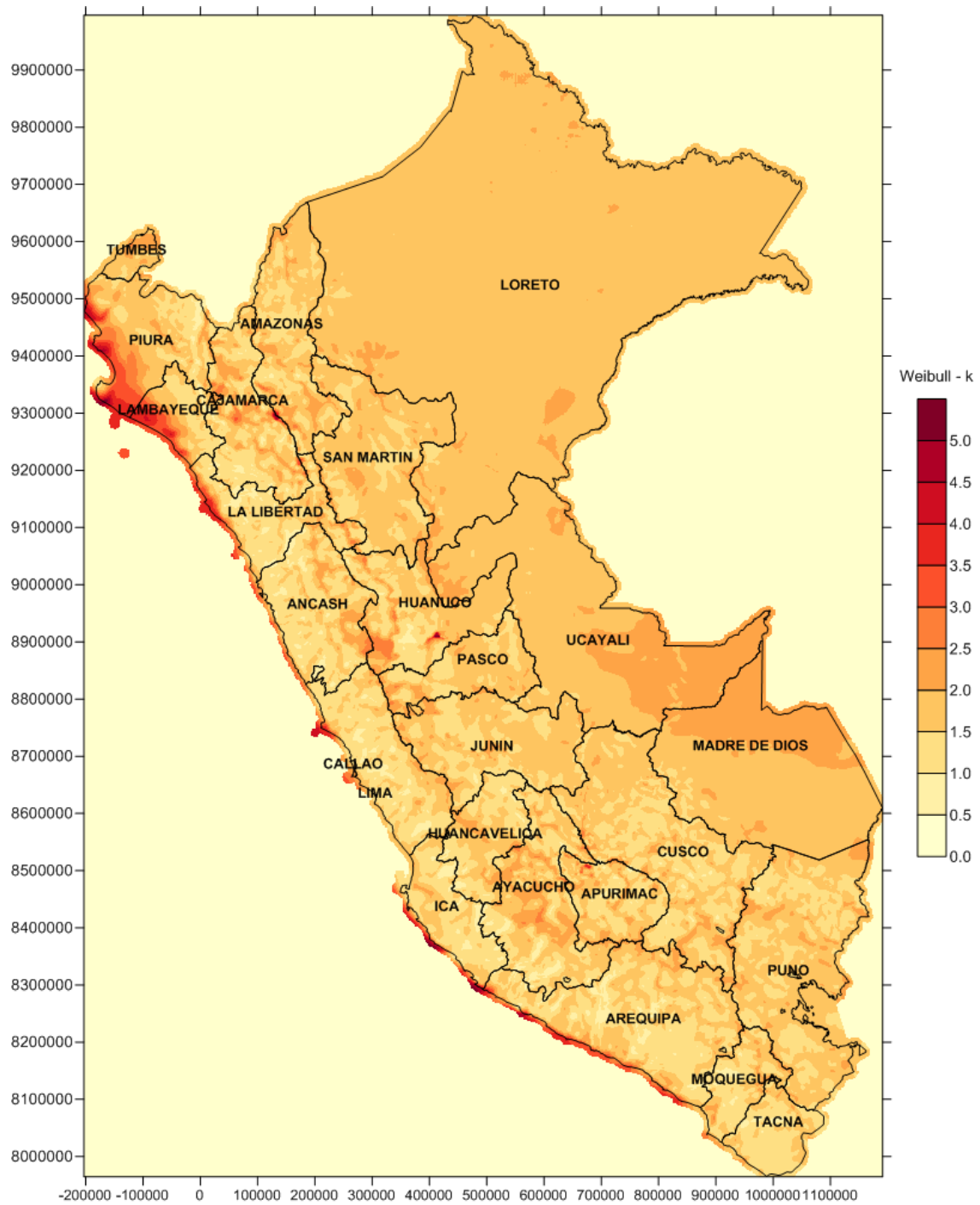
D.8. FACTOR DE FORMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL A 100 m



D.9. FACTOR DE ESCALA DE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL A 125 m

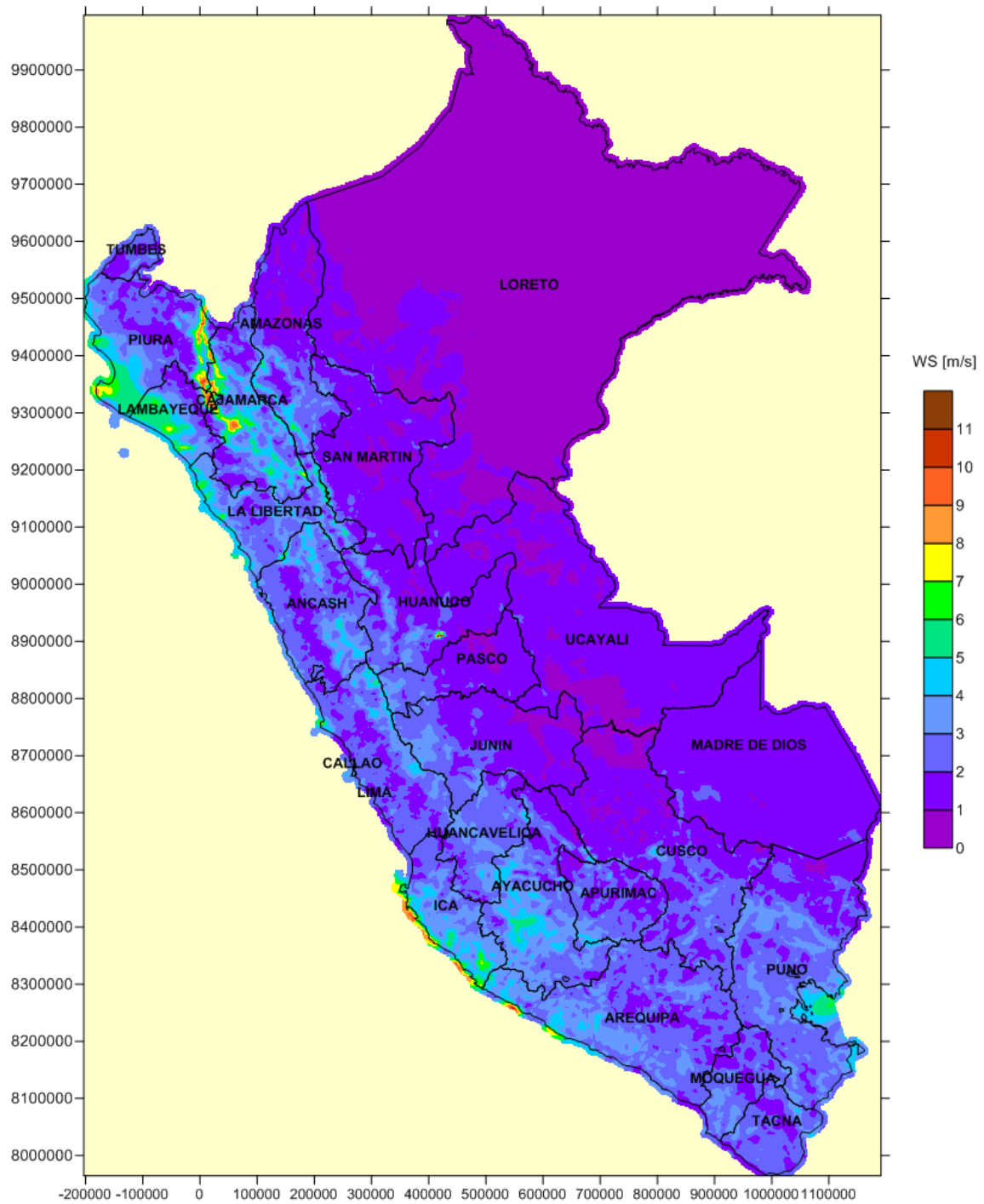


D.10. FACTOR DE FORMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL A 125 m



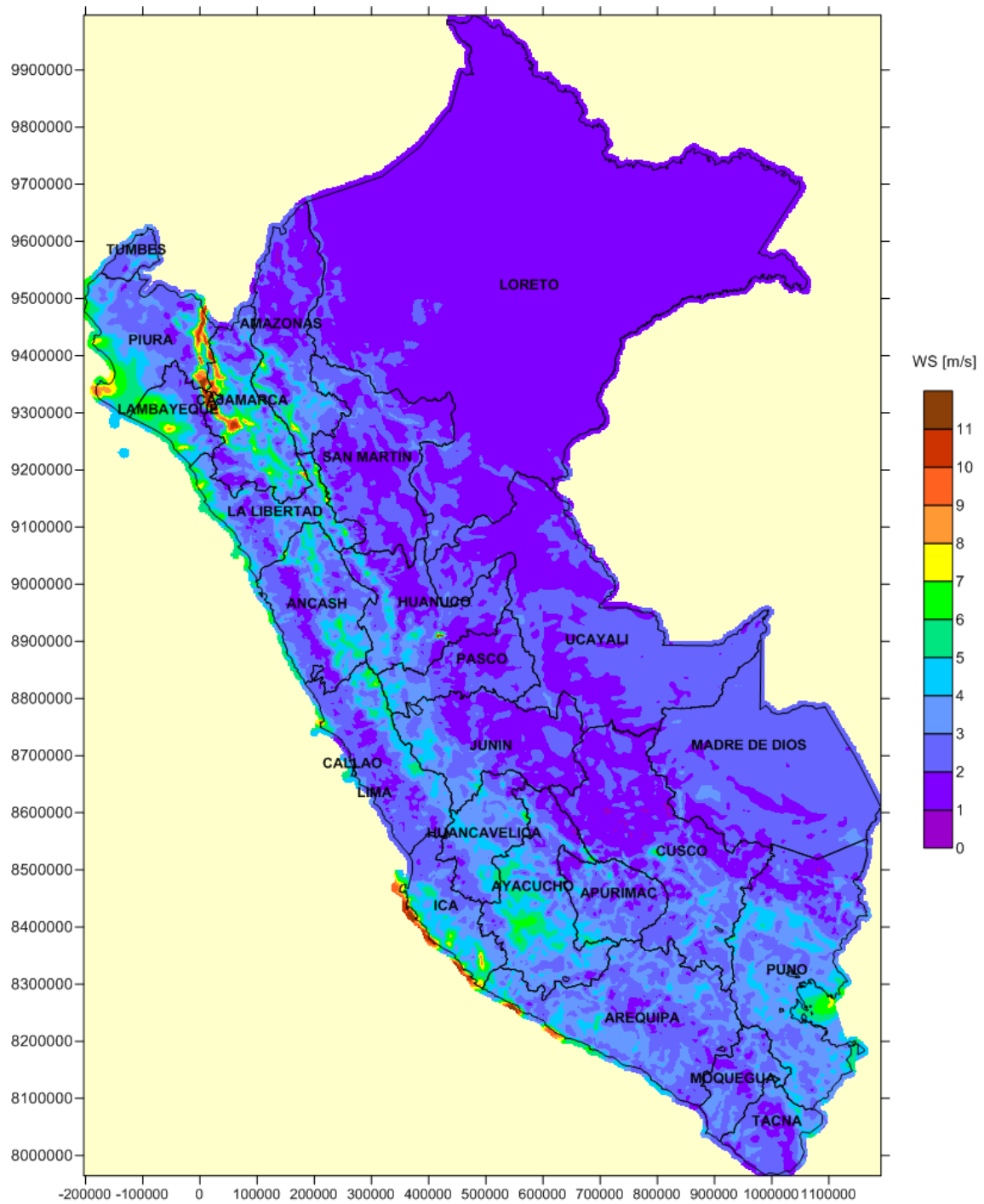
**ANEXO E.**  
**MAPAS DE POTENCIAL EÓLICO**  
**ANUALES**

E.1. VELOCIDAD MEDIA ANUAL DEL VIENTO A 10 m

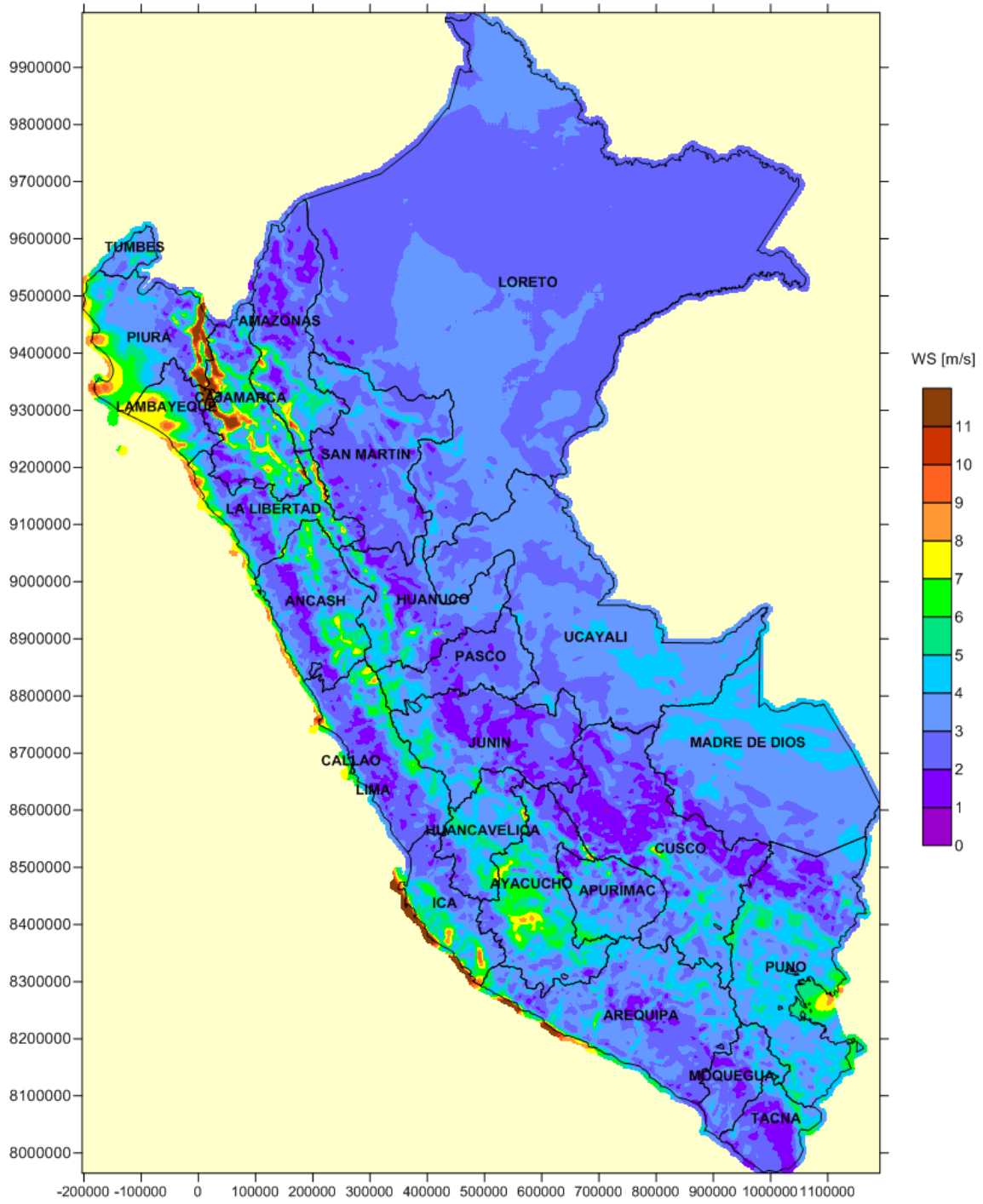




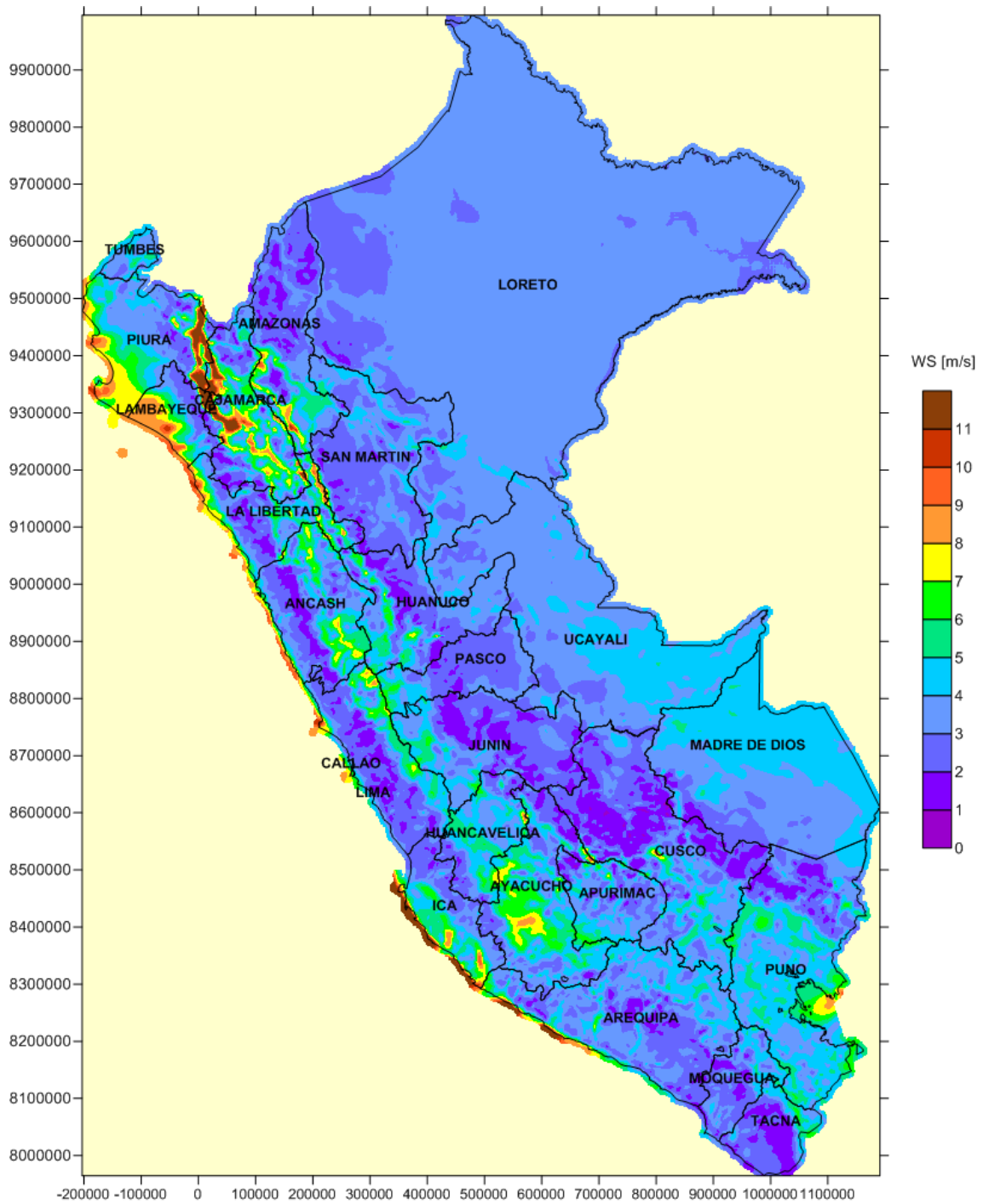
## E.2. VELOCIDAD MEDIA ANUAL DEL VIENTO A 25 m



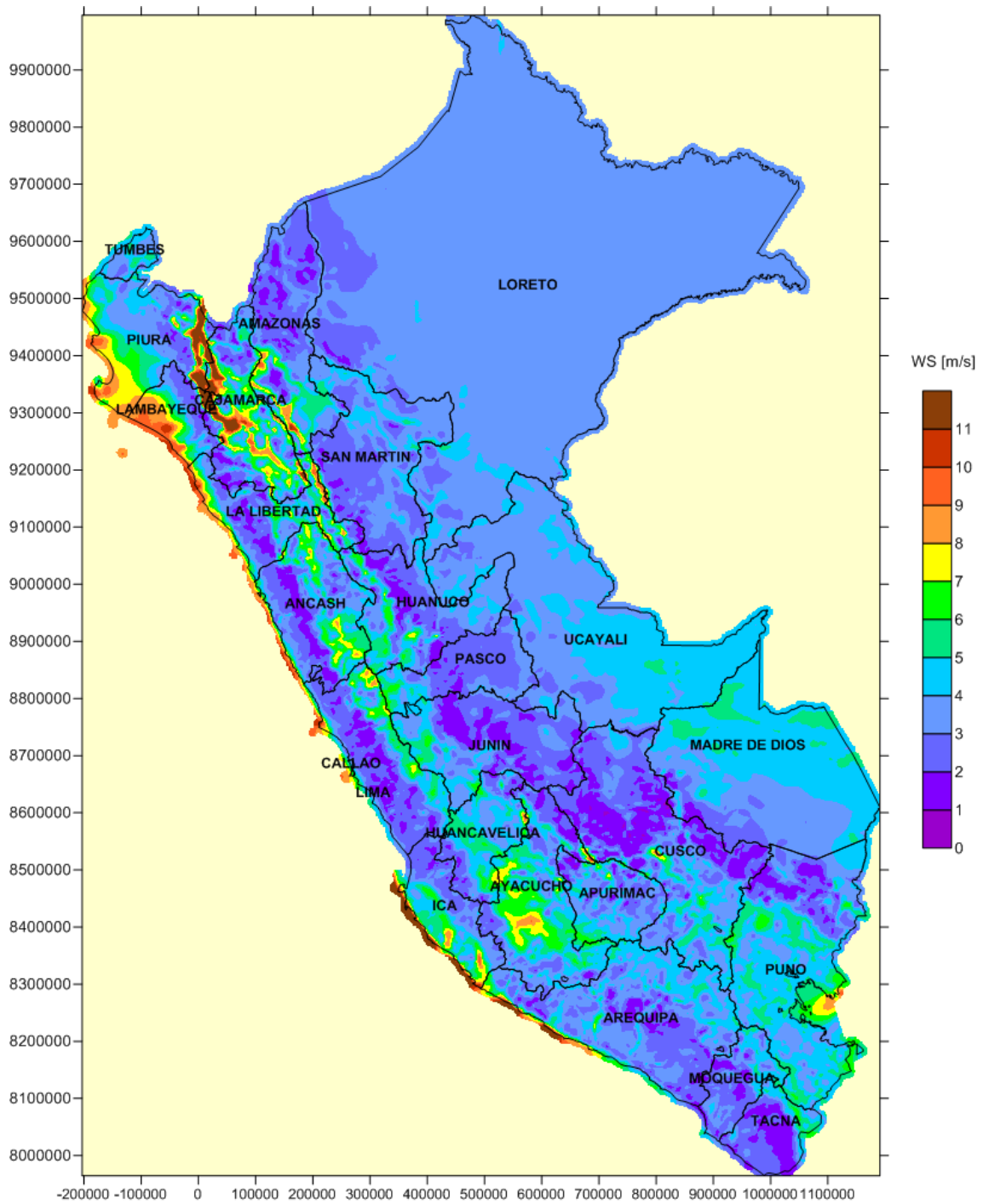
### E.3. VELOCIDAD MEDIA ANUAL DEL VIENTO A 75 m



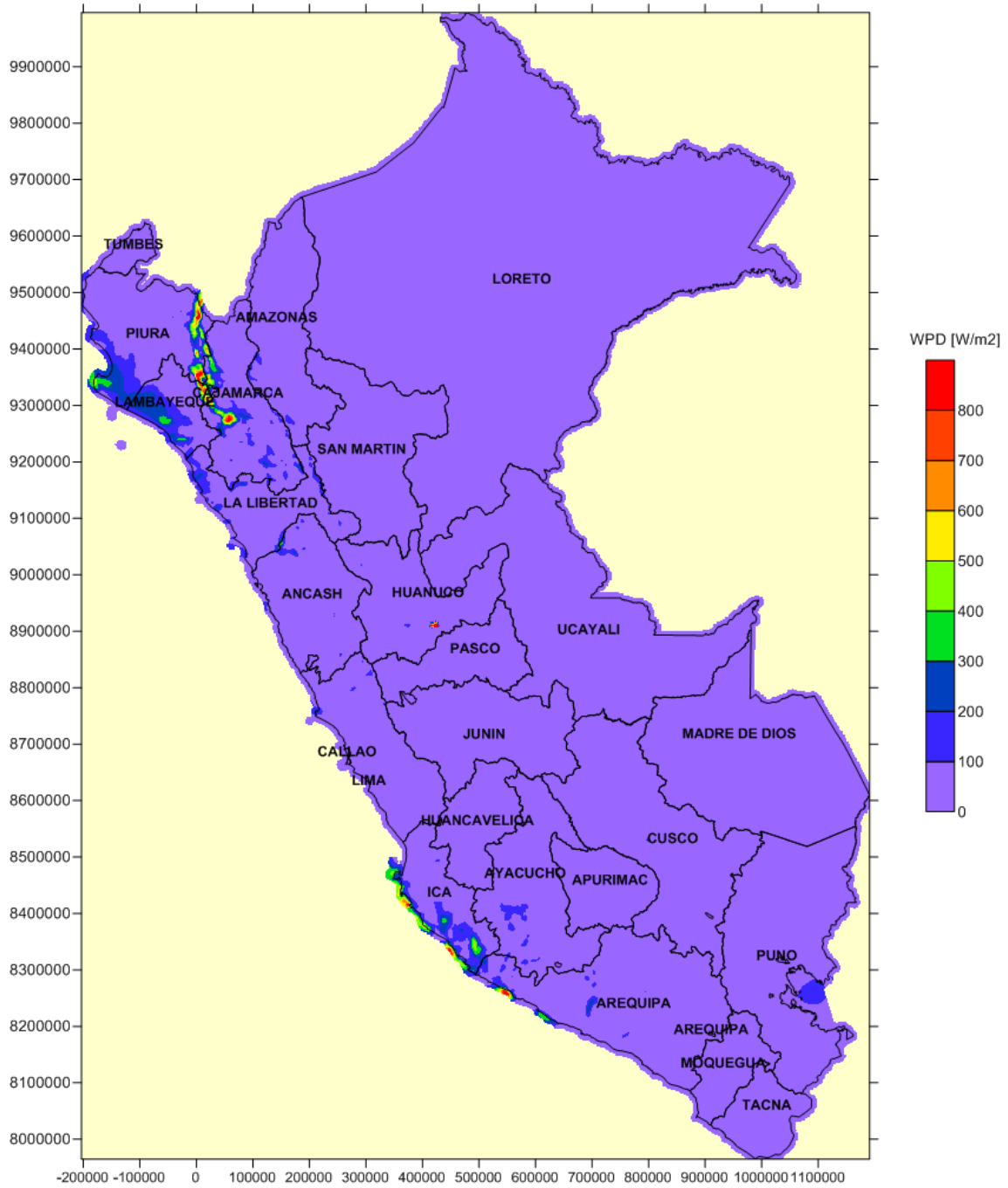
#### E.4. VELOCIDAD MEDIA ANUAL DEL VIENTO A 100 m



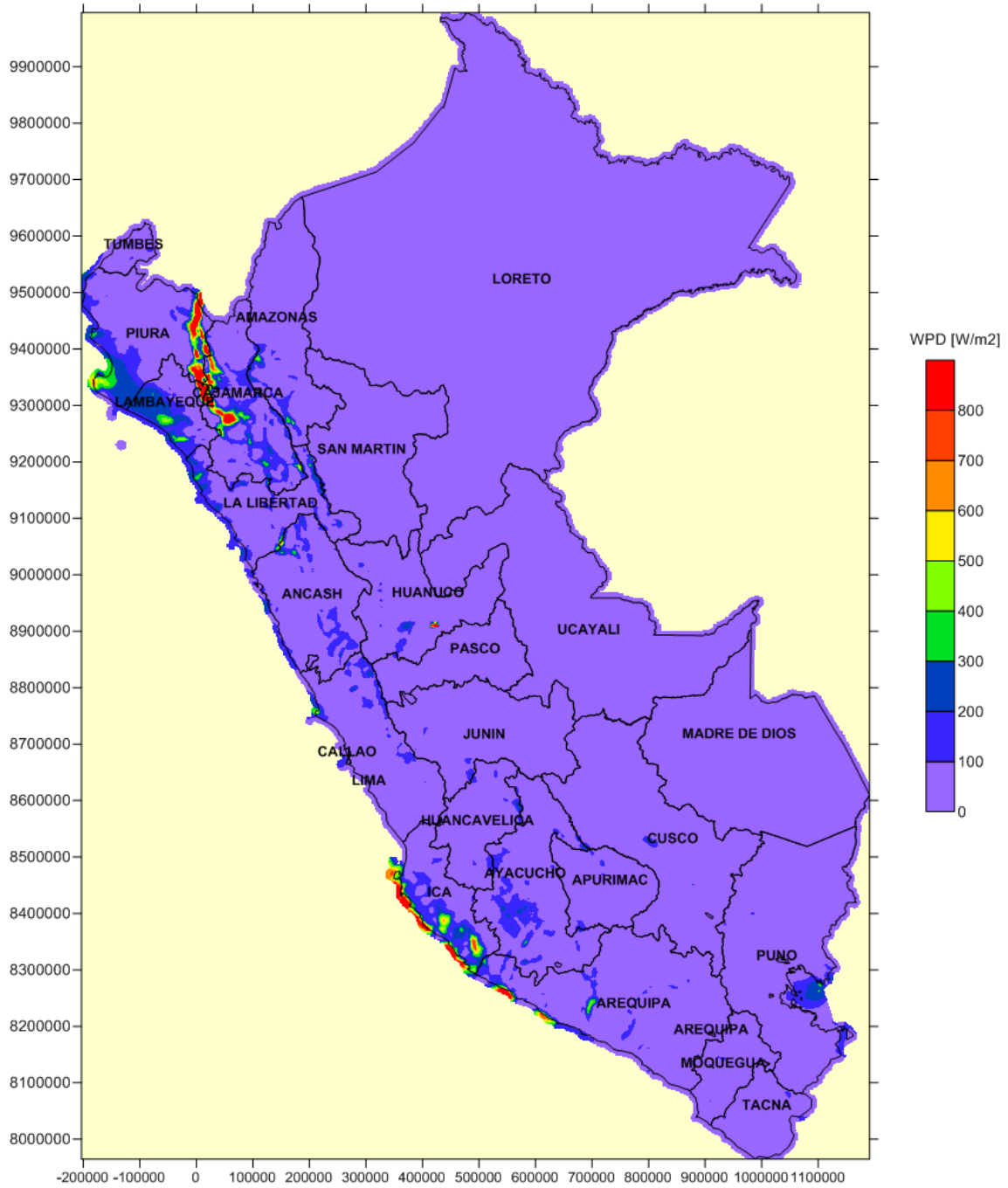
### E.5. VELOCIDAD MEDIA ANUAL DEL VIENTO A 125 m



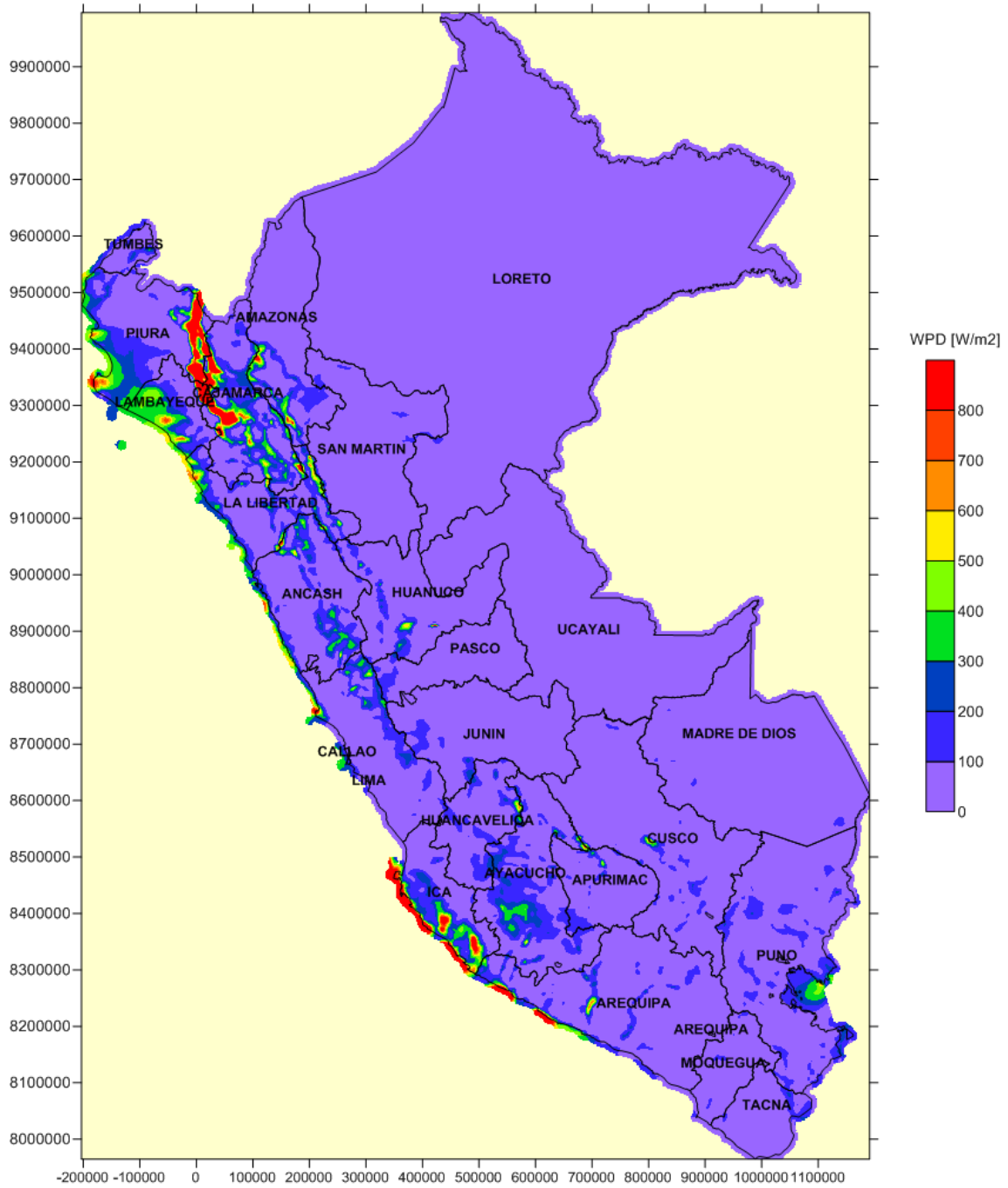
E.6. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA ANUAL DEL VIENTO A 10 m



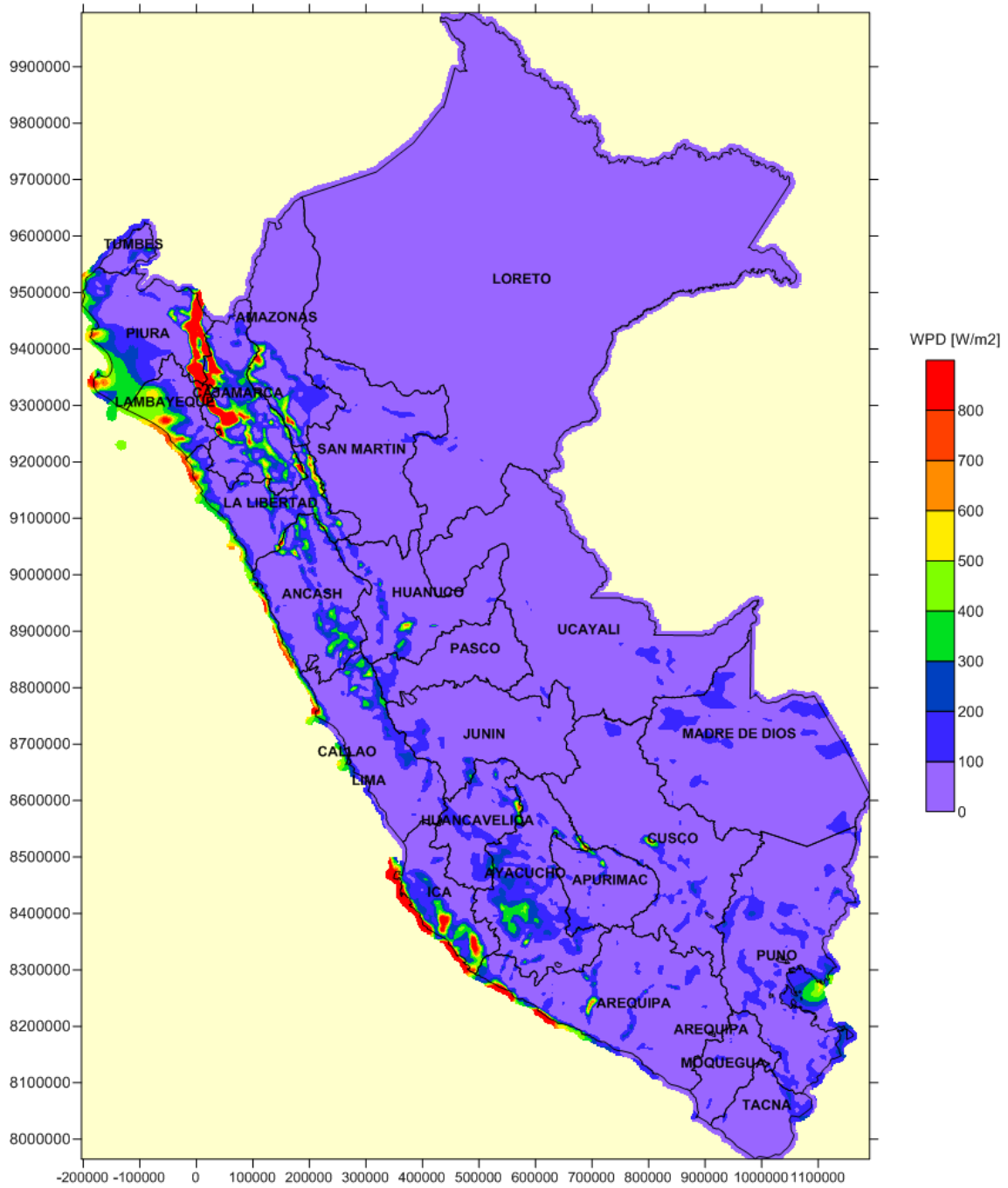
E.7. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA ANUAL DEL VIENTO A 25 m



E.8. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA ANUAL DEL VIENTO A 75 m

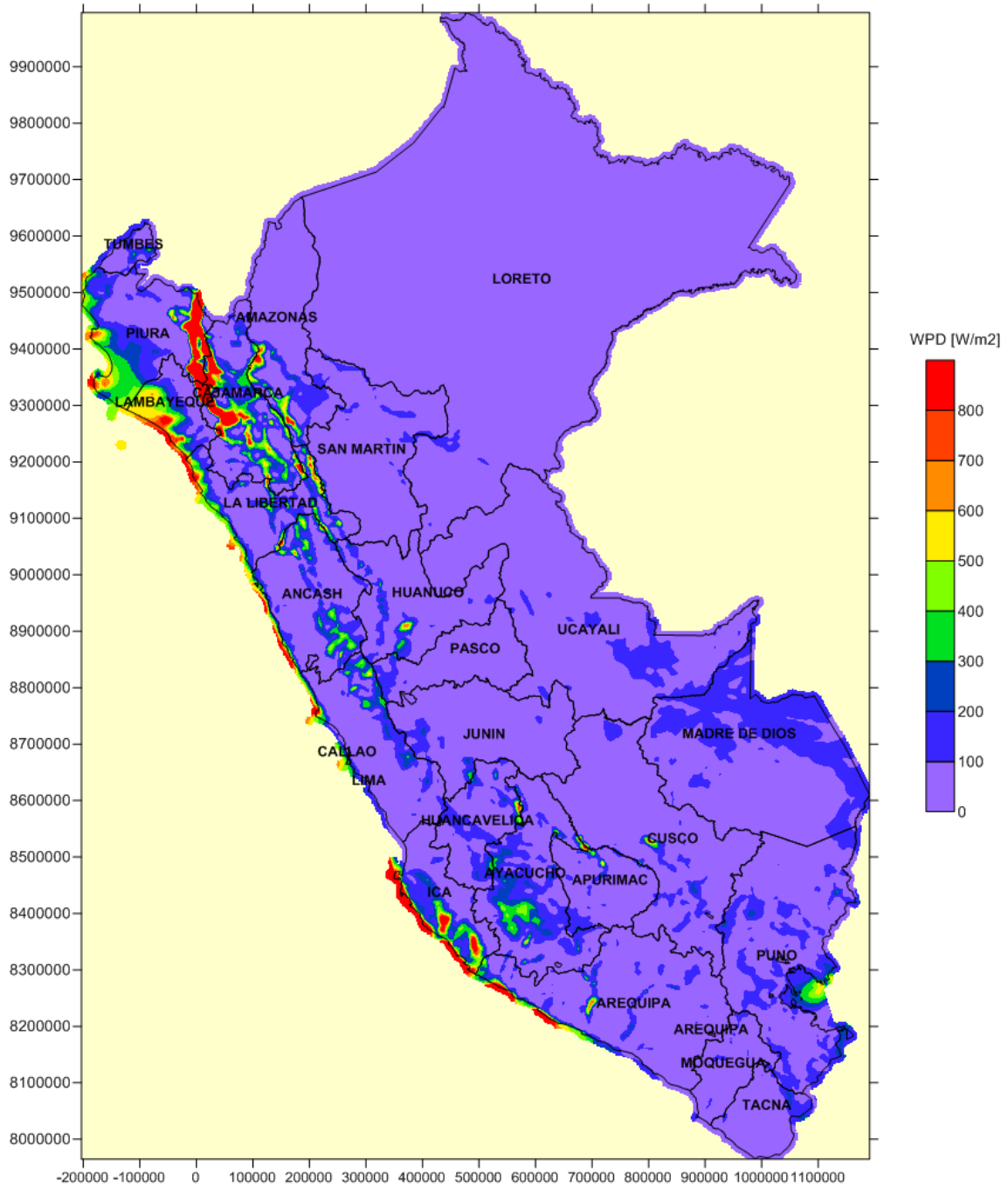


E.9. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA ANUAL DEL VIENTO A 100 m



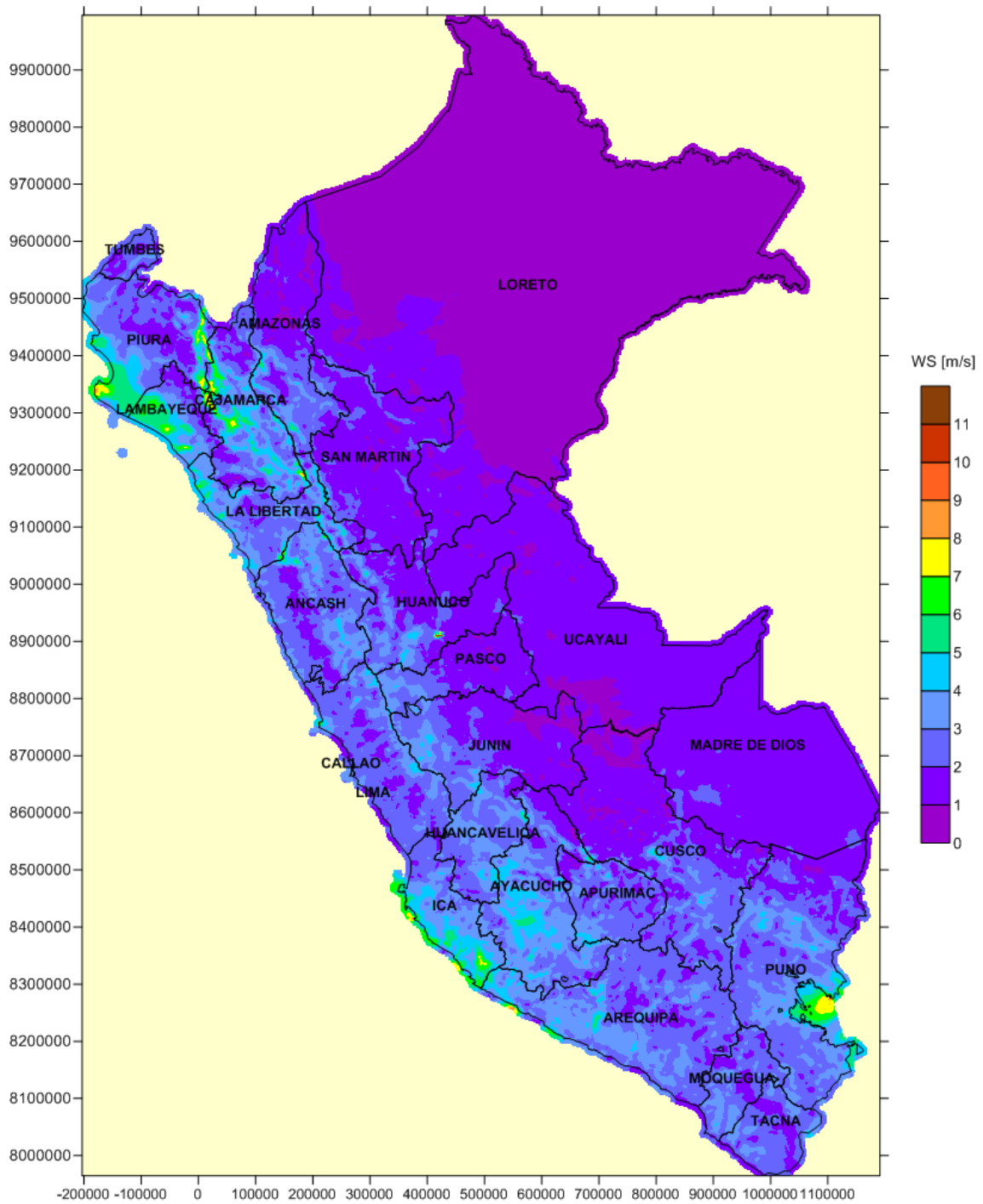


E.10. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA ANUAL DEL VIENTO A 125 m

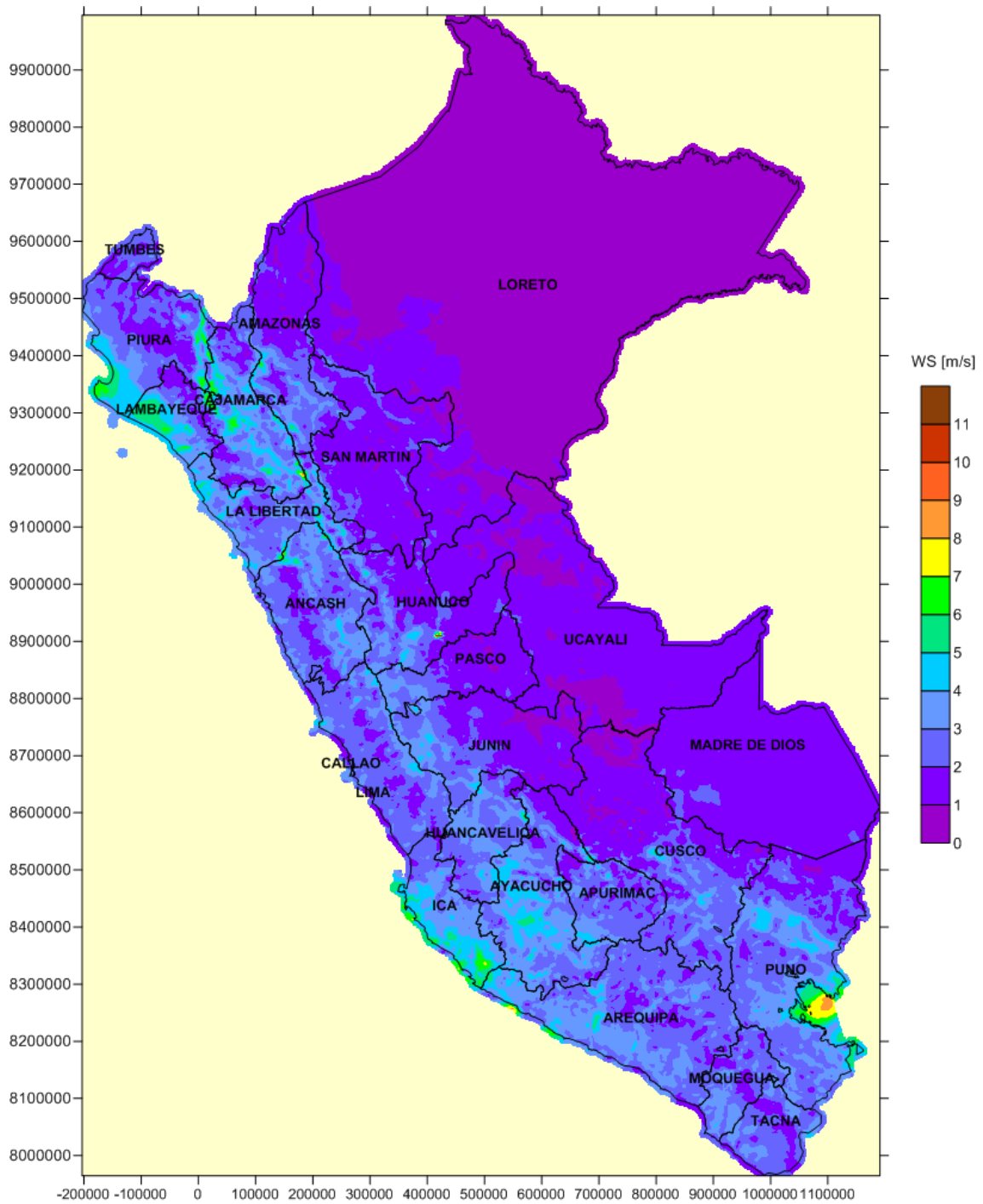


**ANEXO F.**  
**MAPAS DE POTENCIAL EÓLICO**  
**MENSUALES (10m)**

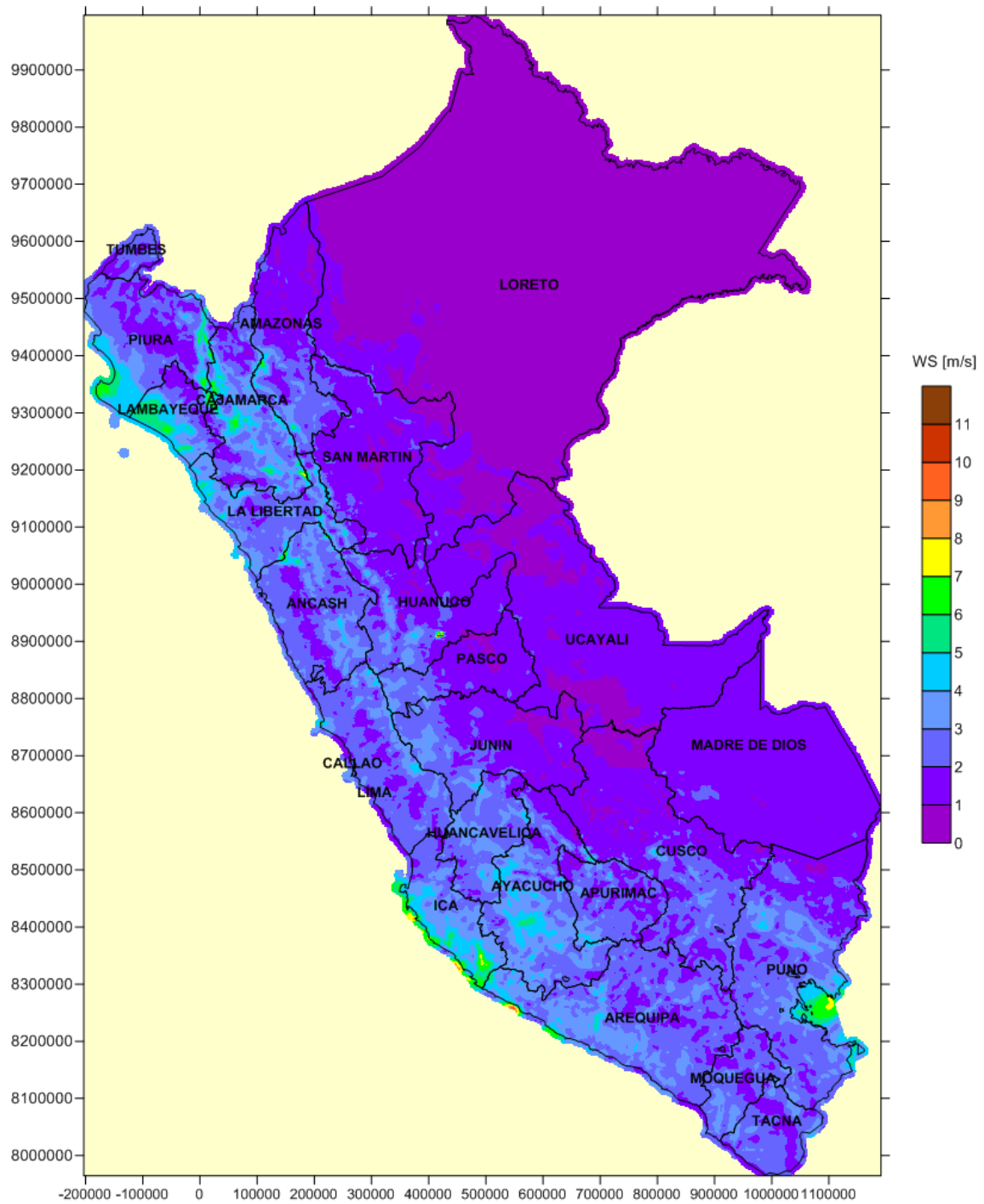
F.1. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN ENERO A 10 m



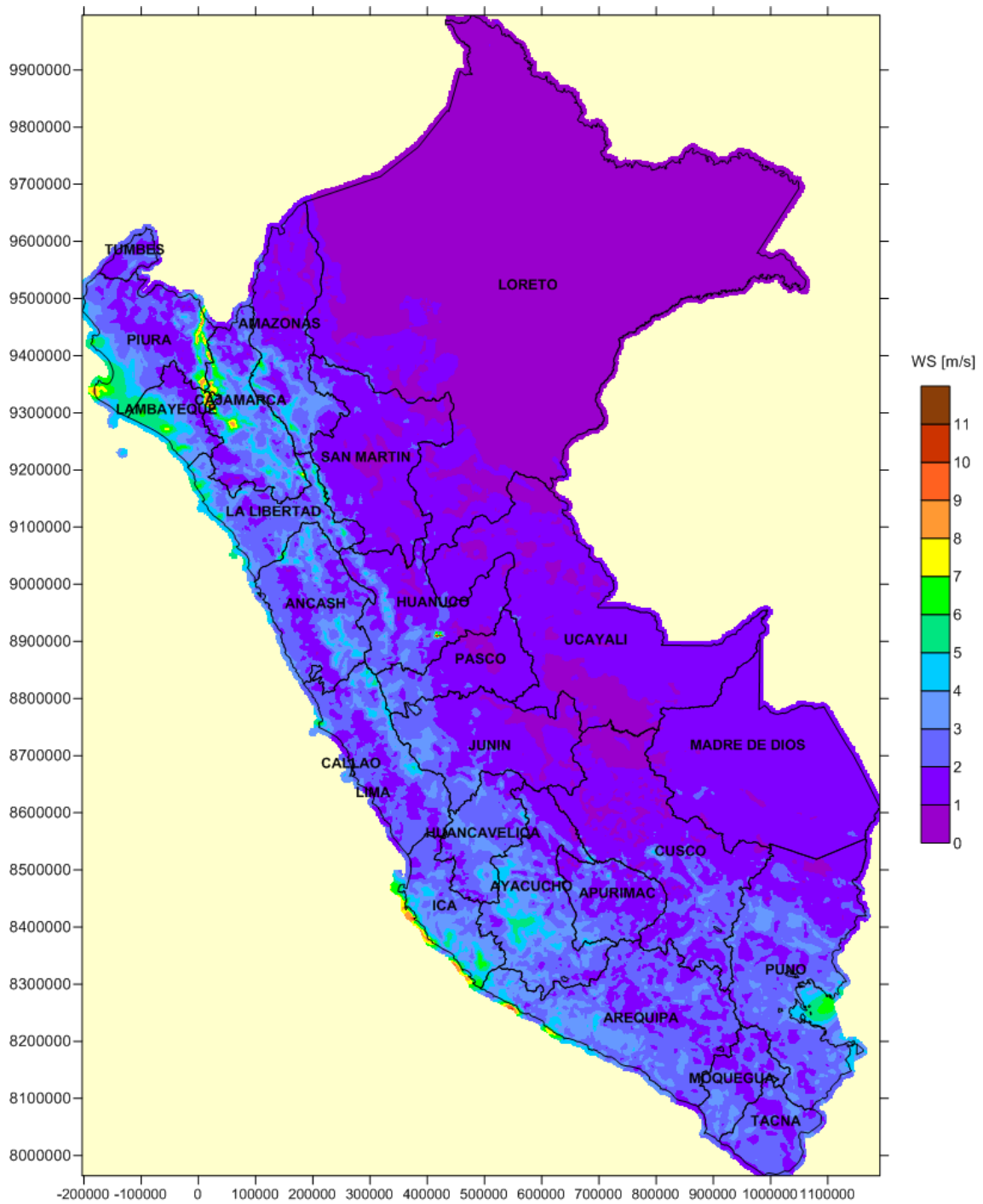
F.2. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN FEBRERO A 10 m



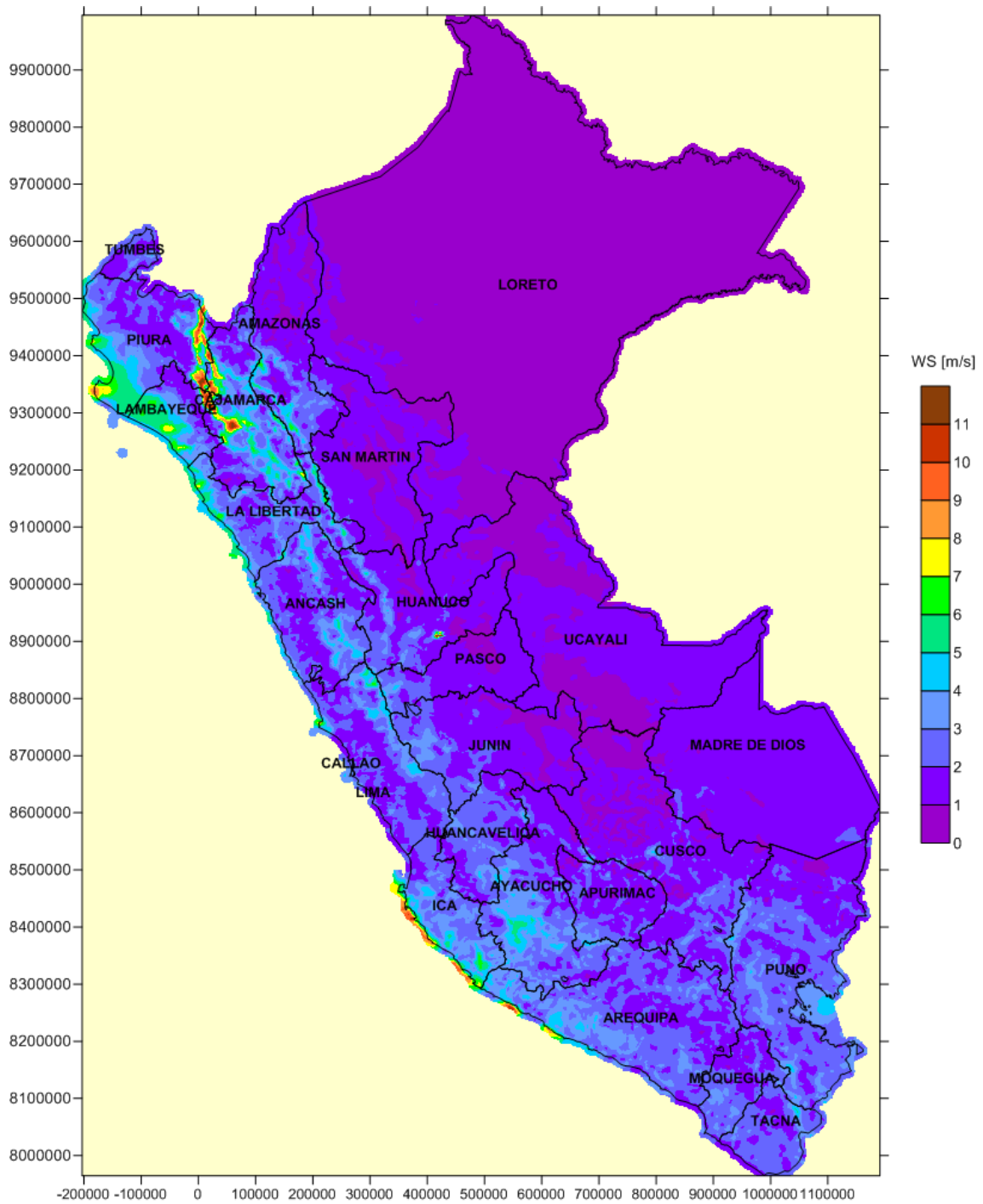
F.3. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN MARZO A 10 m



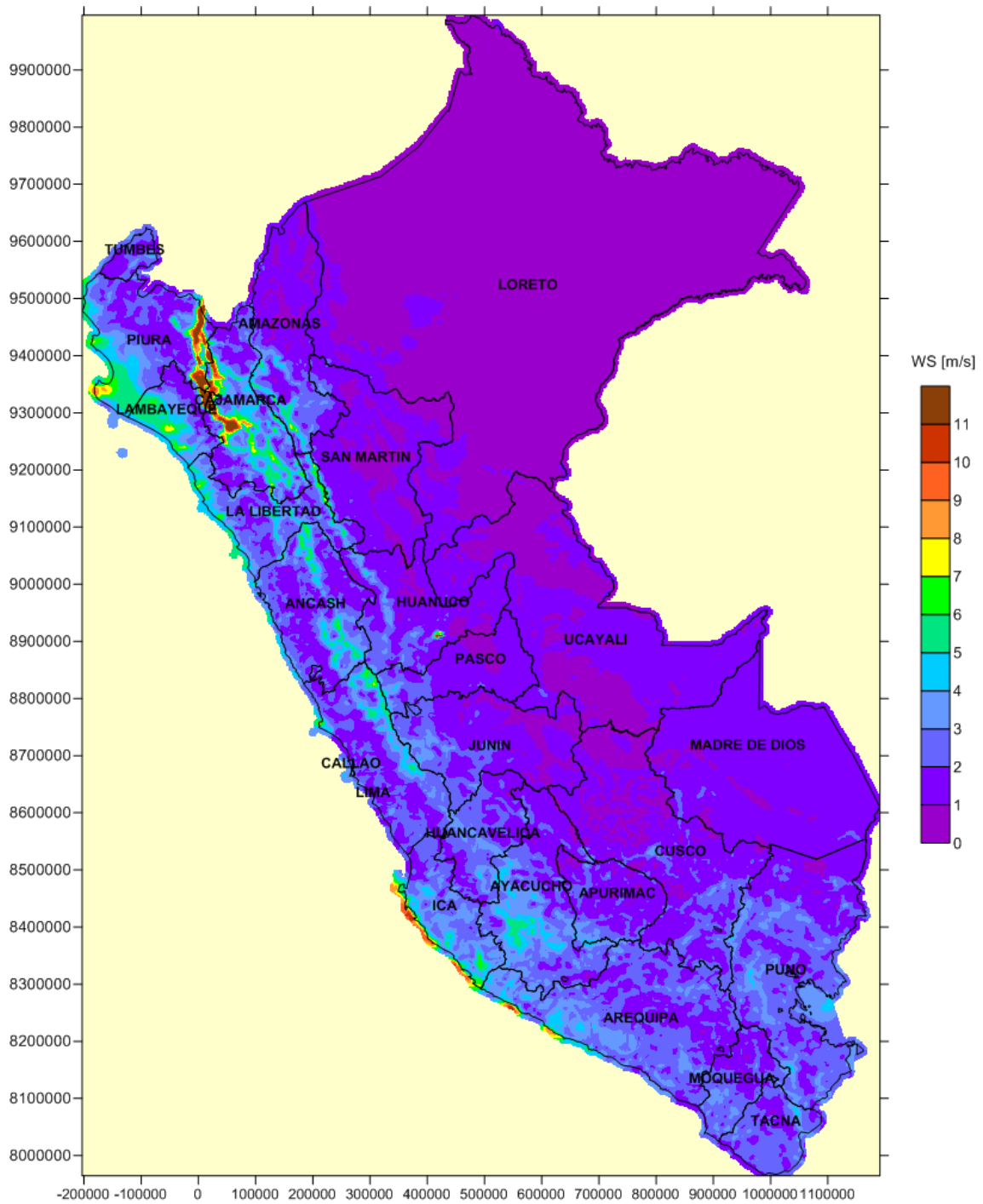
F.4. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN ABRIL A 10 m



F.5. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN MAYO A 10 m

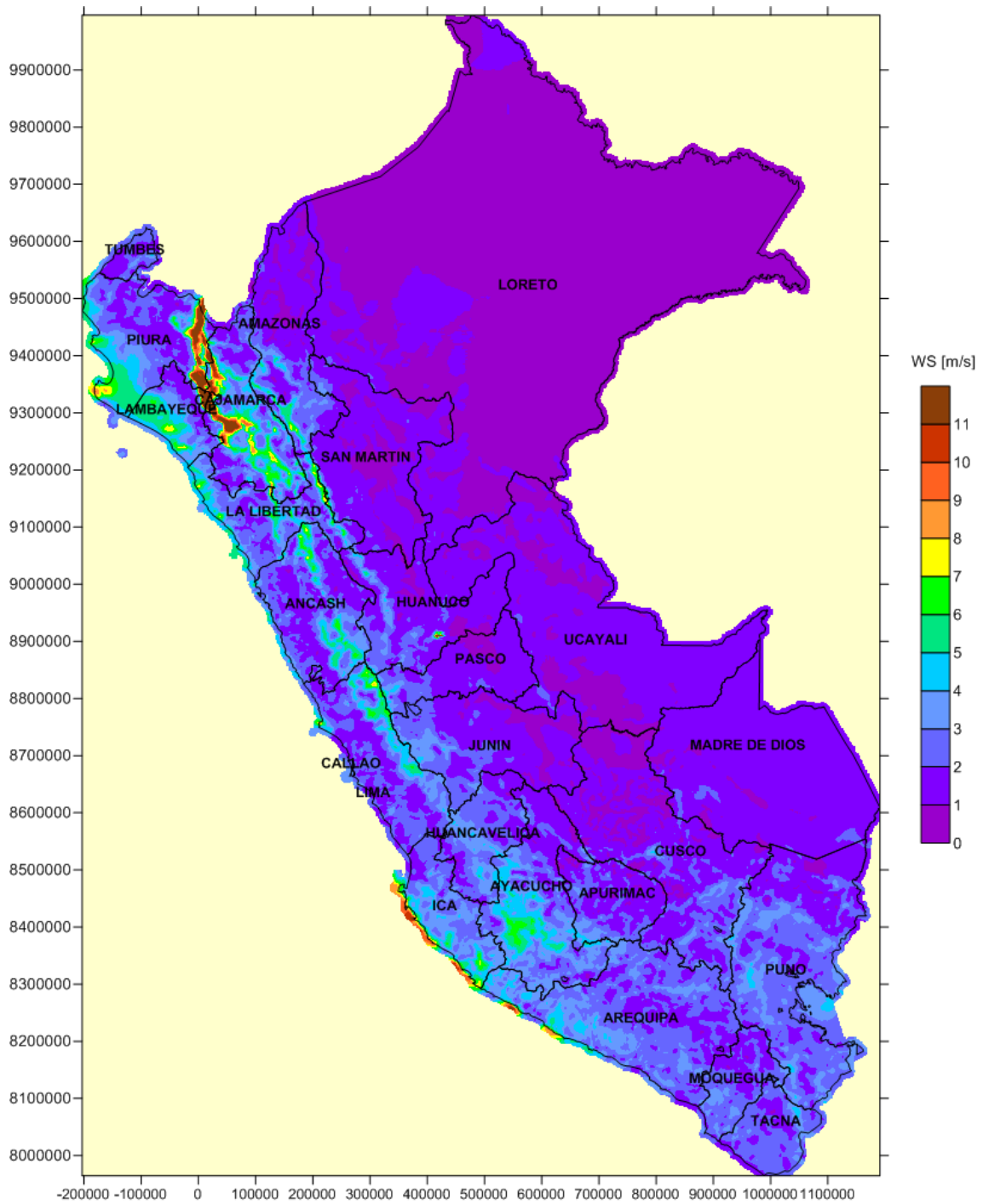


F.6. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN JUNIO A 10 m

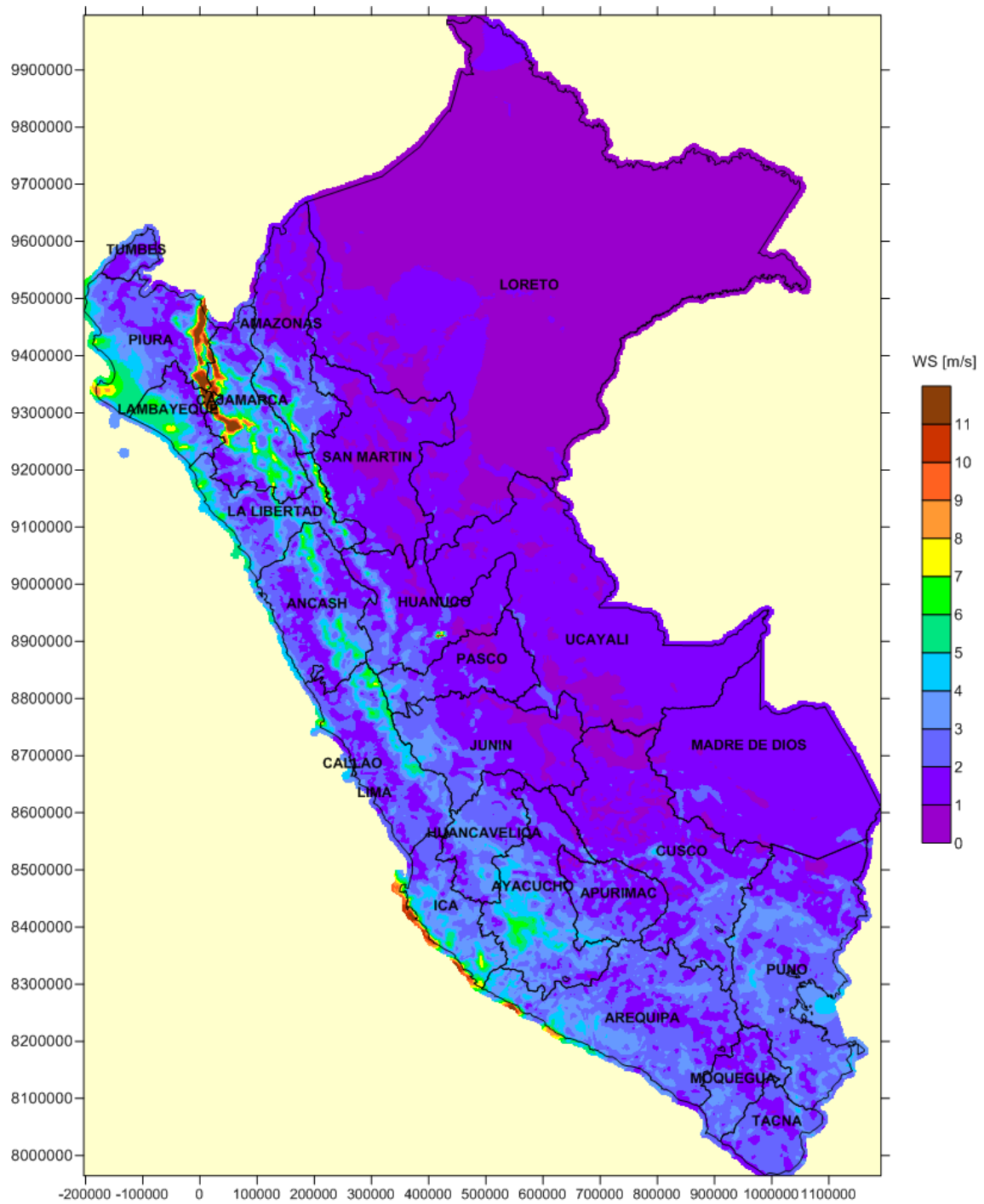




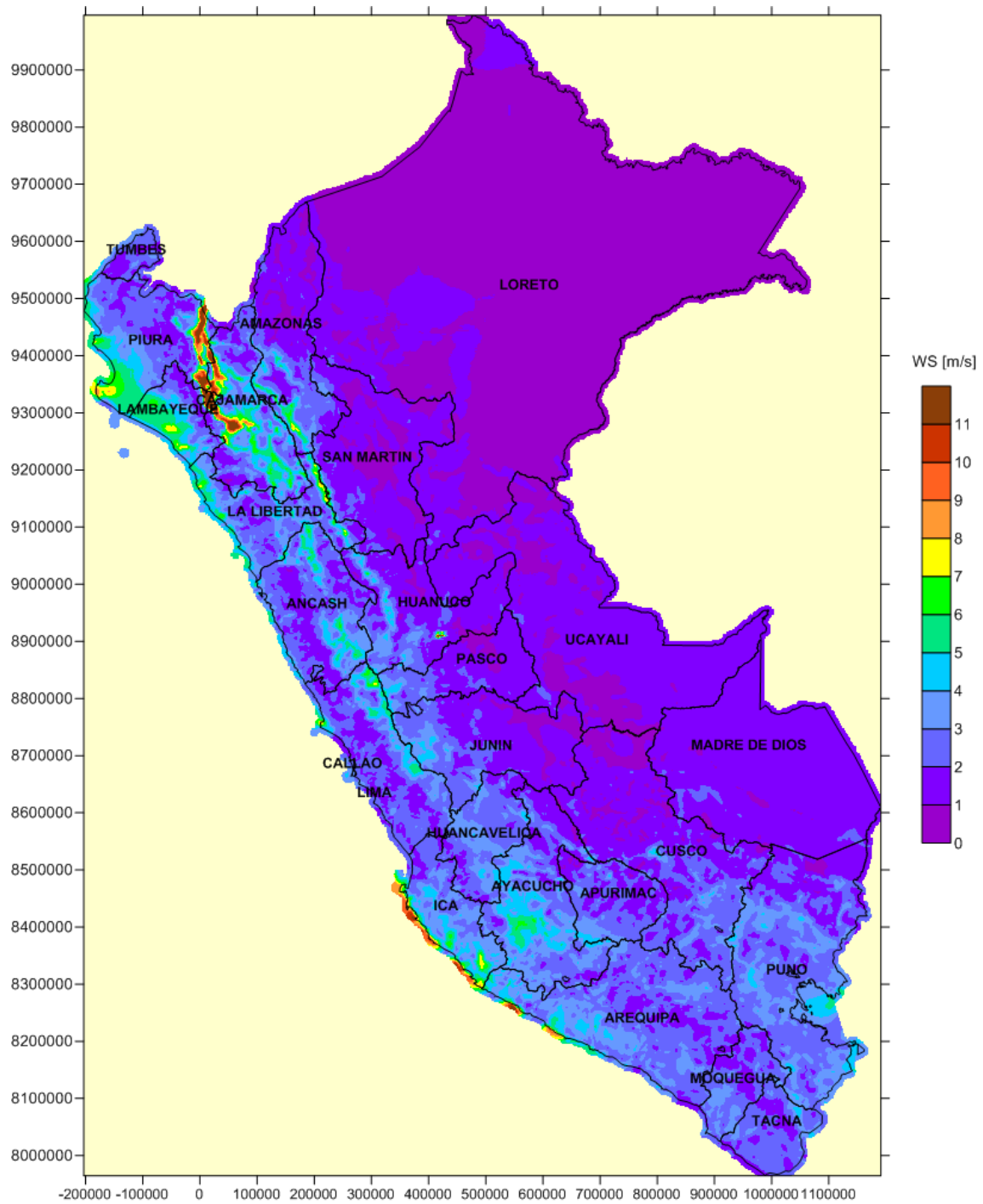
F.7. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN JULIO A 10 m



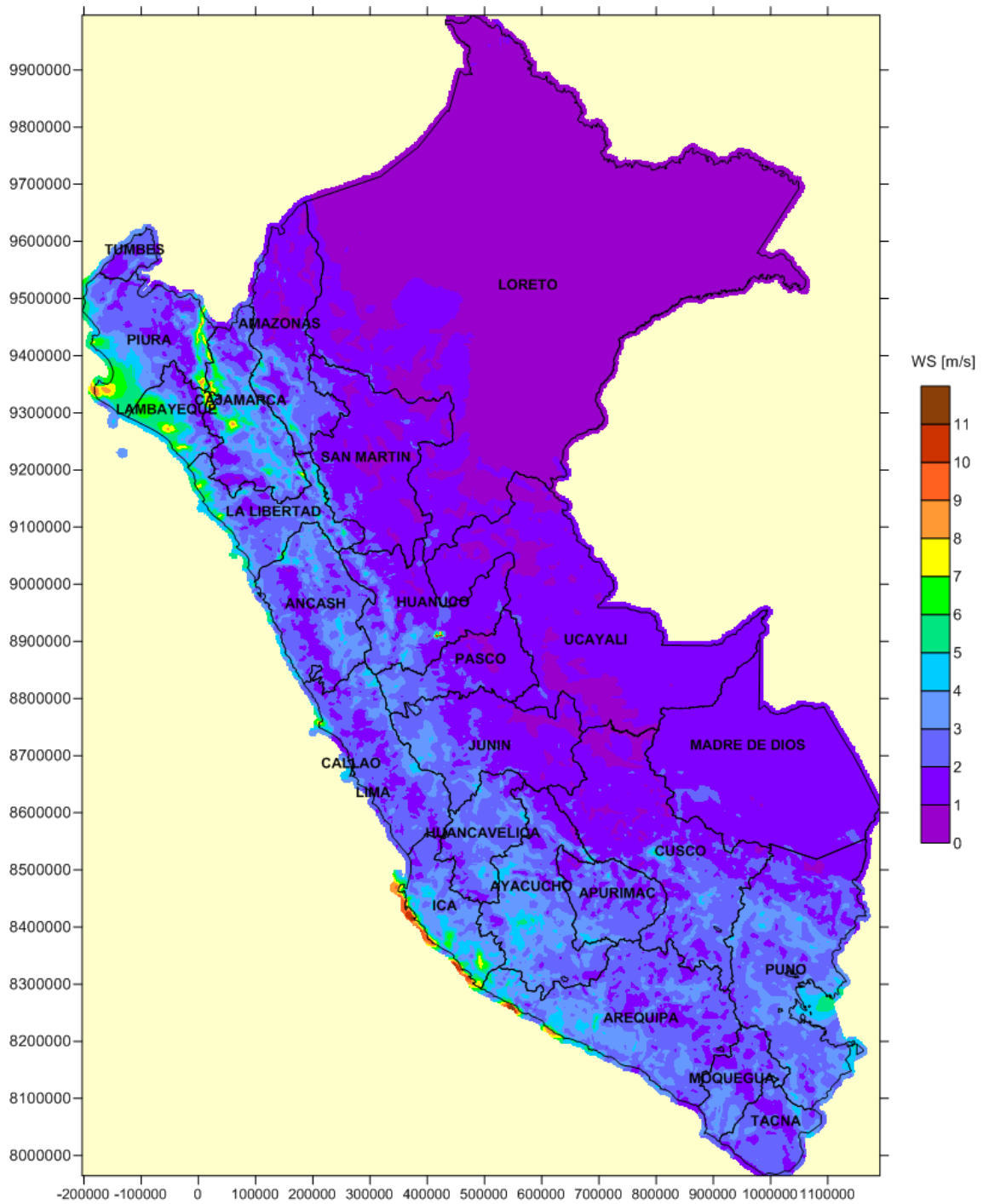
F.8. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN AGOSTO A 10 m



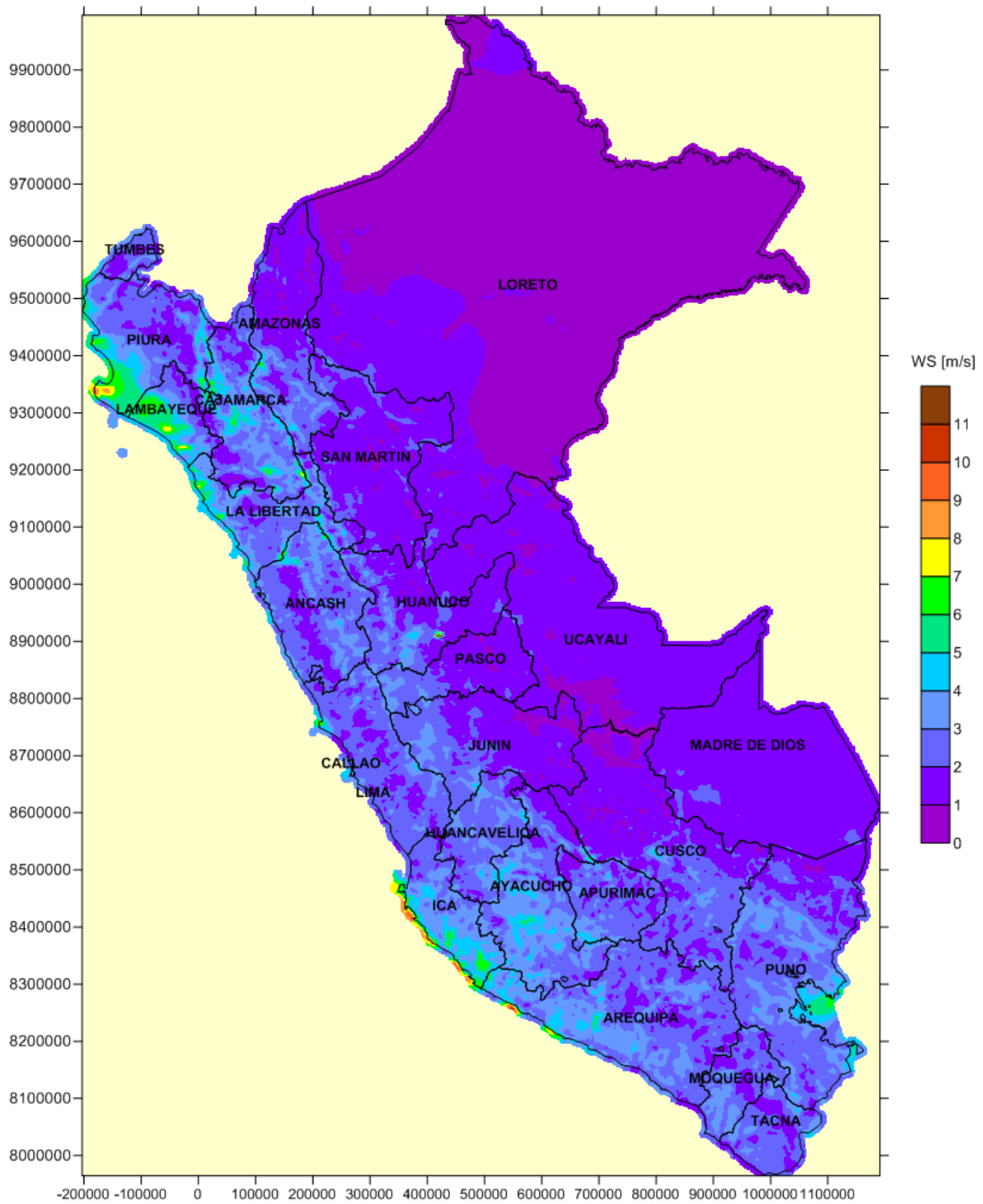
F.9. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN SEPTIEMBRE A 10 m



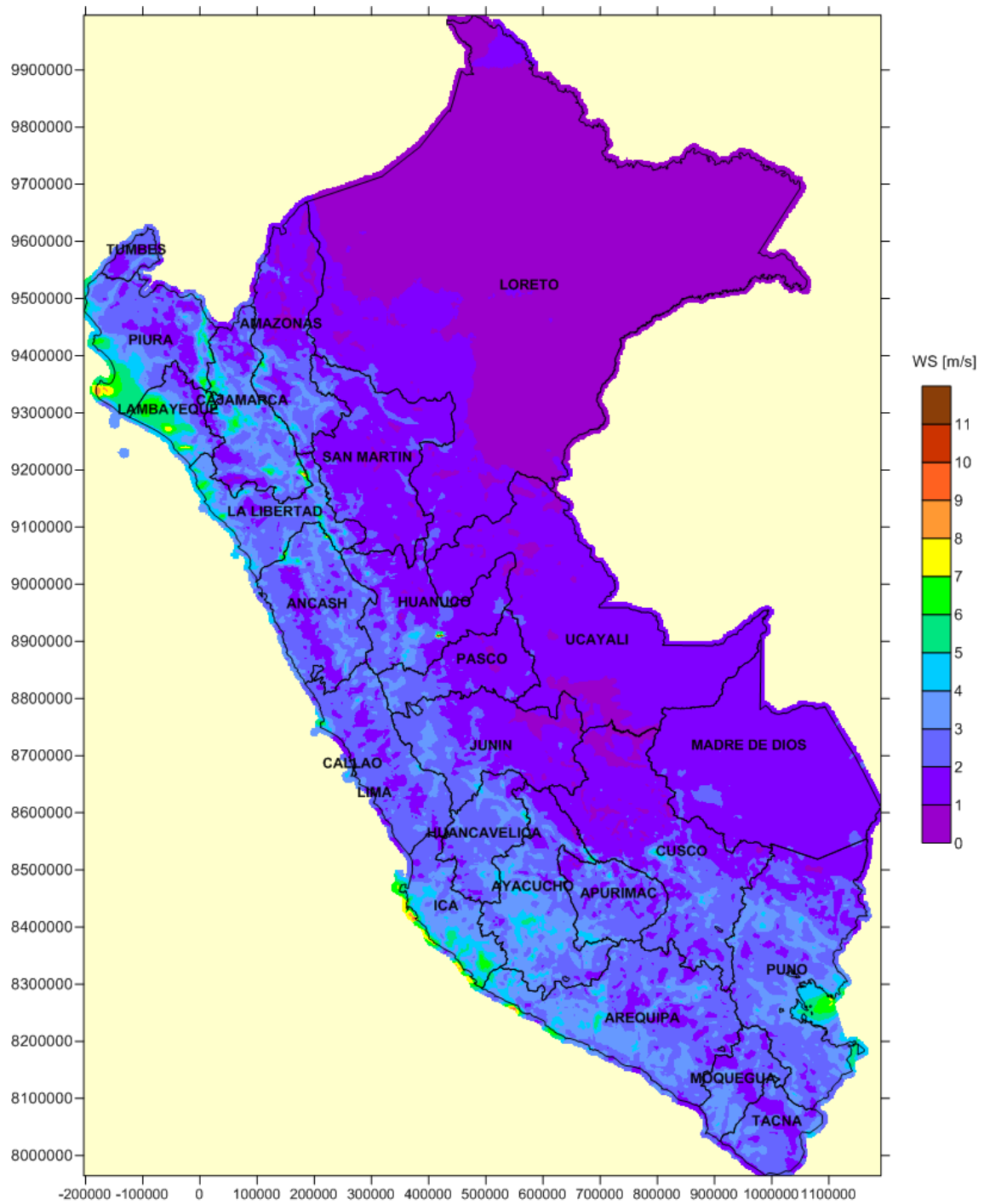
F.10. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN OCTUBRE A 10 m



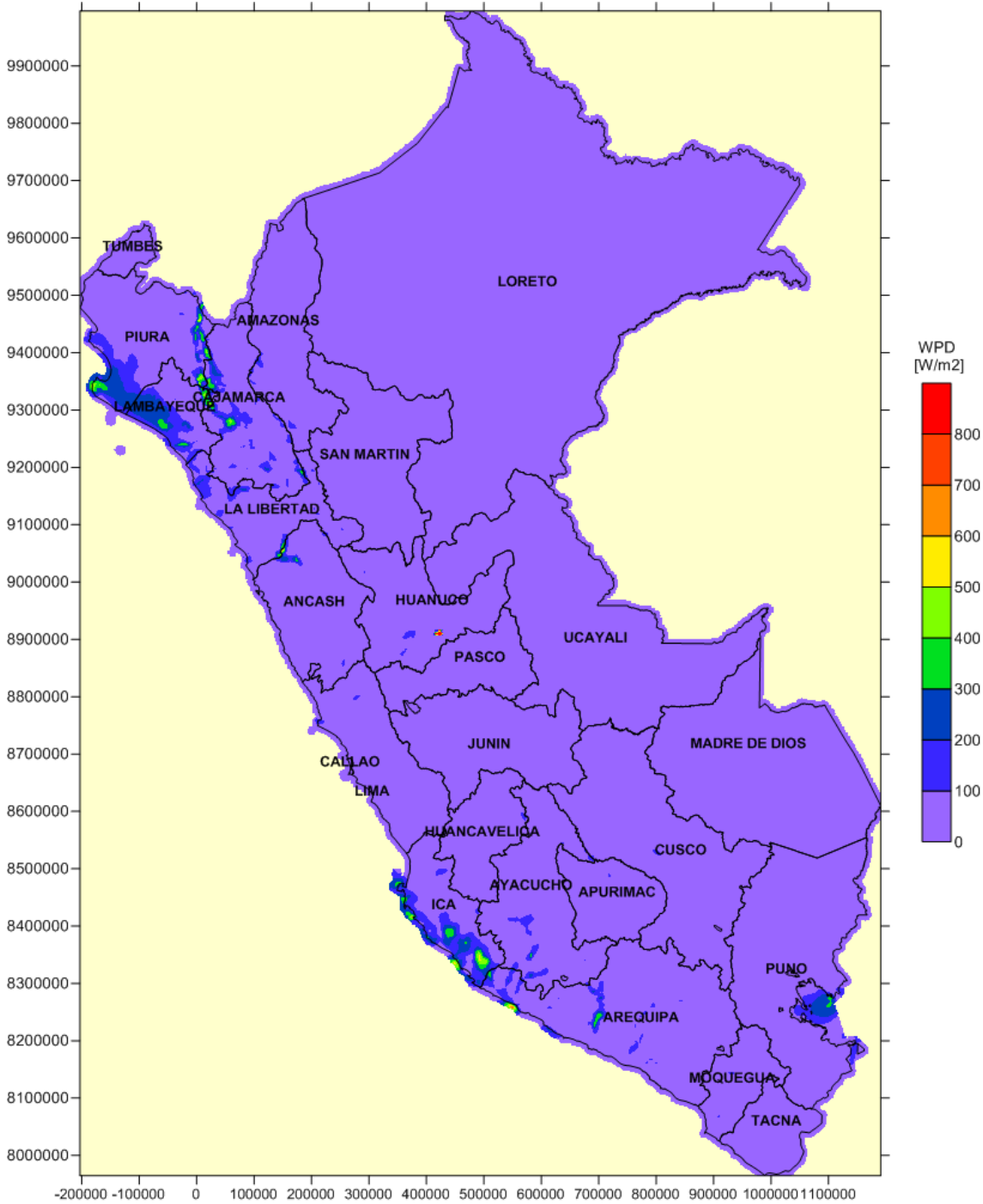
F.11. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN NOVIEMBRE A 10 m



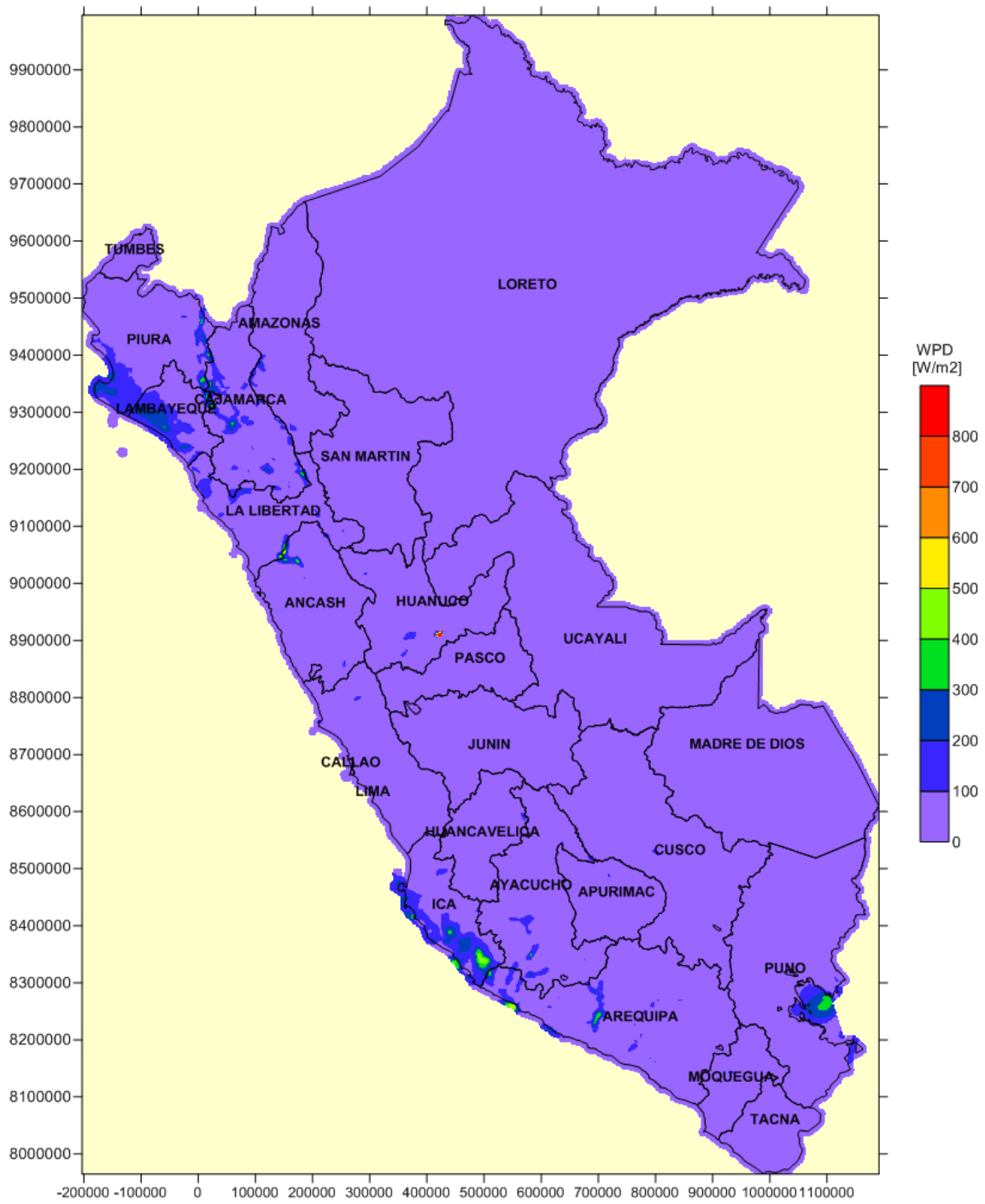
F.12. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN DICIEMBRE A 10 m



F.13. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN ENERO A 10 m

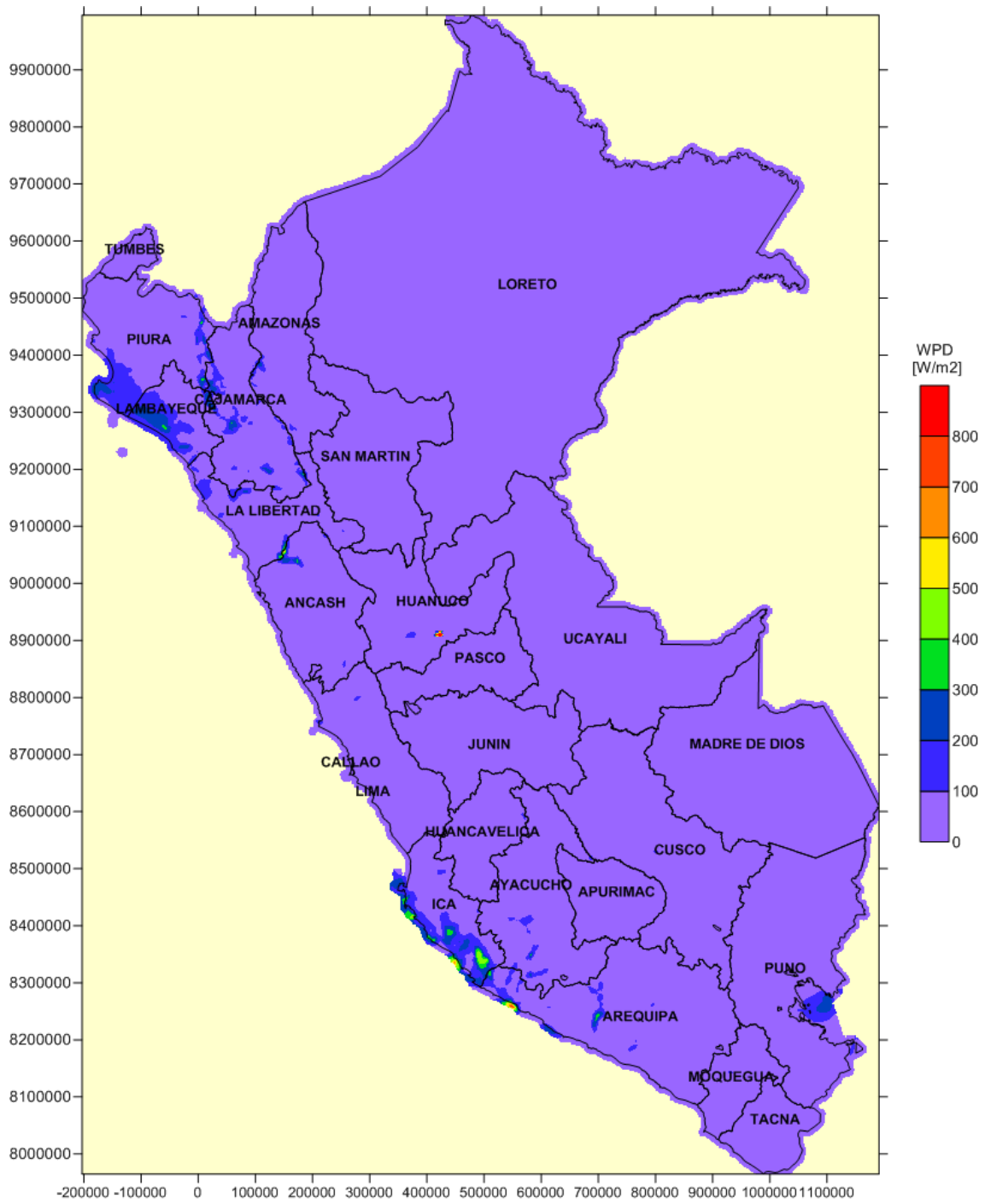


F.14. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN FEBRERO A 10 m

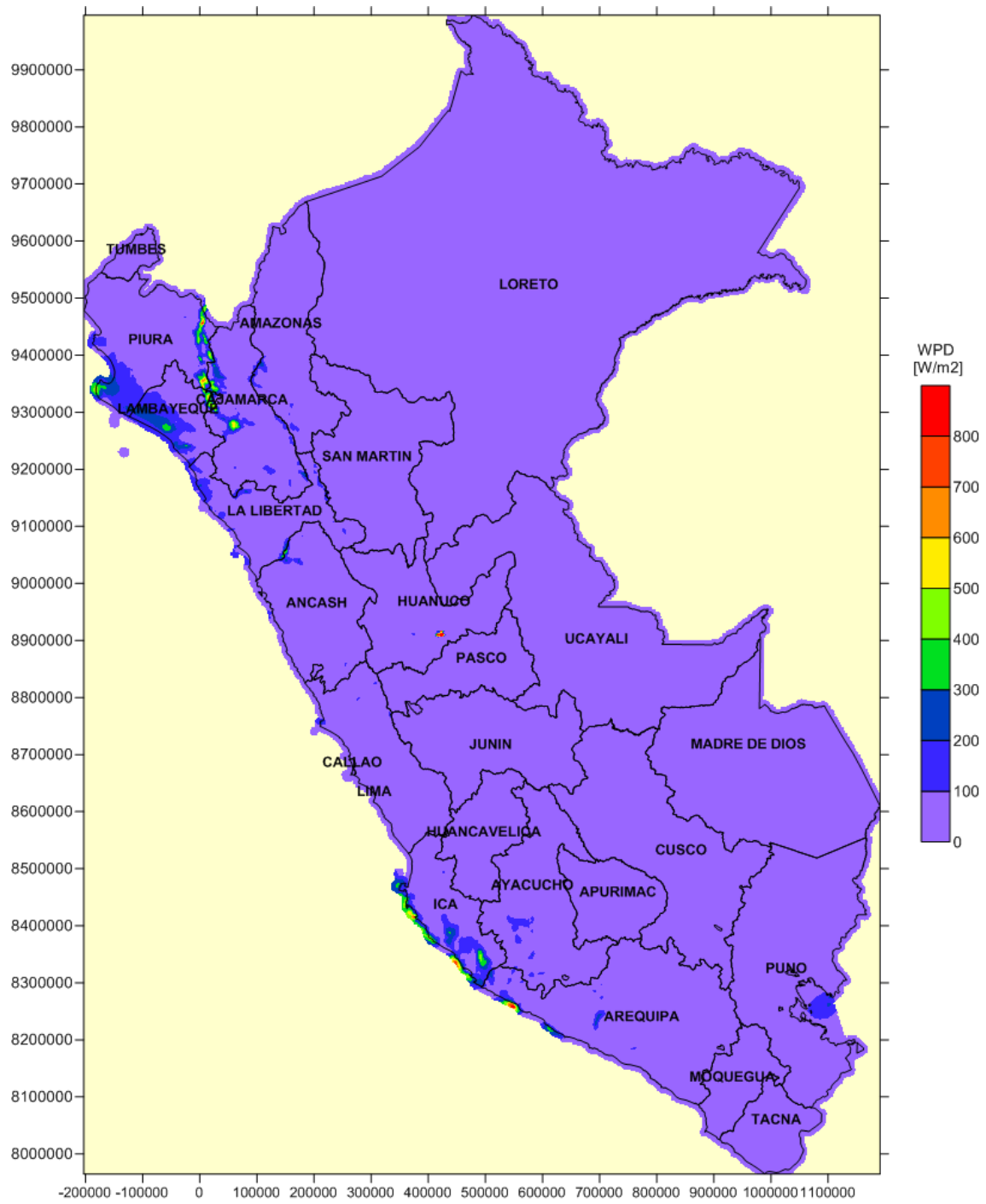




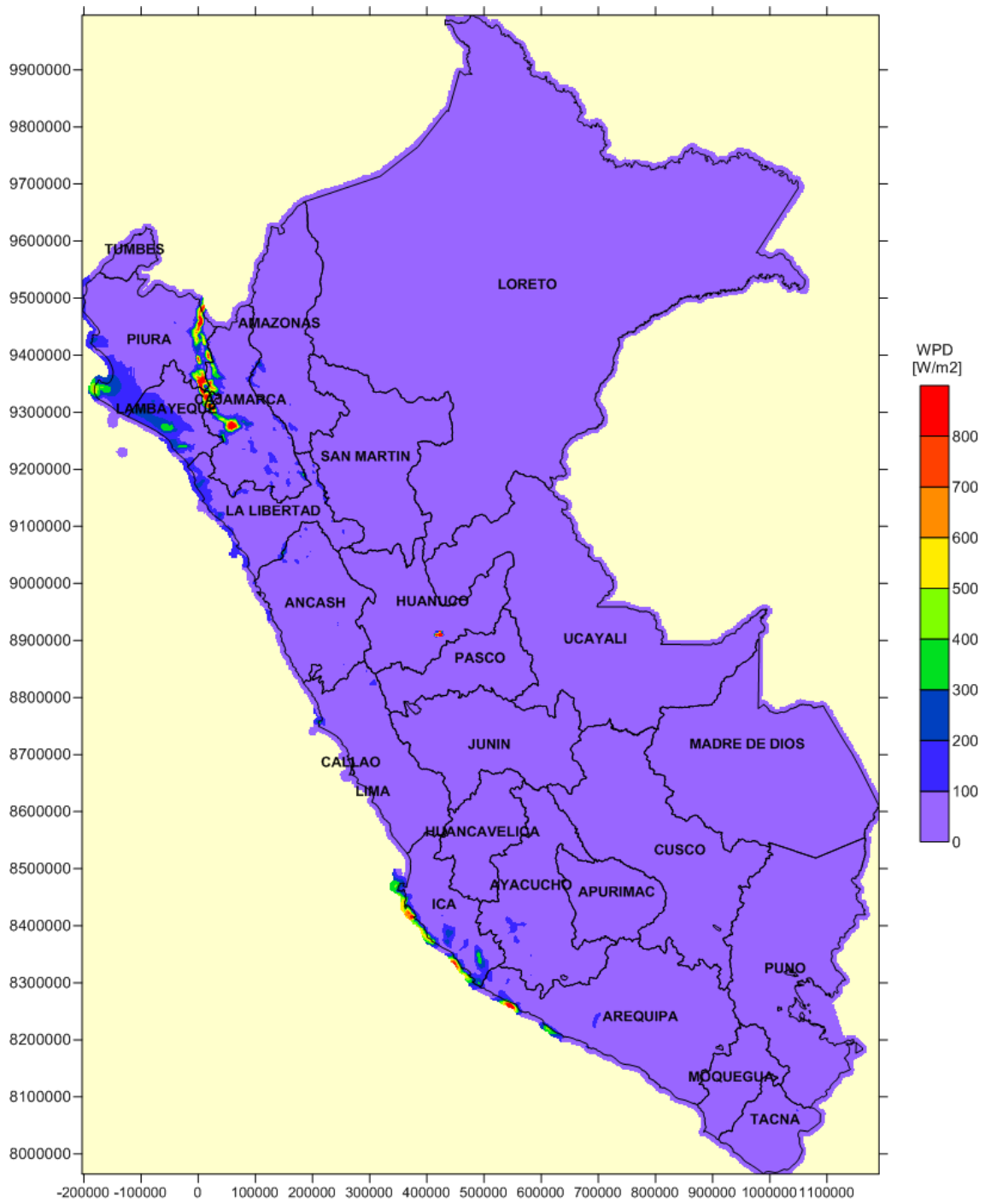
F.15. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN MARZO A 10 m



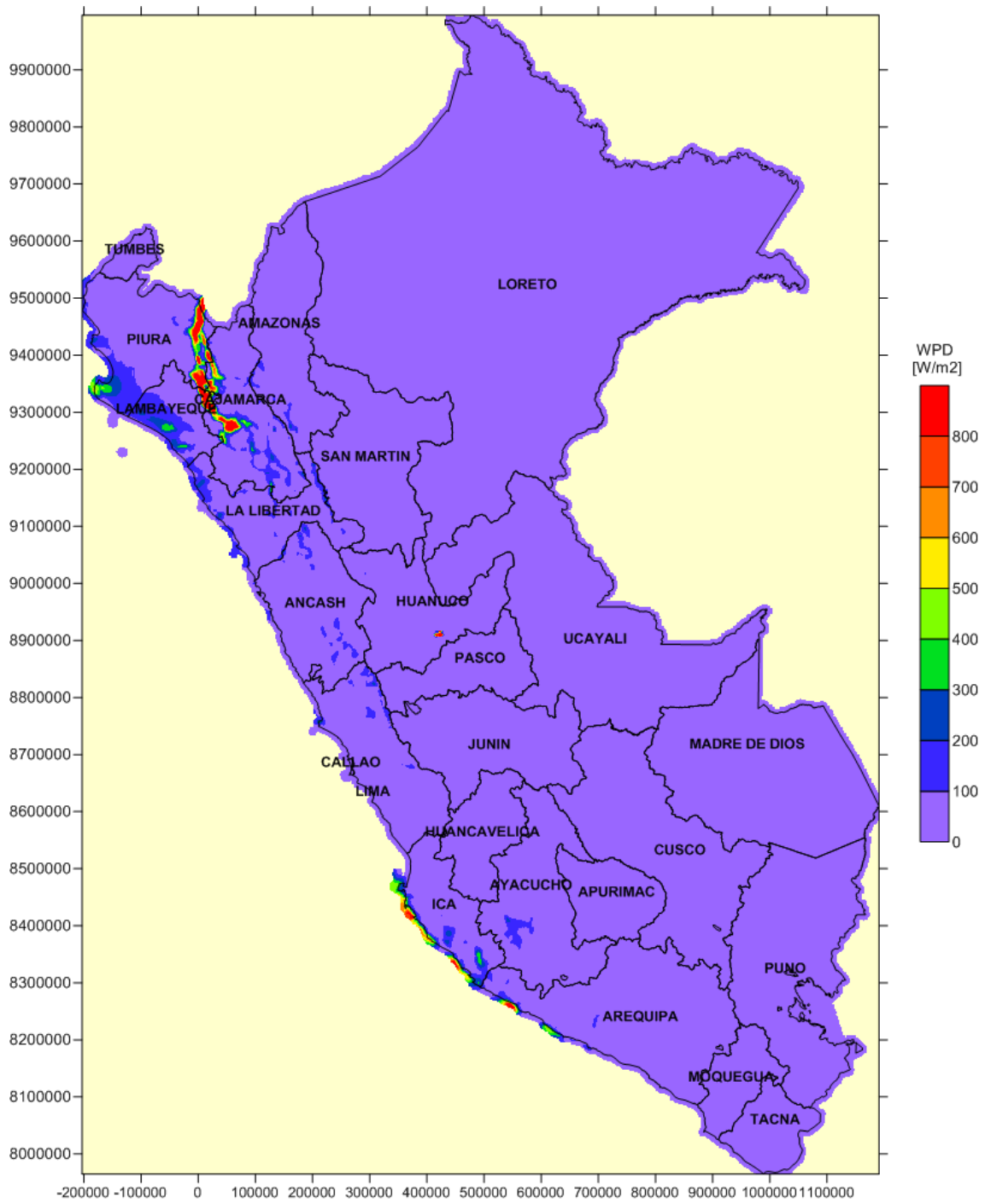
F.16. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN ABRIL A 10 m



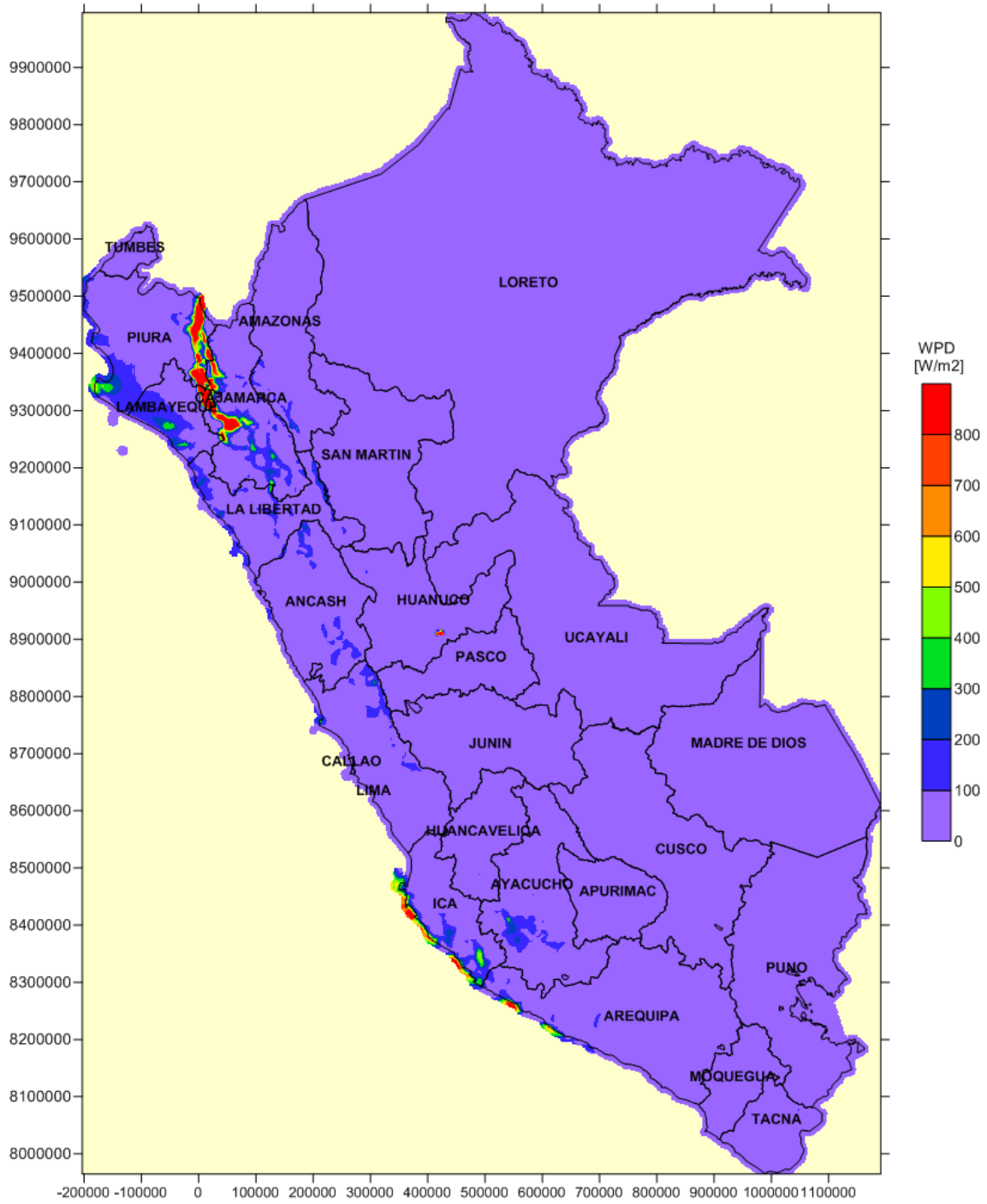
F.17. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN MAYO A 10 m



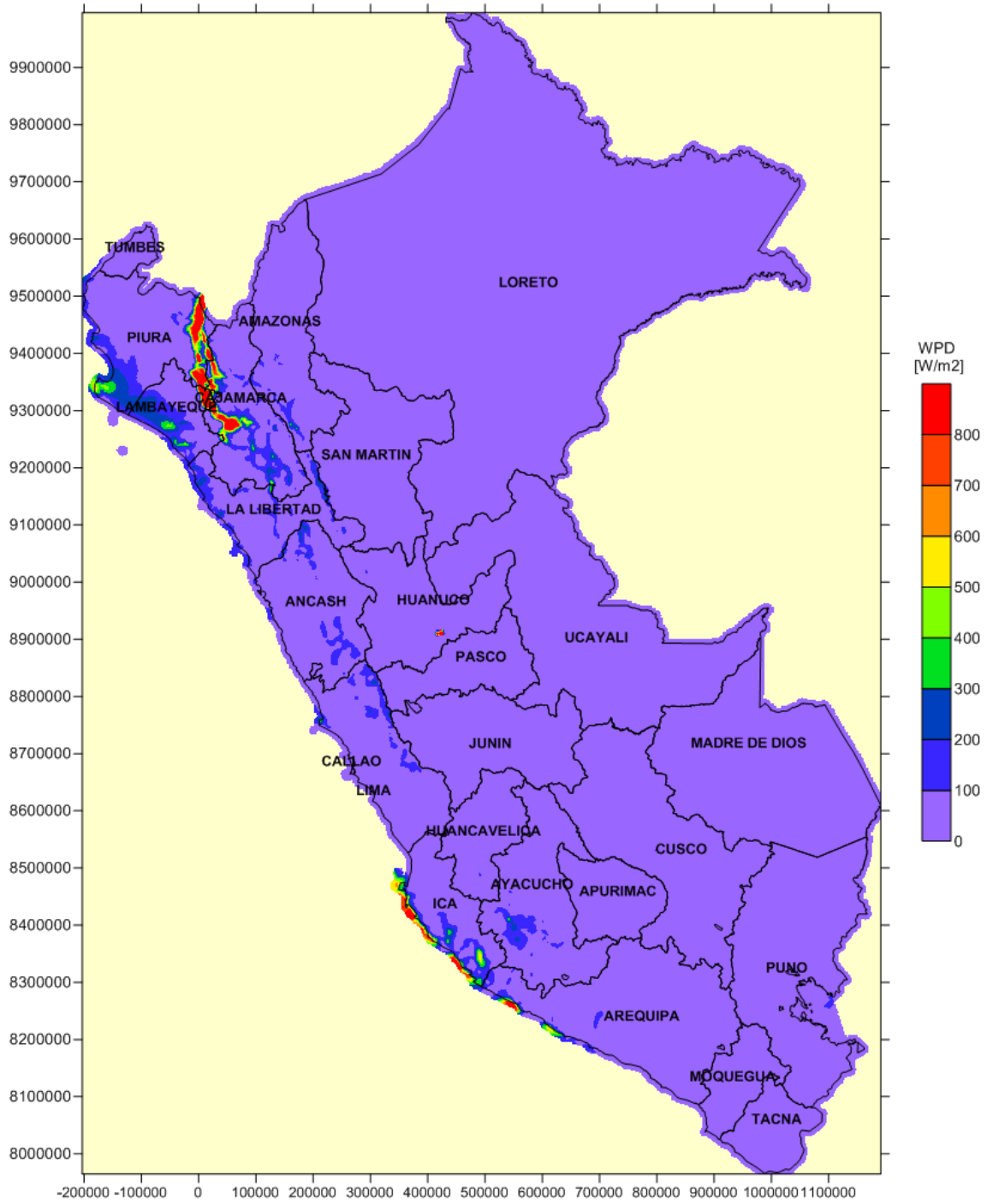
F.18. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN JUNIO A 10 m



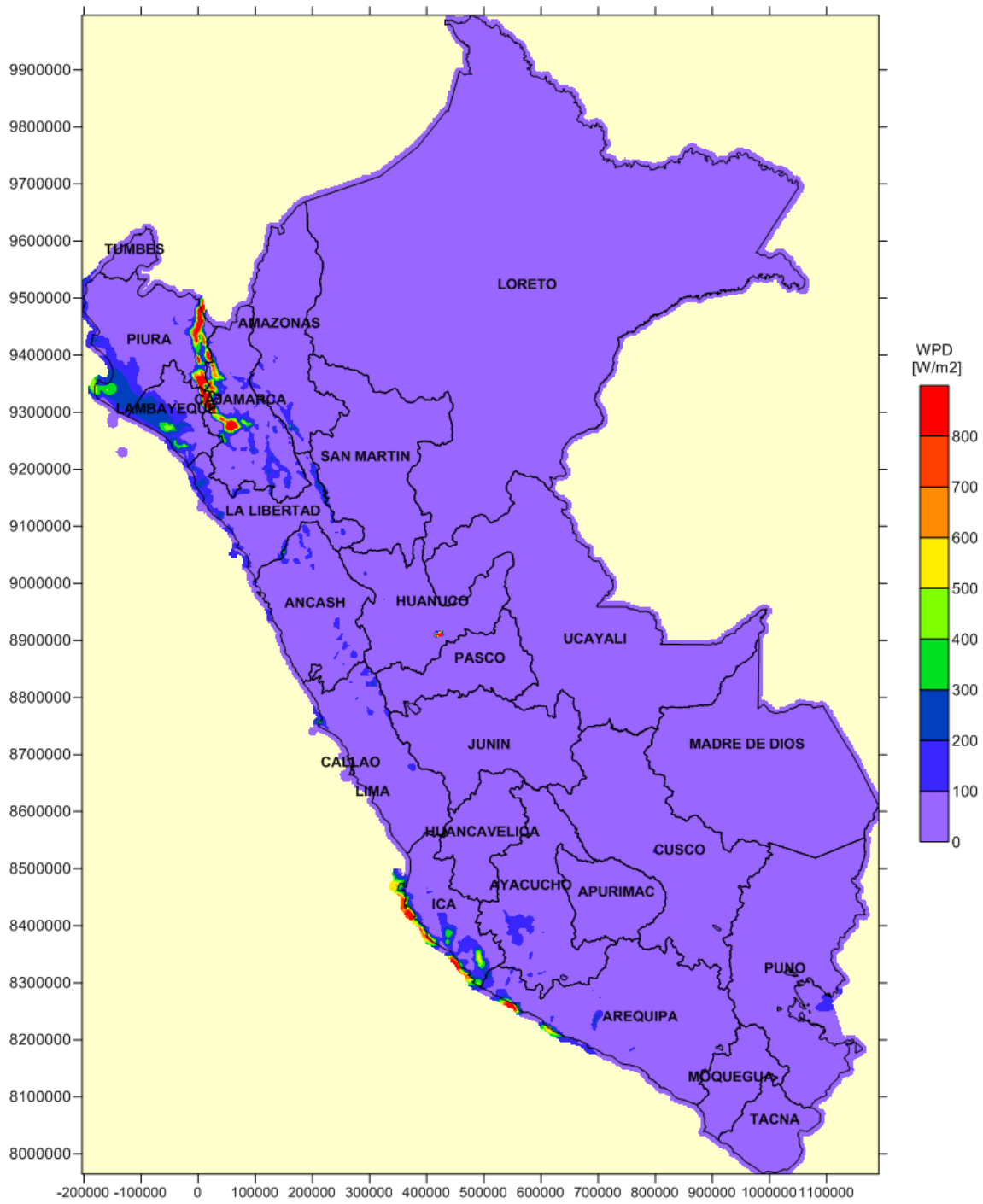
F.19. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN JULIO A 10 m



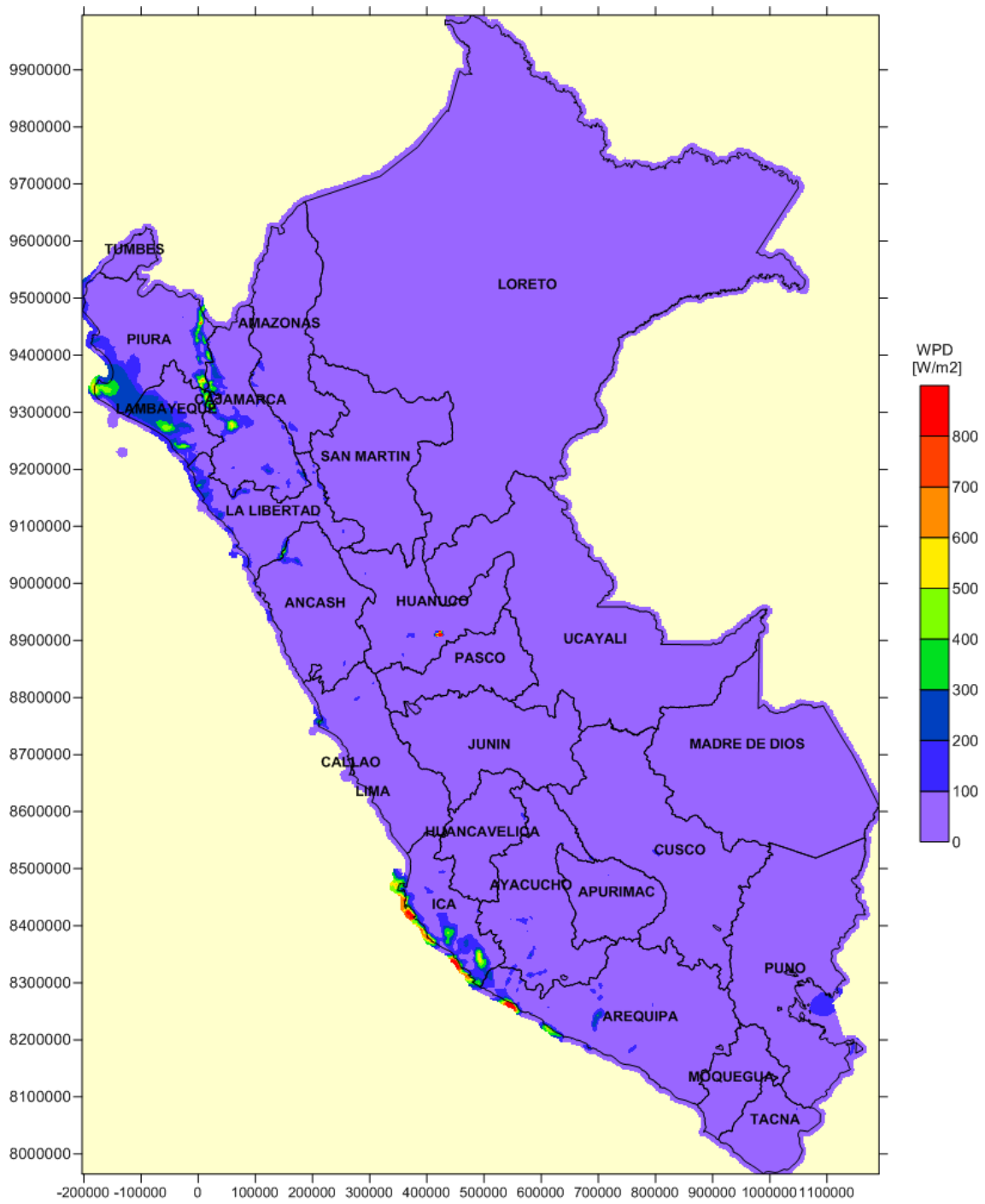
F.20. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN AGOSTO A 10 m



F.21. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN SEPTIEMBRE A 10 m

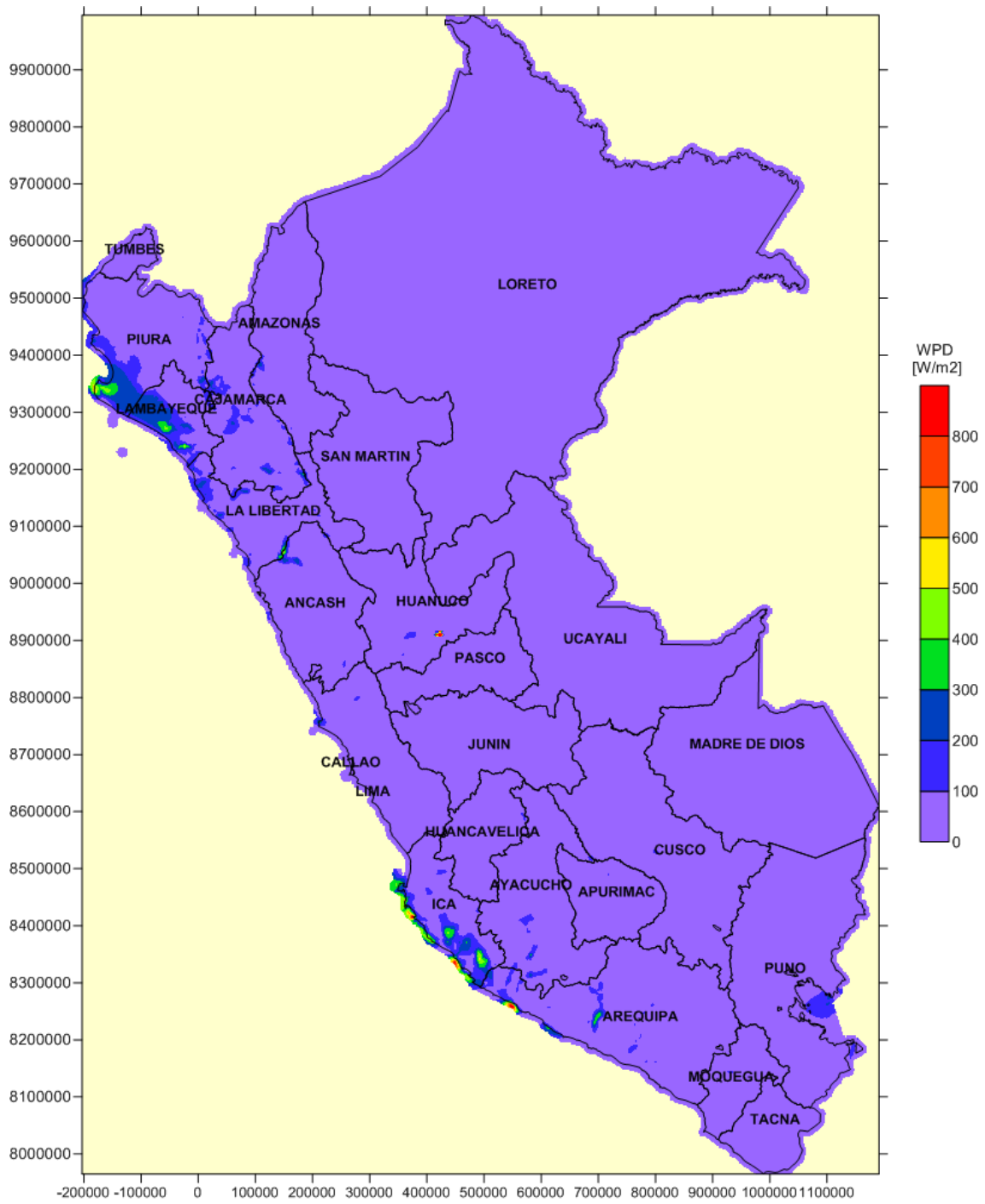


F.22. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN OCTUBRE A 10 m

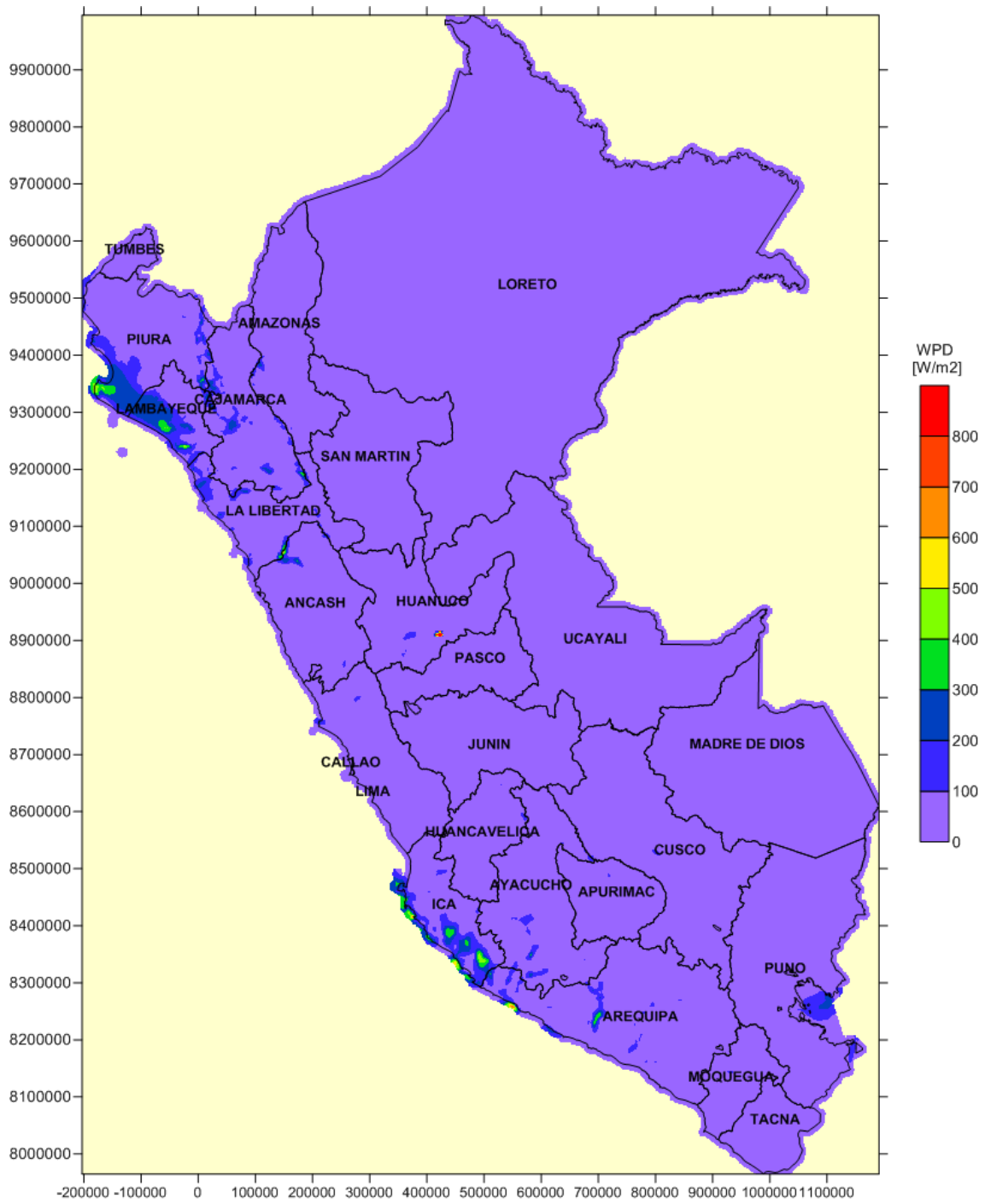




F.23. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN NOVIEMBRE A 10 m

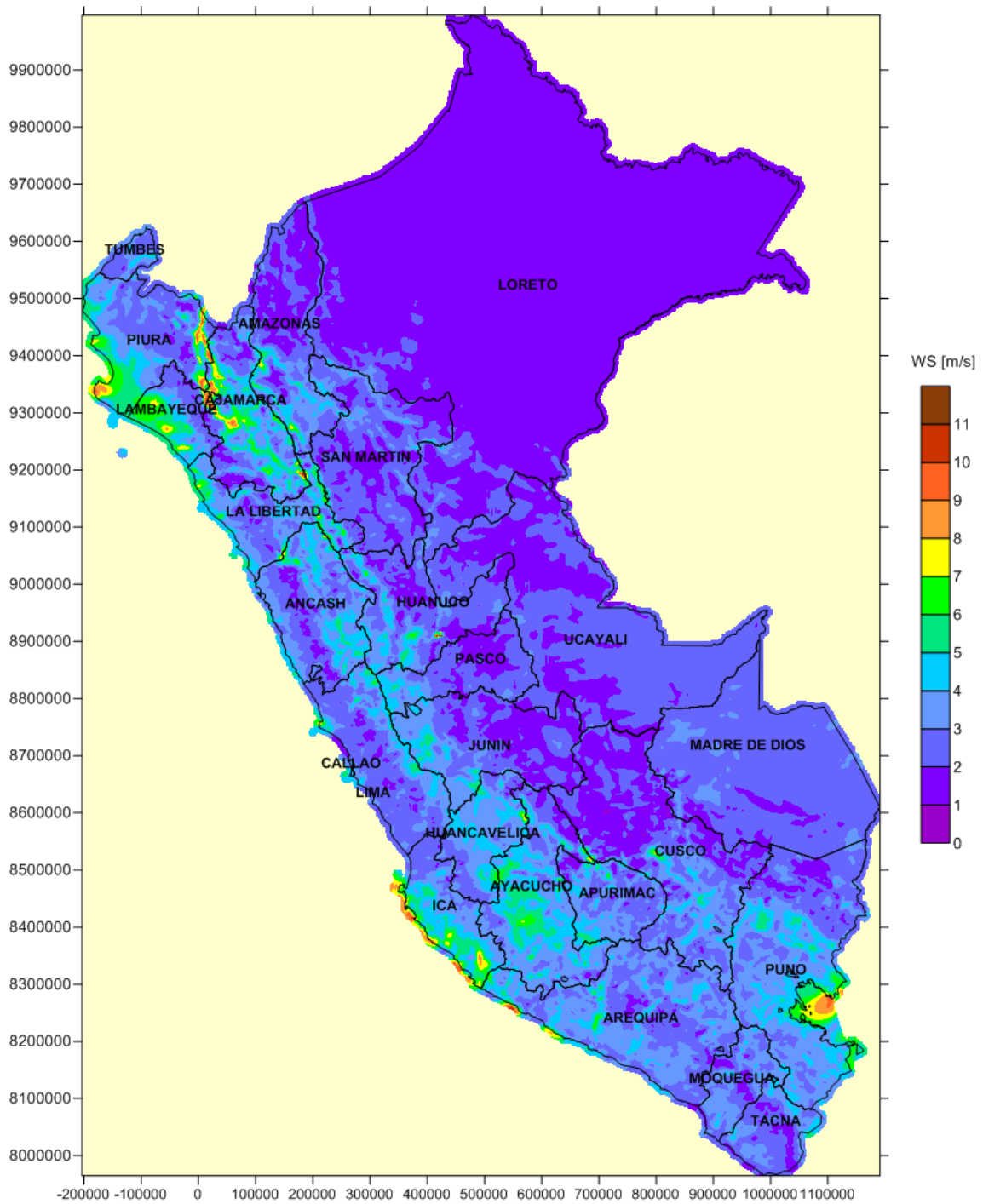


F.24. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN DICIEMBRE A 10 m

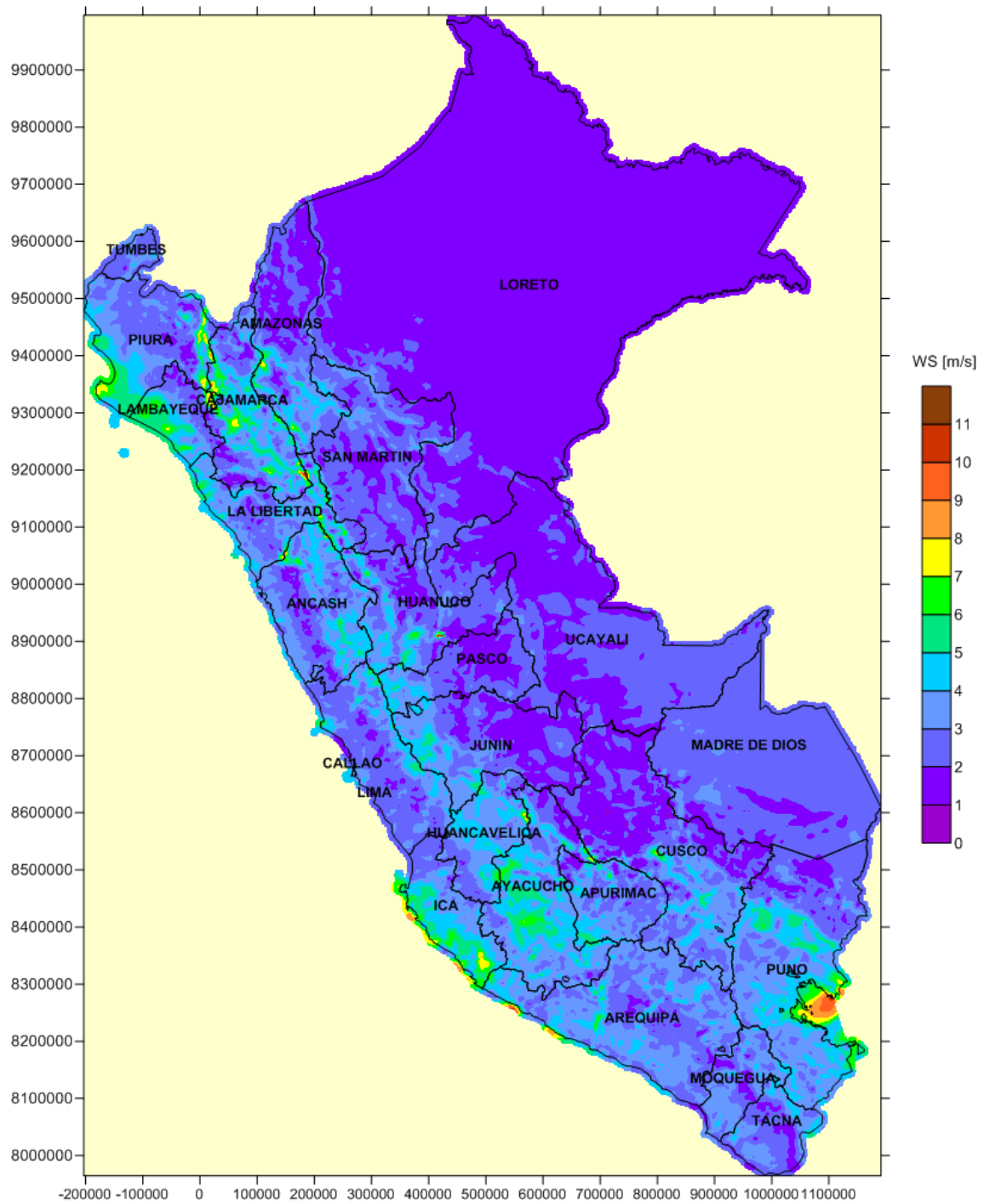


**ANEXO G.**  
**MAPAS DE POTENCIAL EÓLICO**  
**MENSUALES (25m)**

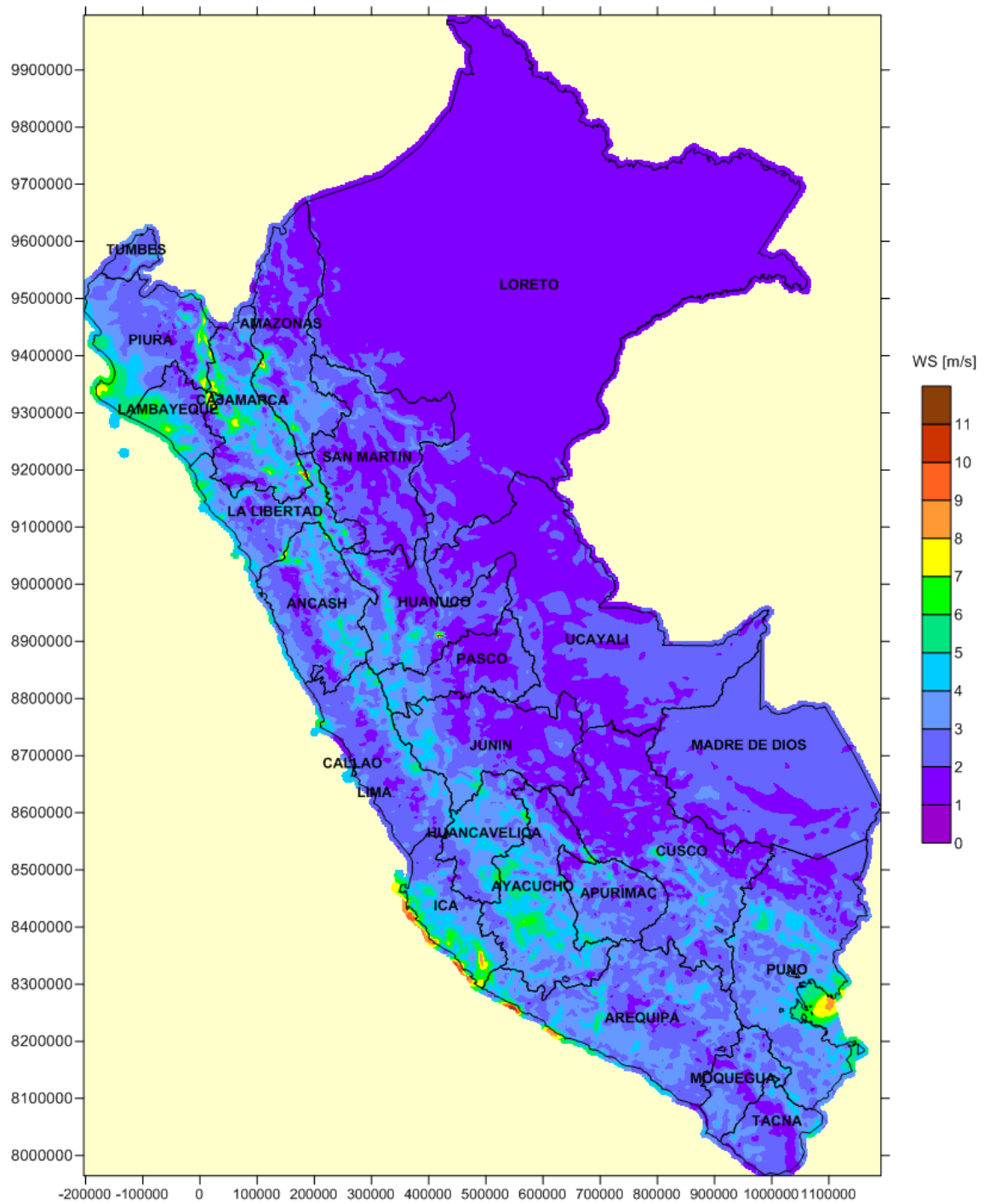
### G.1. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN ENERO A 25 m



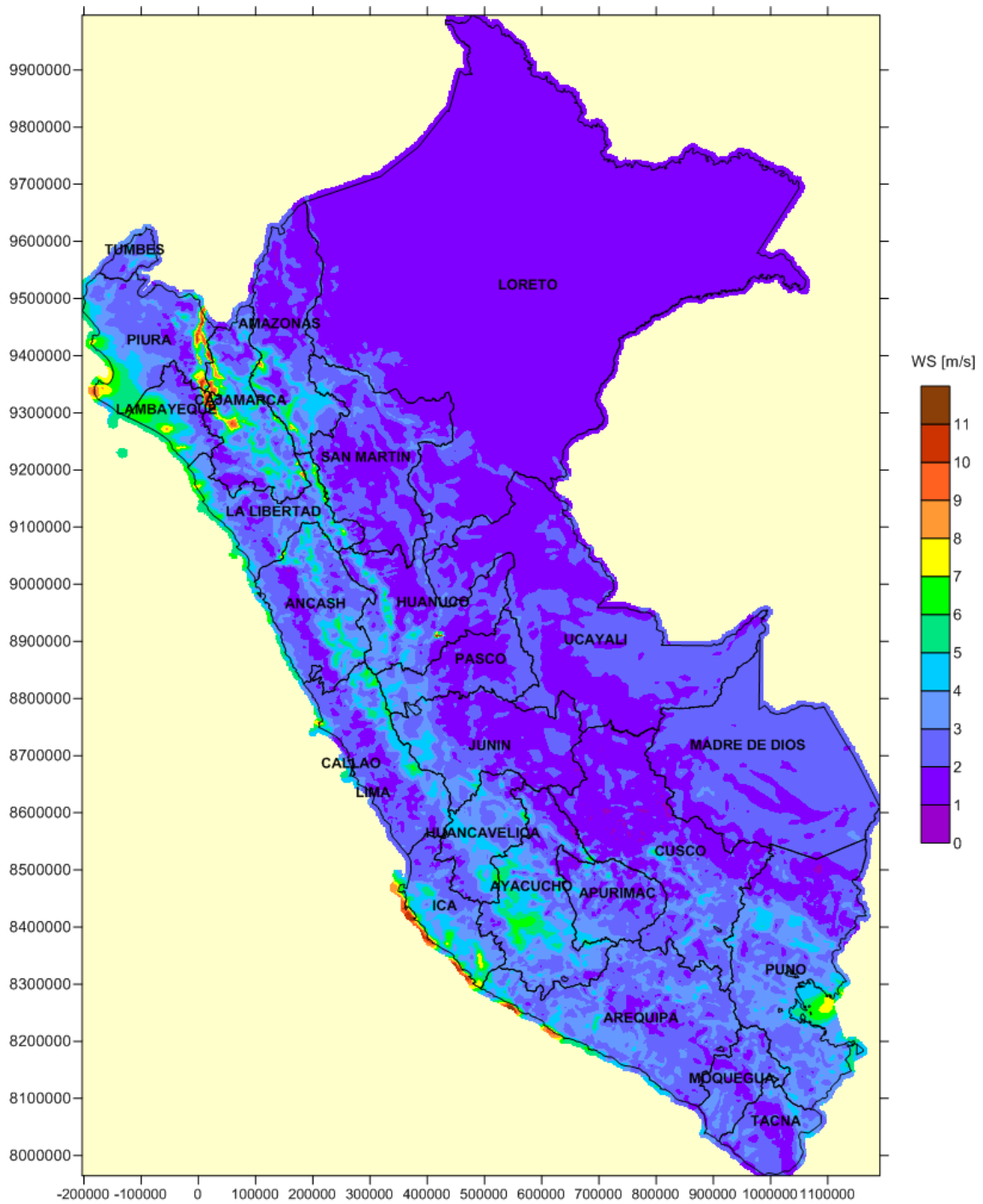
## G.2. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN FEBRERO A 25 m



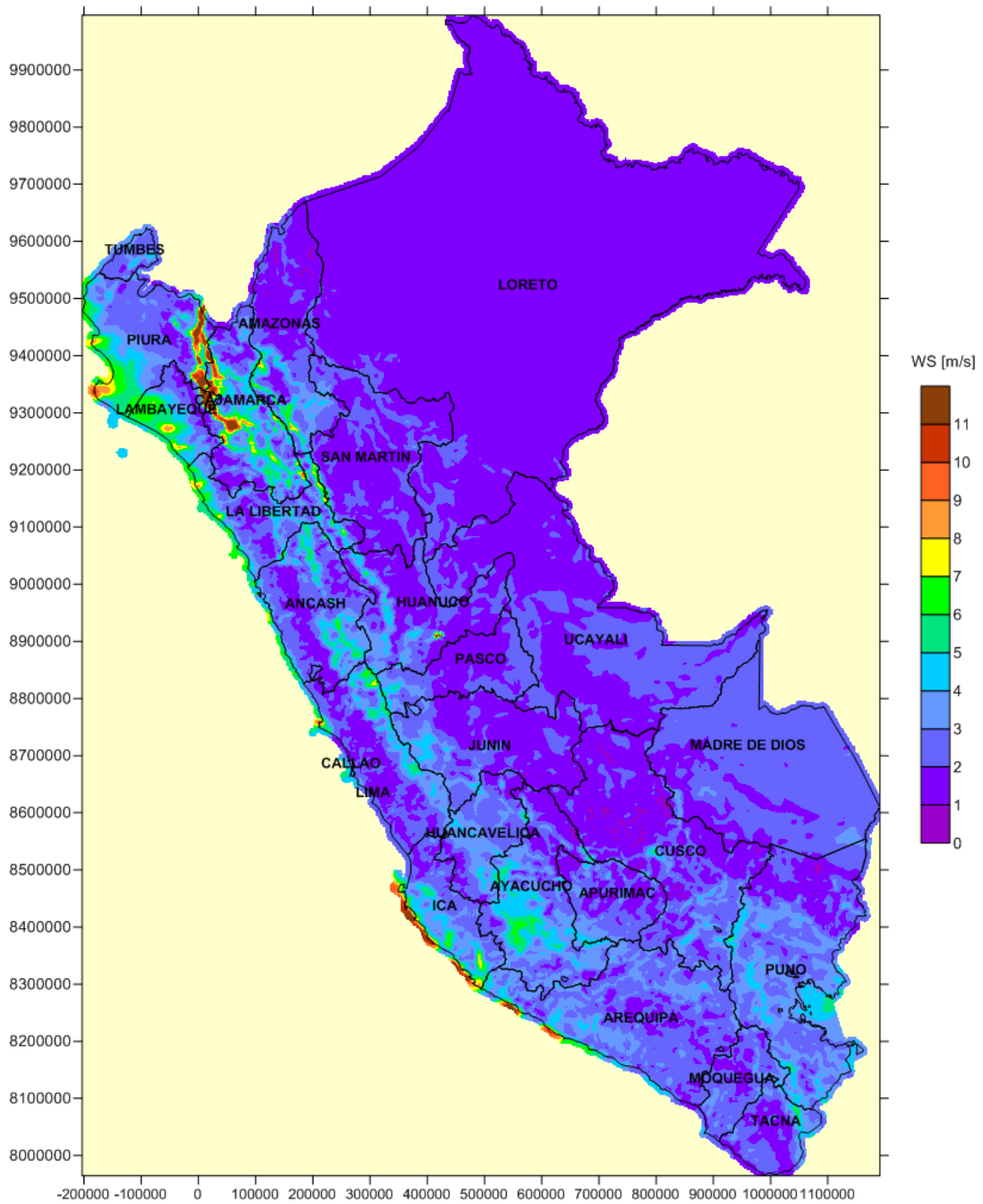
### G.3. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN MARZO A 25 m



G.4. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN ABRIL A 25 m

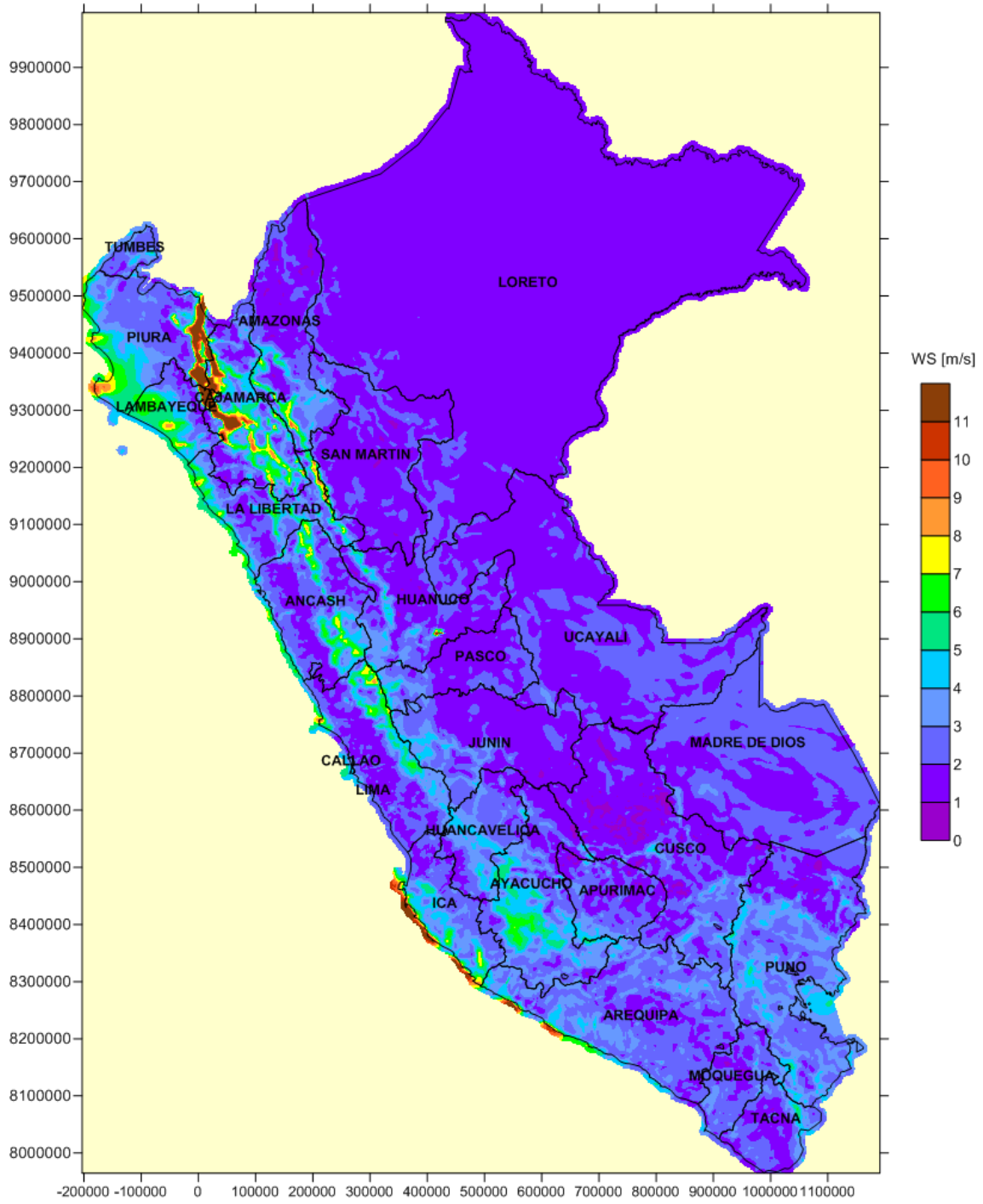


G.5. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN MAYO A 25 m

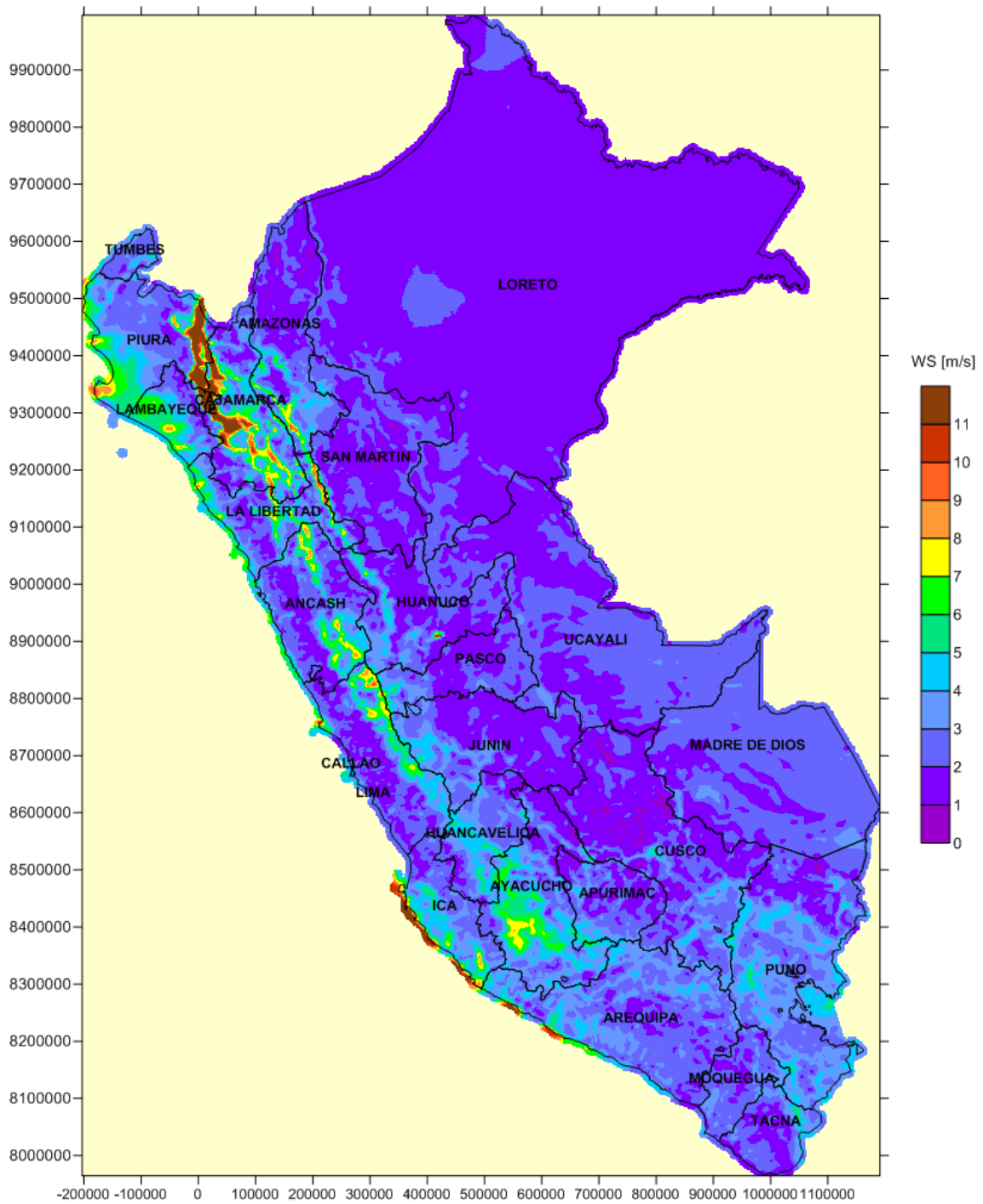




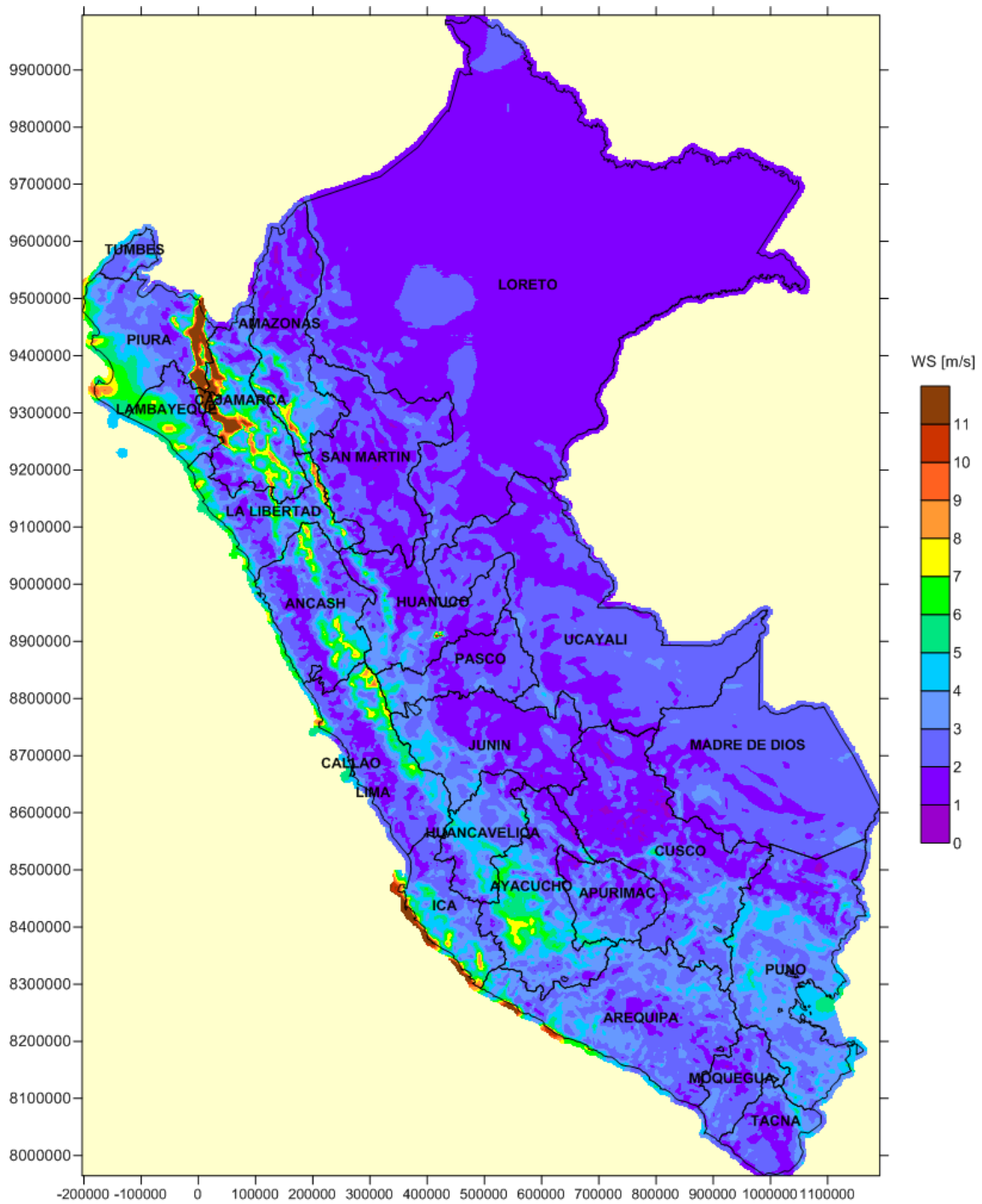
G.6. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN JUNIO A 25 m



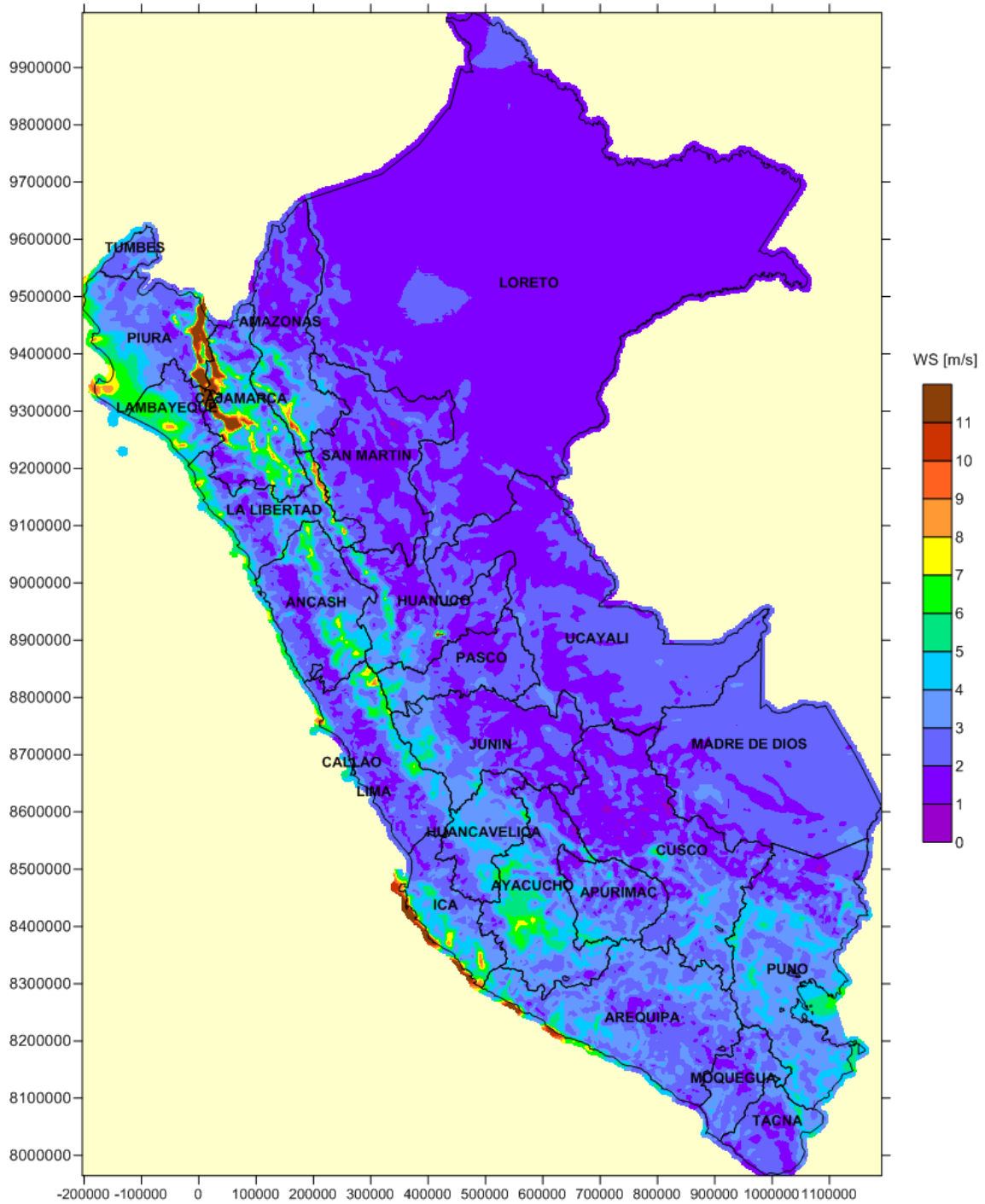
### G.7. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN JULIO A 25 m



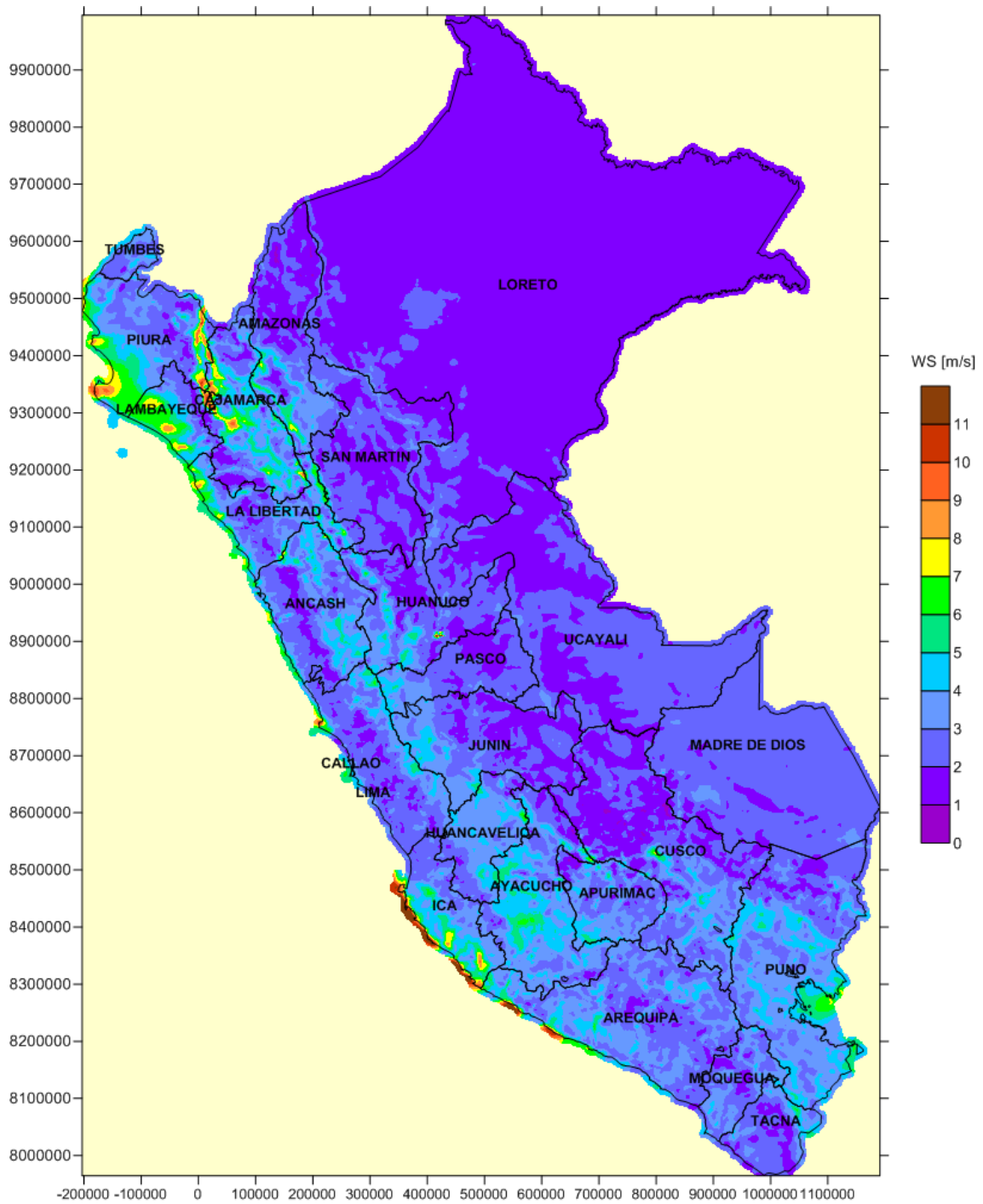
G.8. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN AGOSTO A 25 m



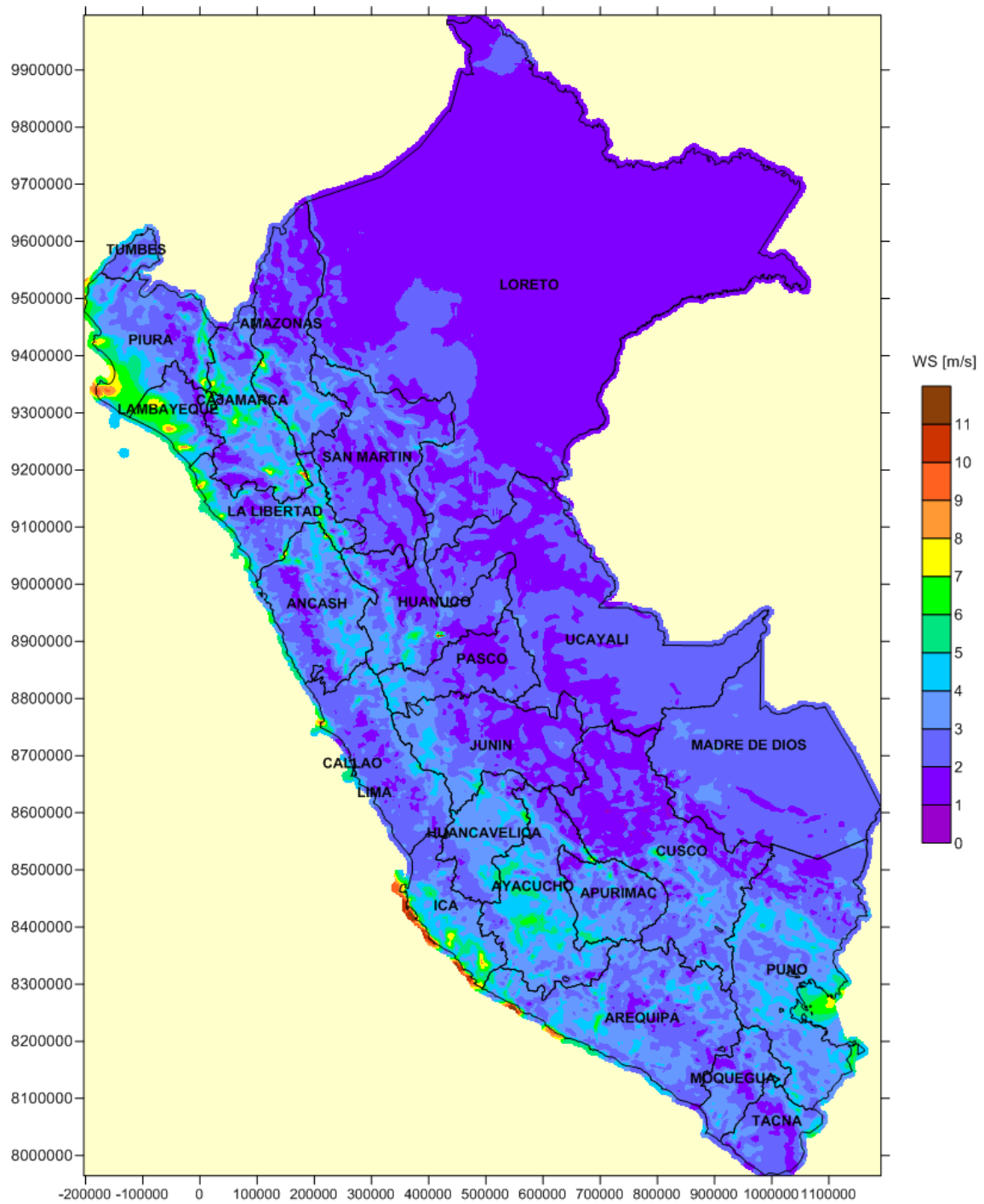
G.9. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN SEPTIEMBRE A 25 m



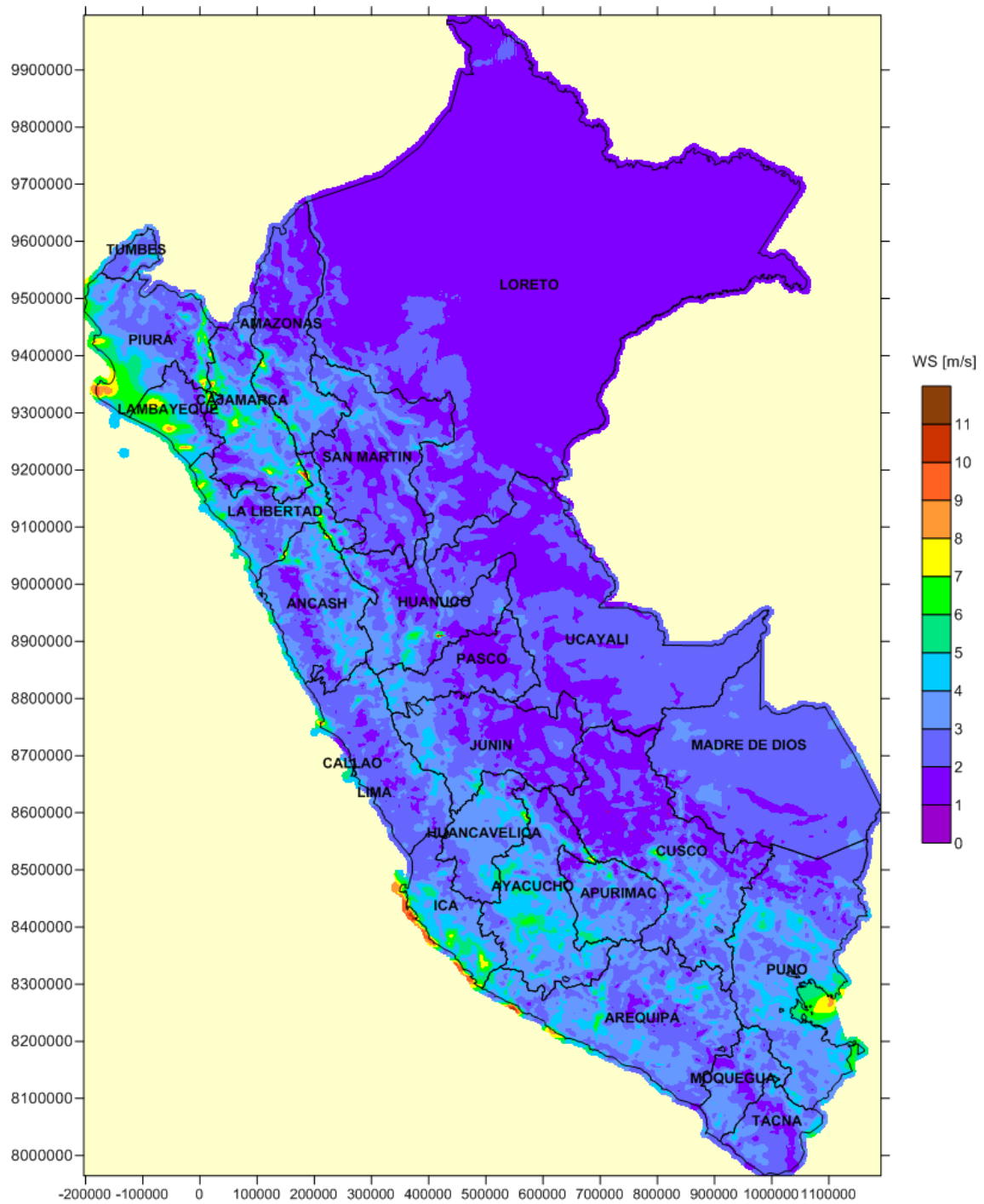
G.10. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN OCTUBRE A 25 m



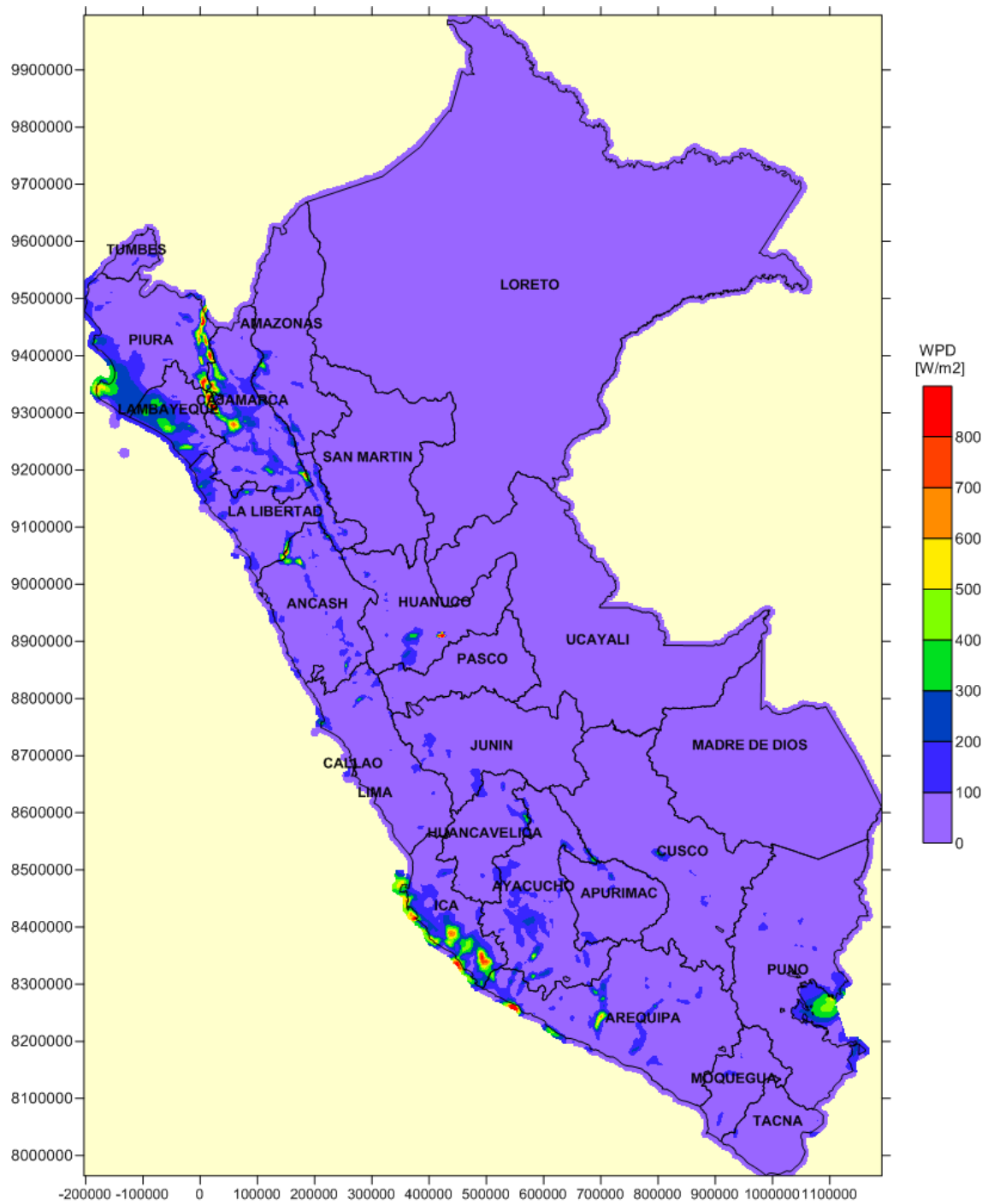
G.11. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN NOVIEMBRE A 25 m



G.12. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN DICIEMBRE A 25 m

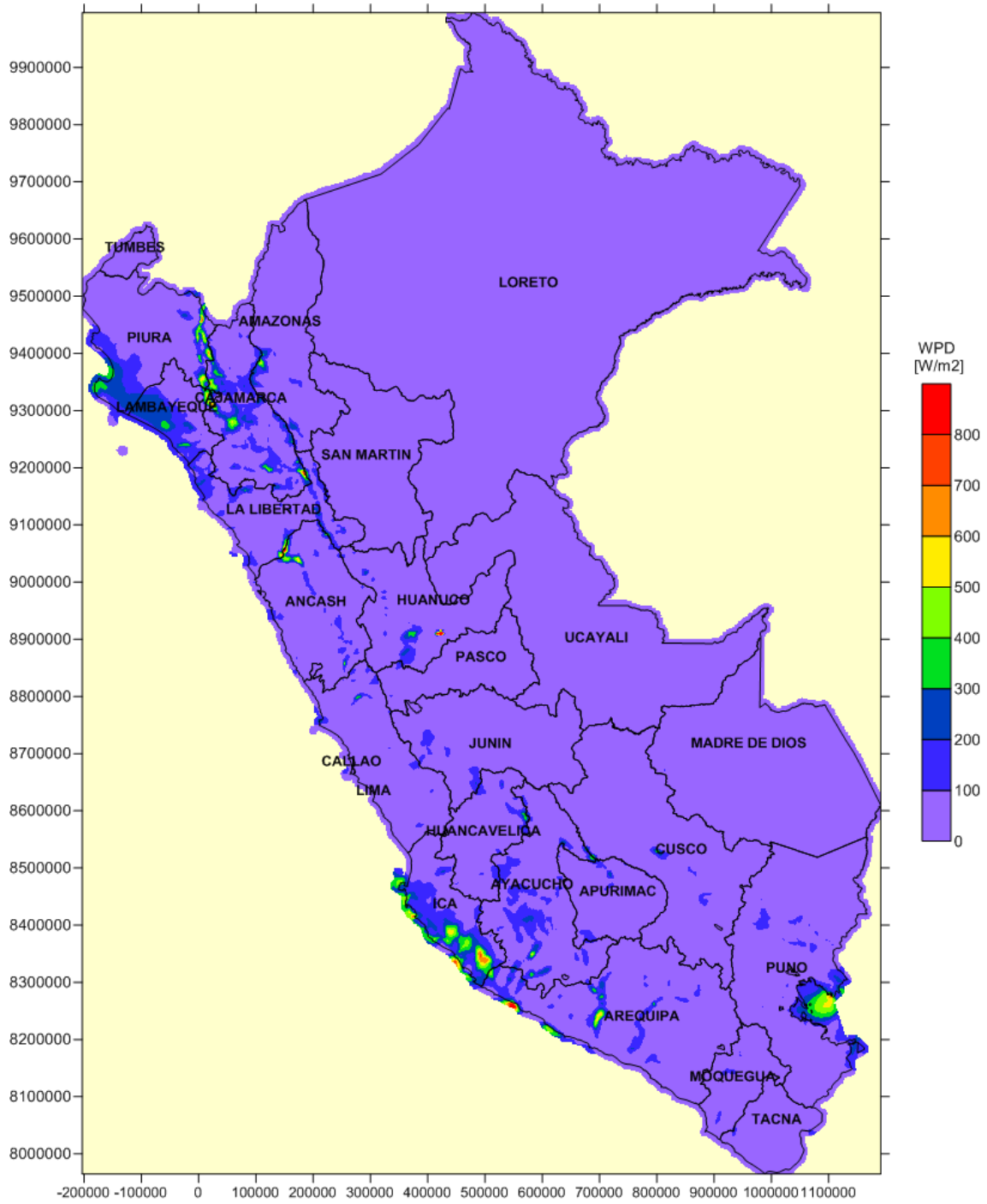


G.13. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN ENERO A 25 m

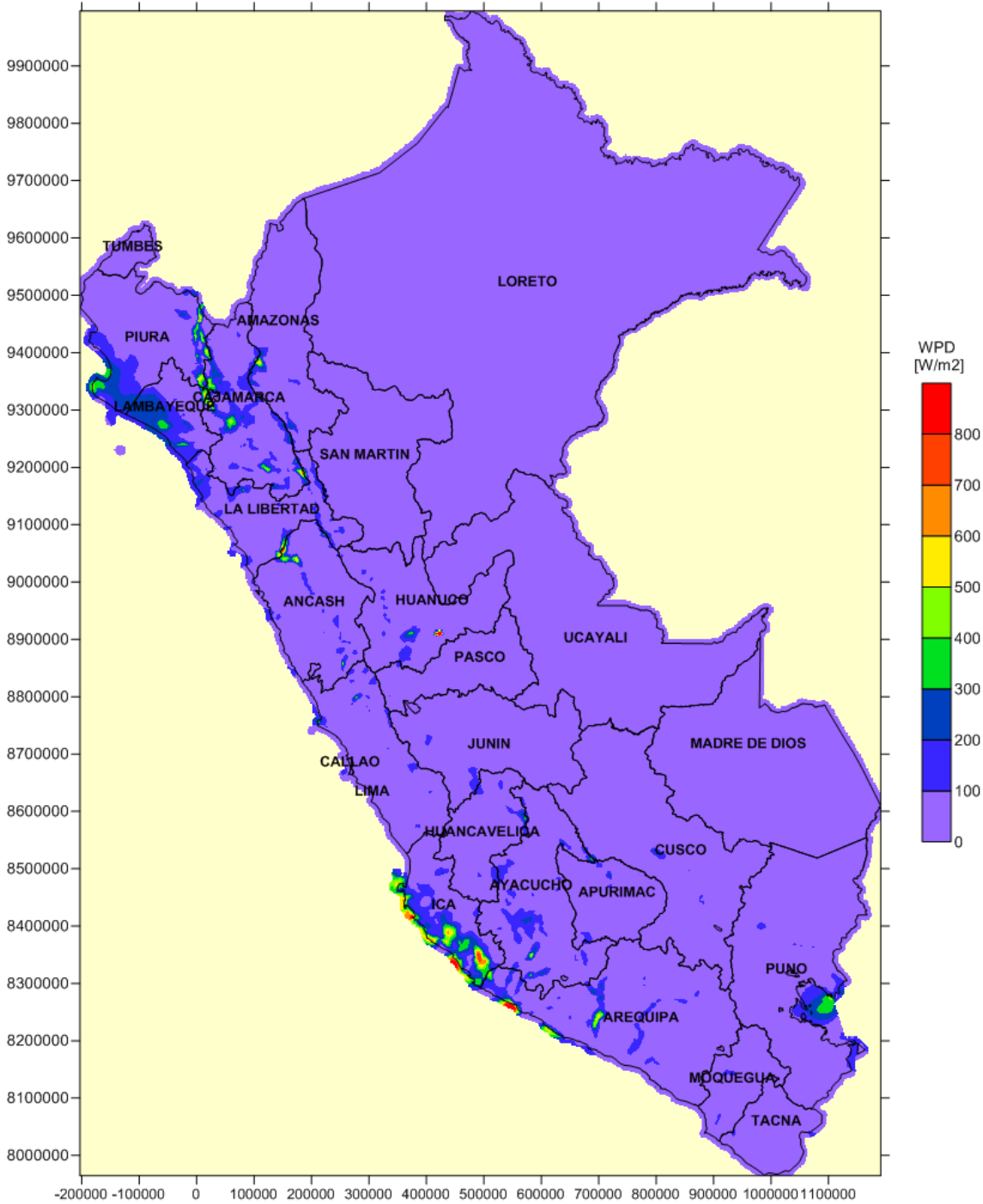




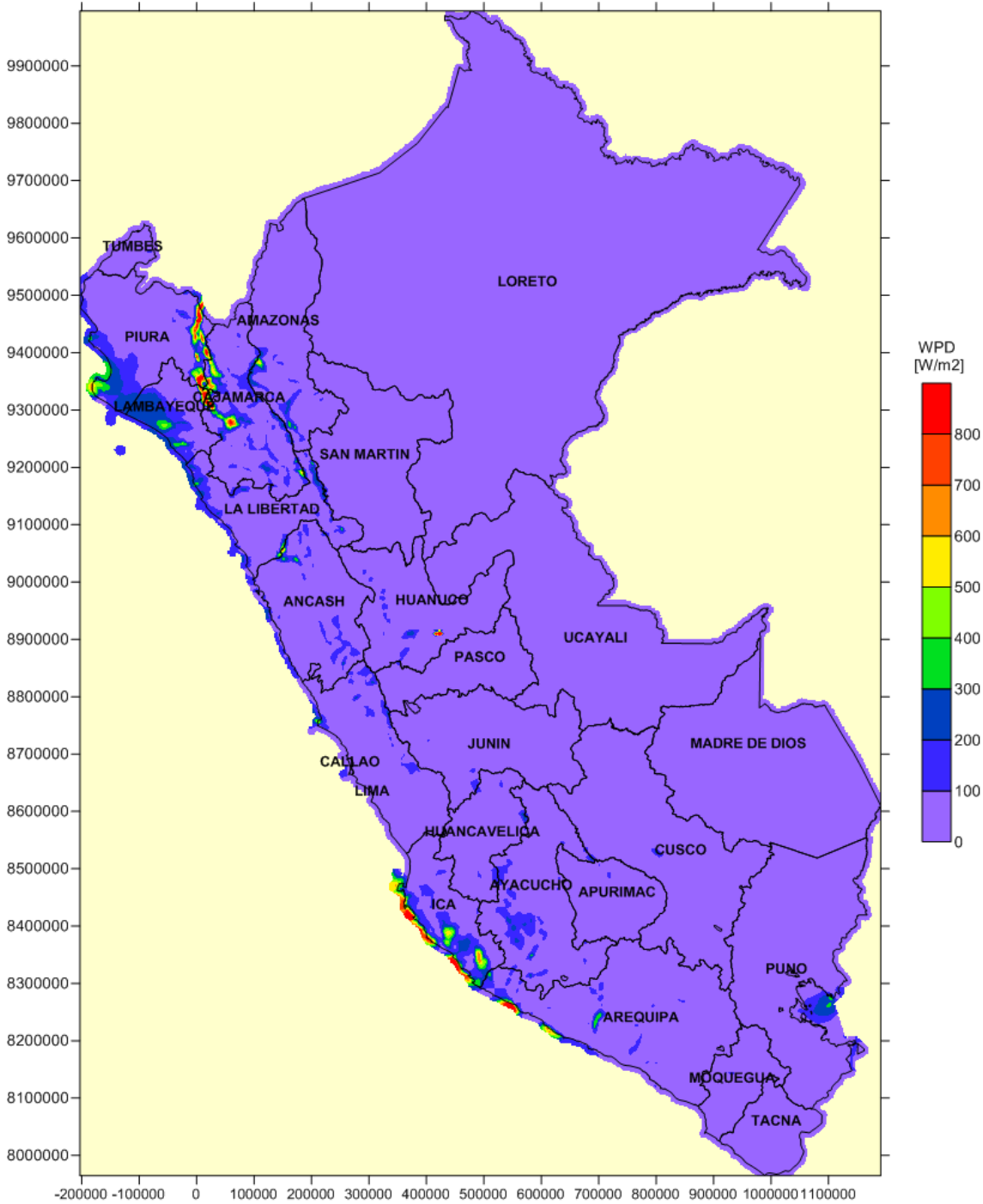
G.14. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN FEBRERO A 25 m



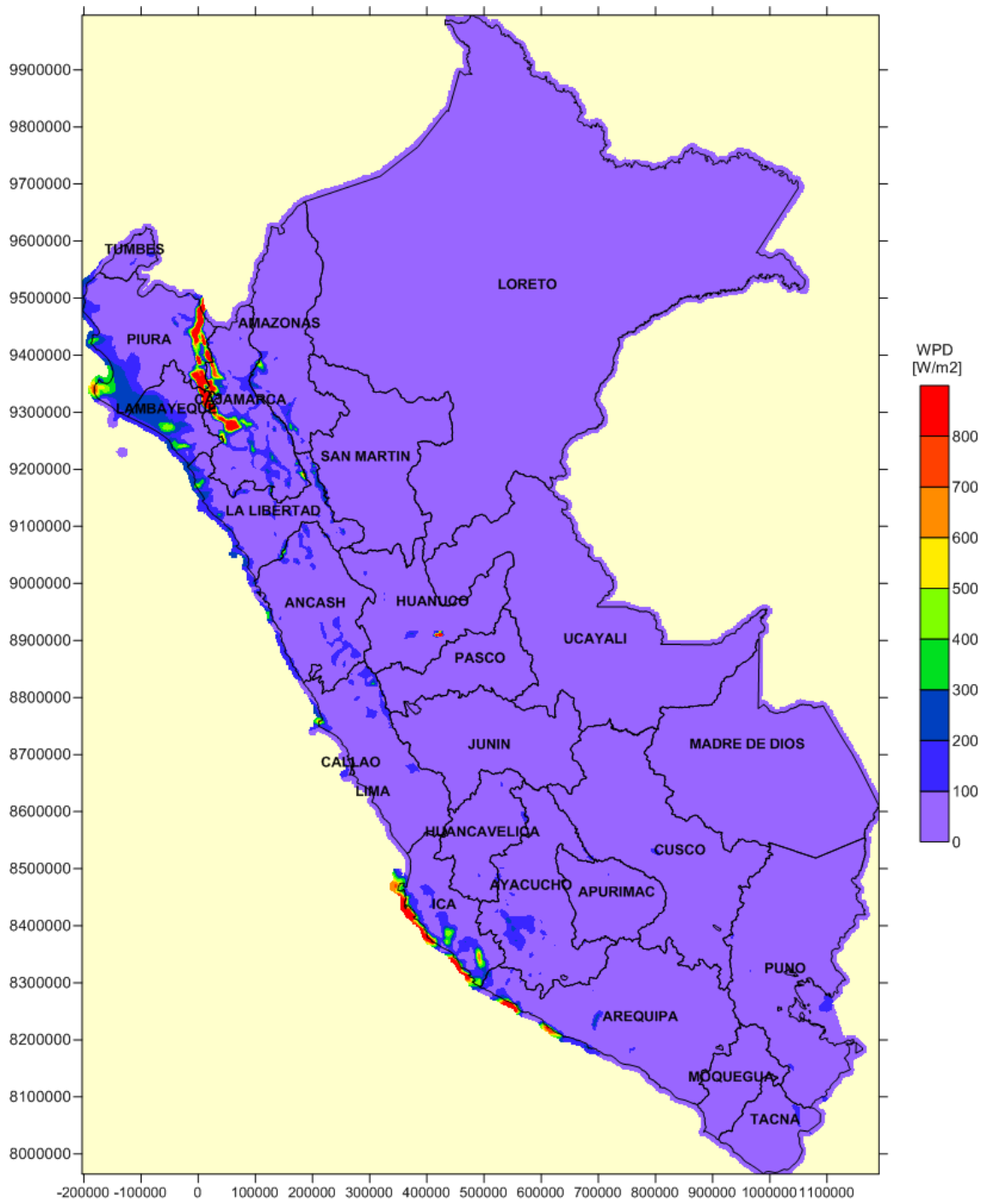
G.15. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN MARZO A 25 m



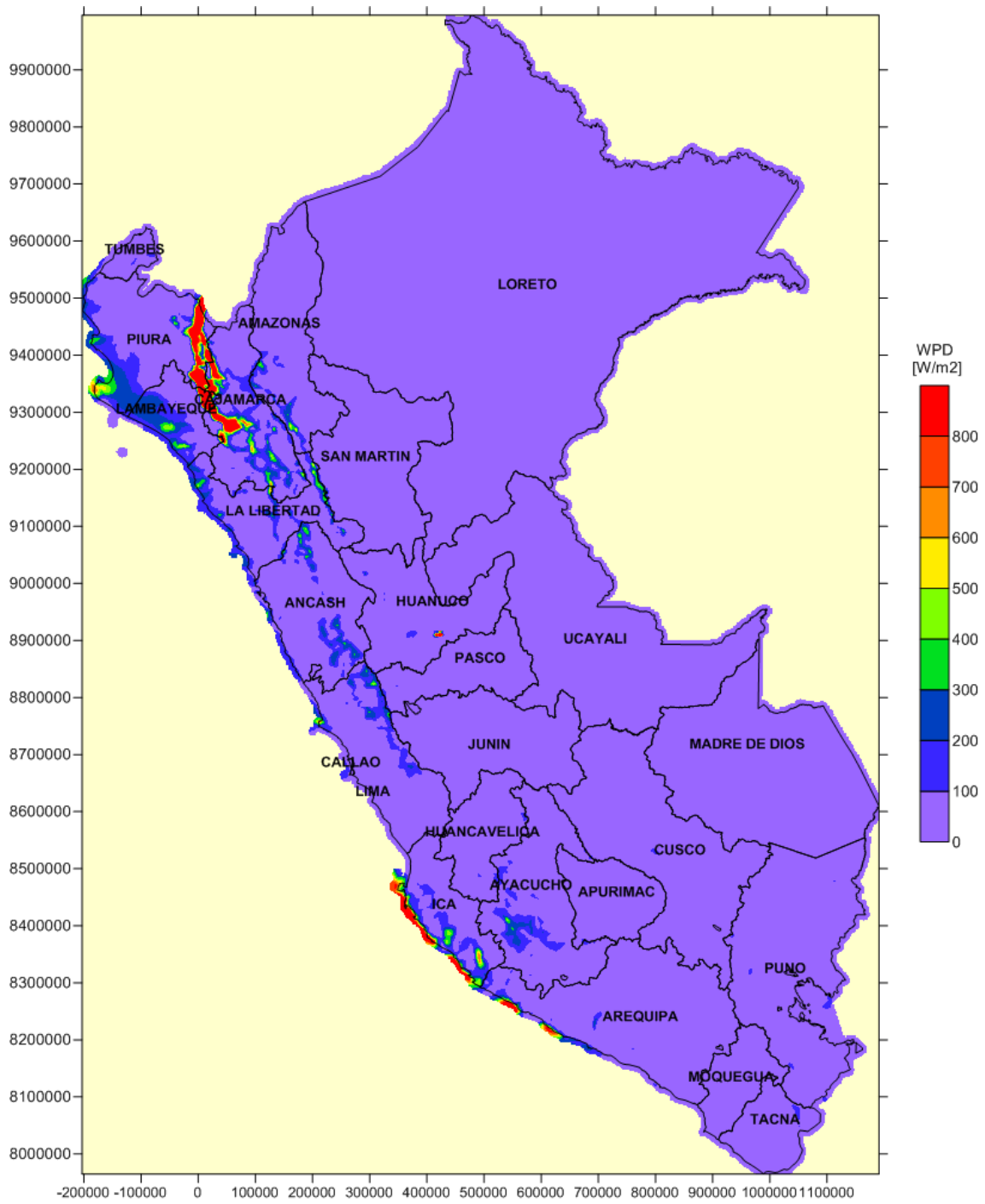
G.16. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN ABRIL A 25 m



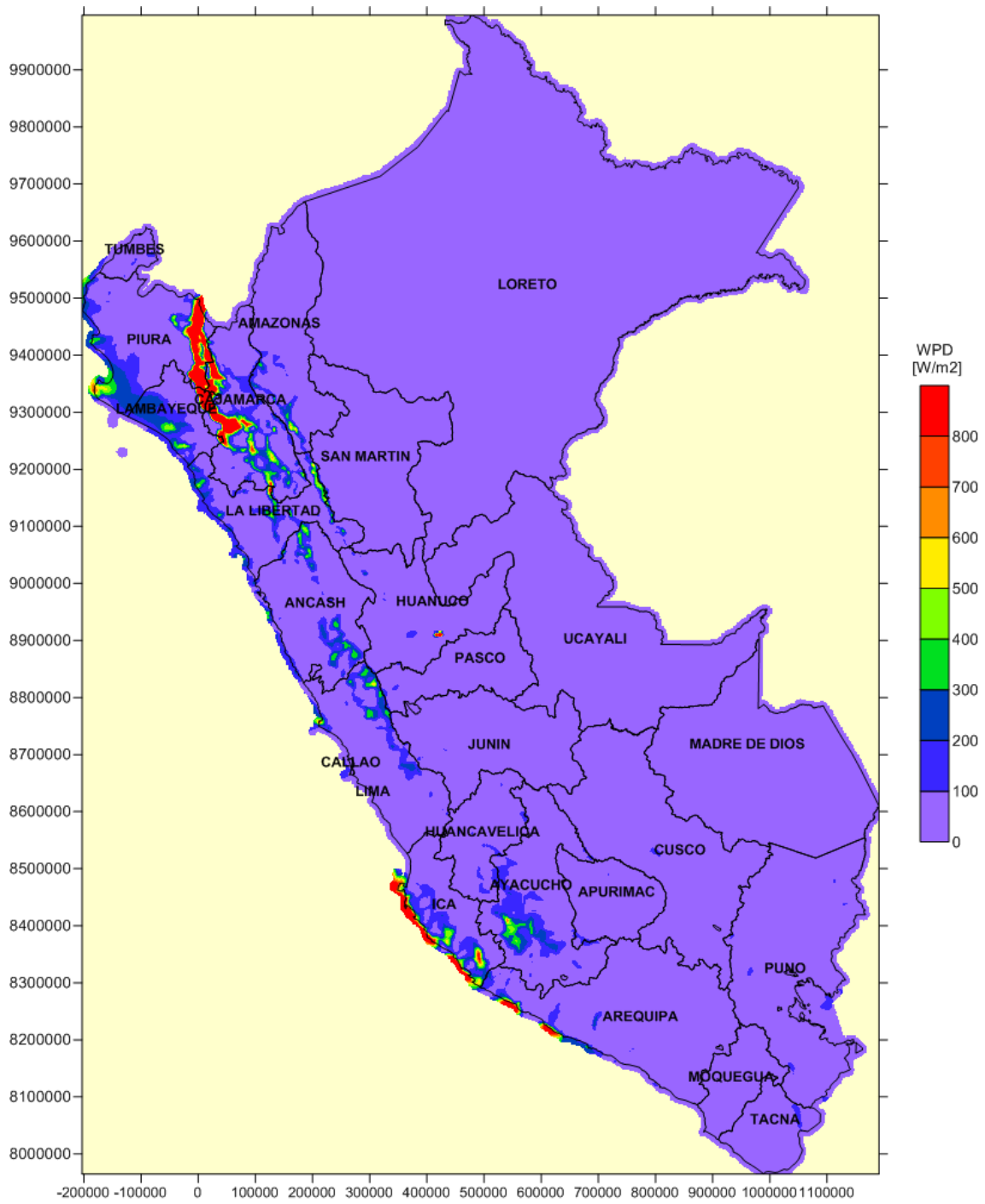
G.17. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN MAYO A 25 m



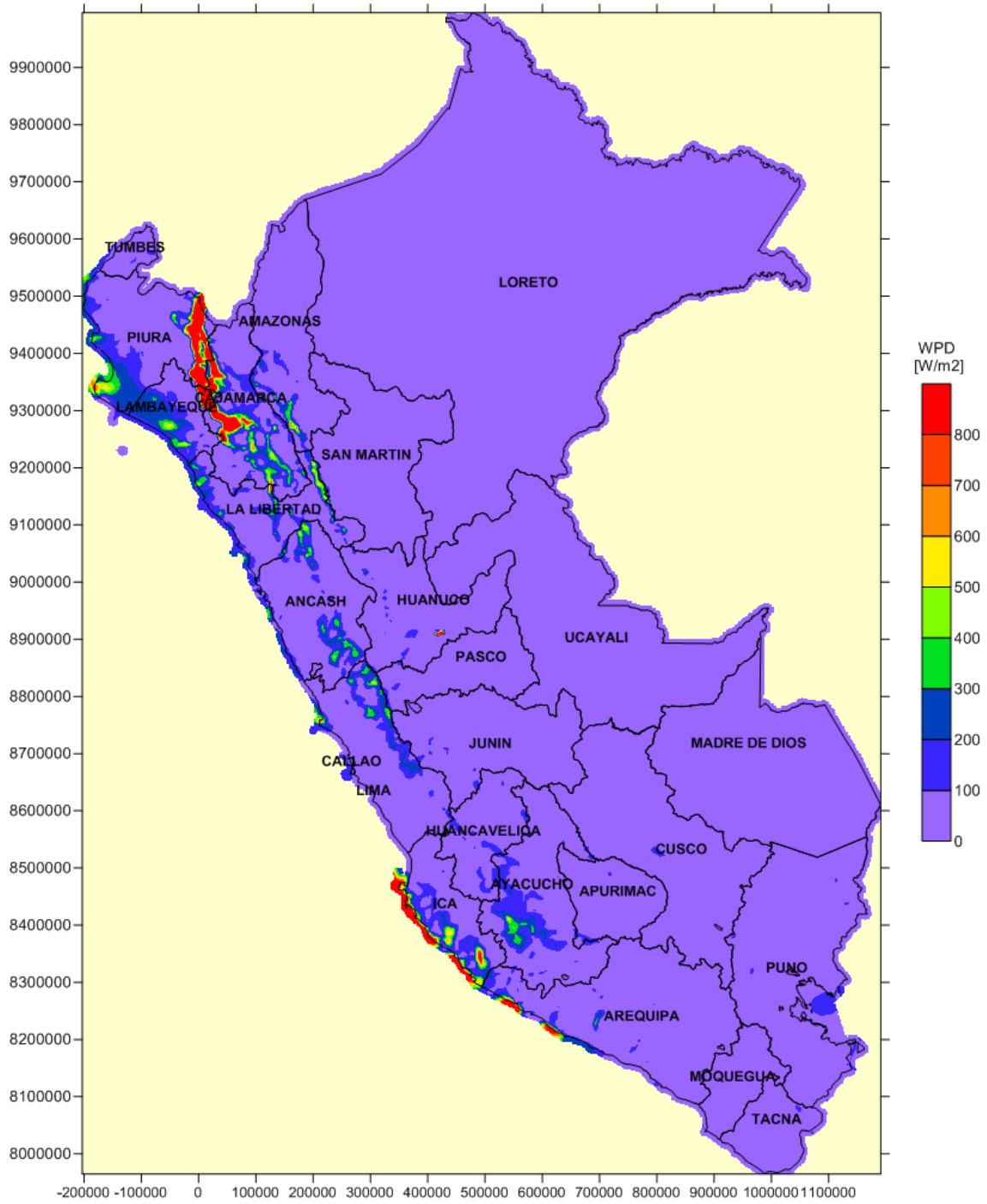
G.18. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN JUNIO A 25 m



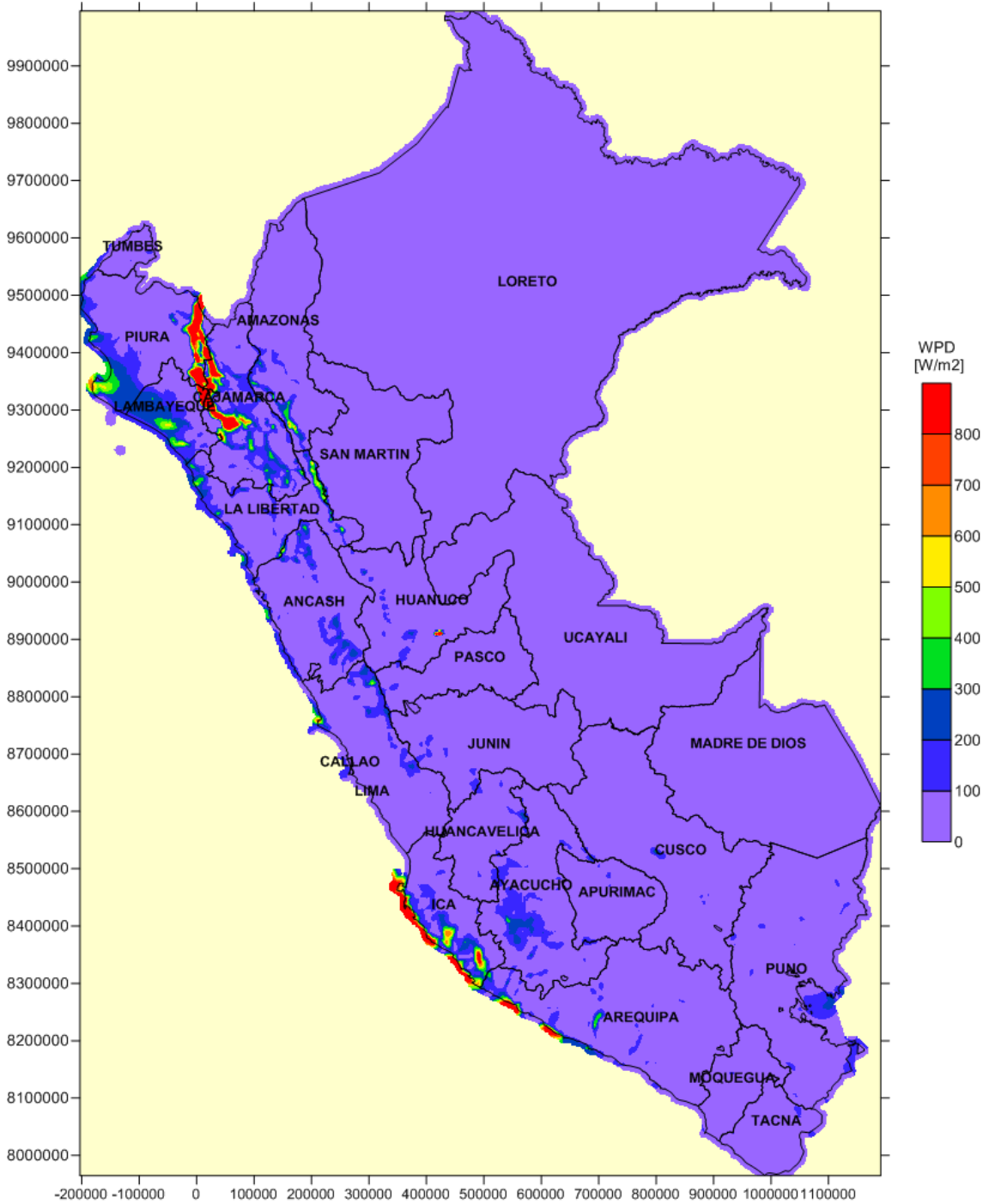
G.19. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN JULIO A 25 m



G.20. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN AGOSTO A 25 m

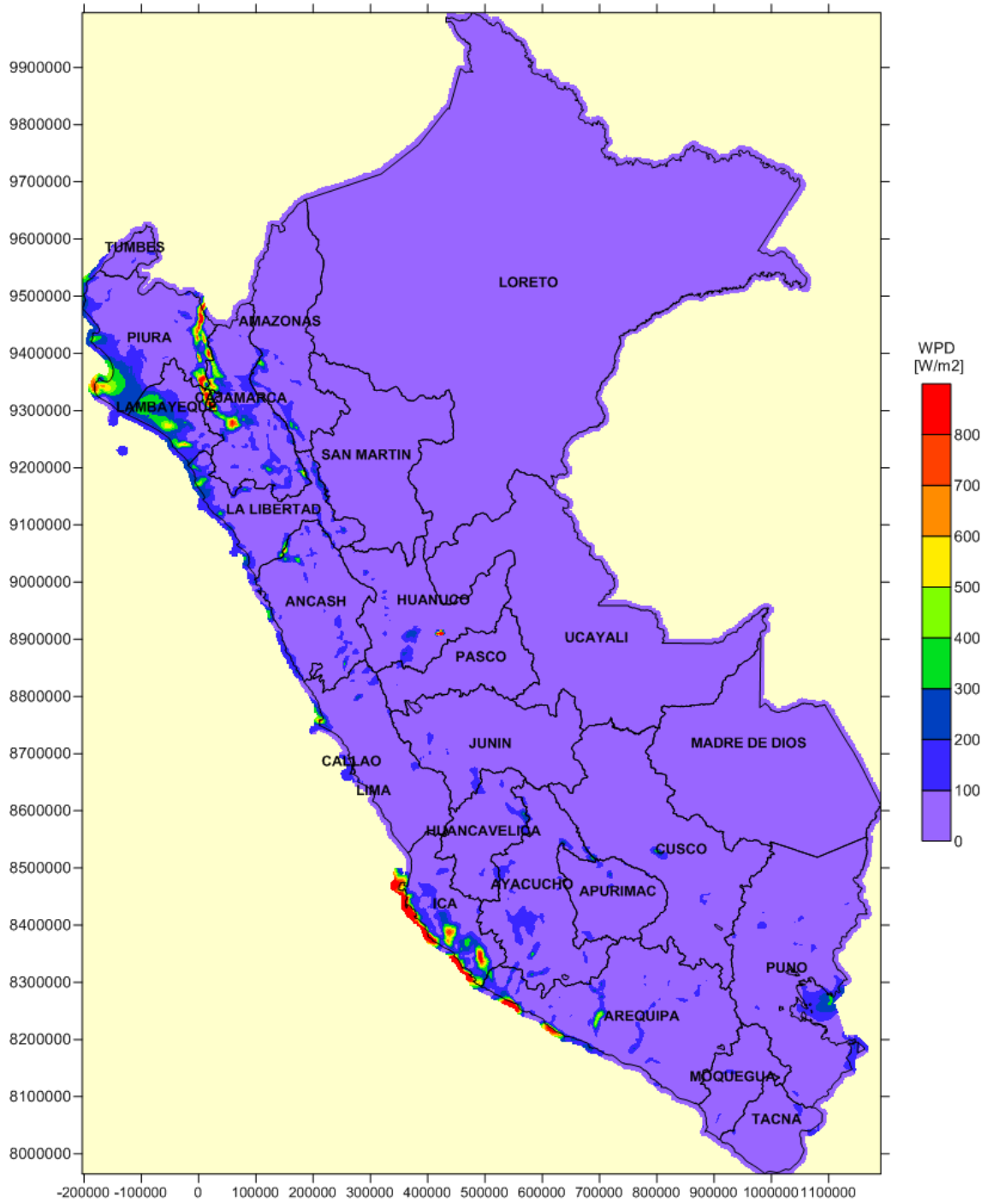


G.21. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN SEPTIEMBRE A 25 m

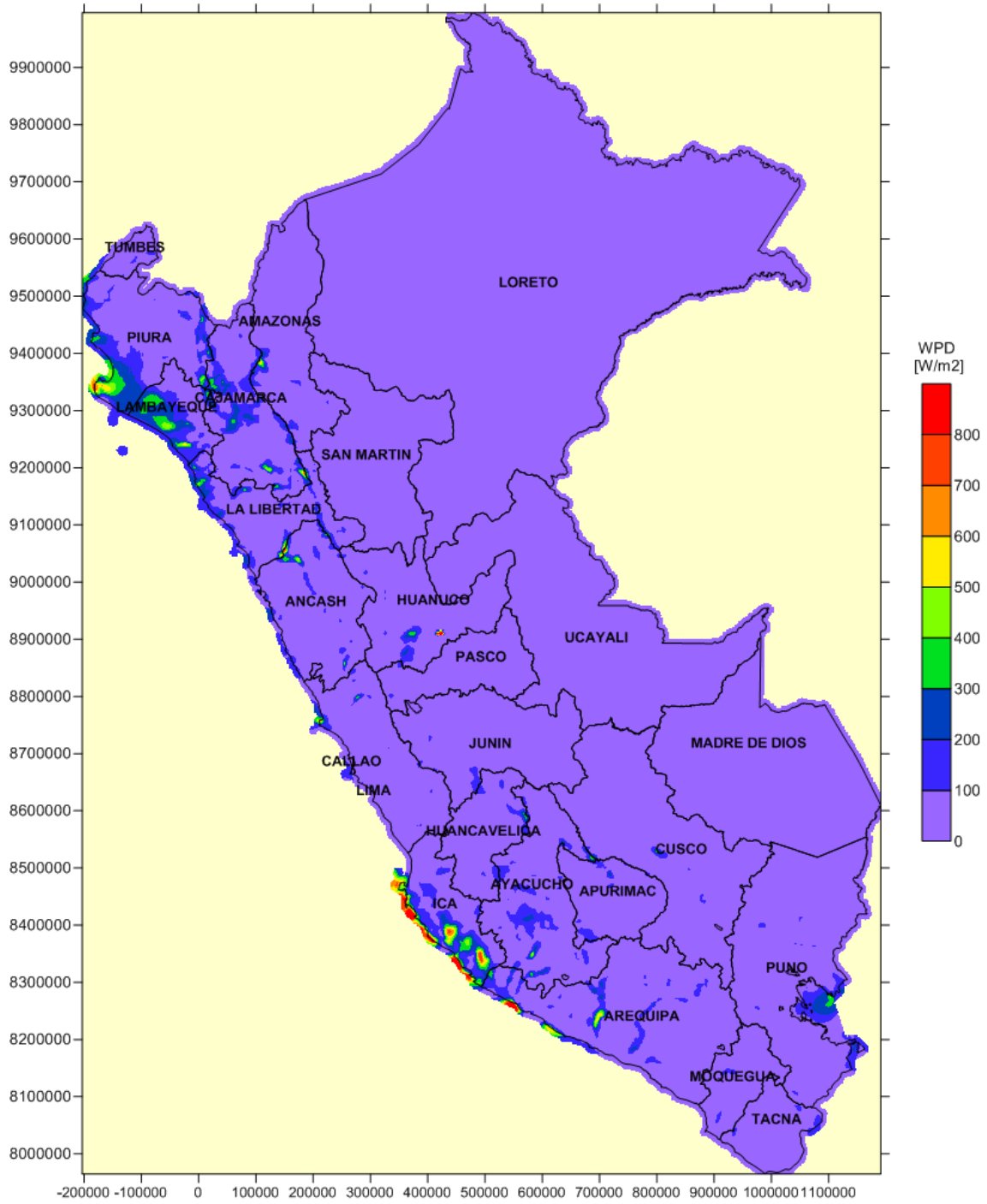




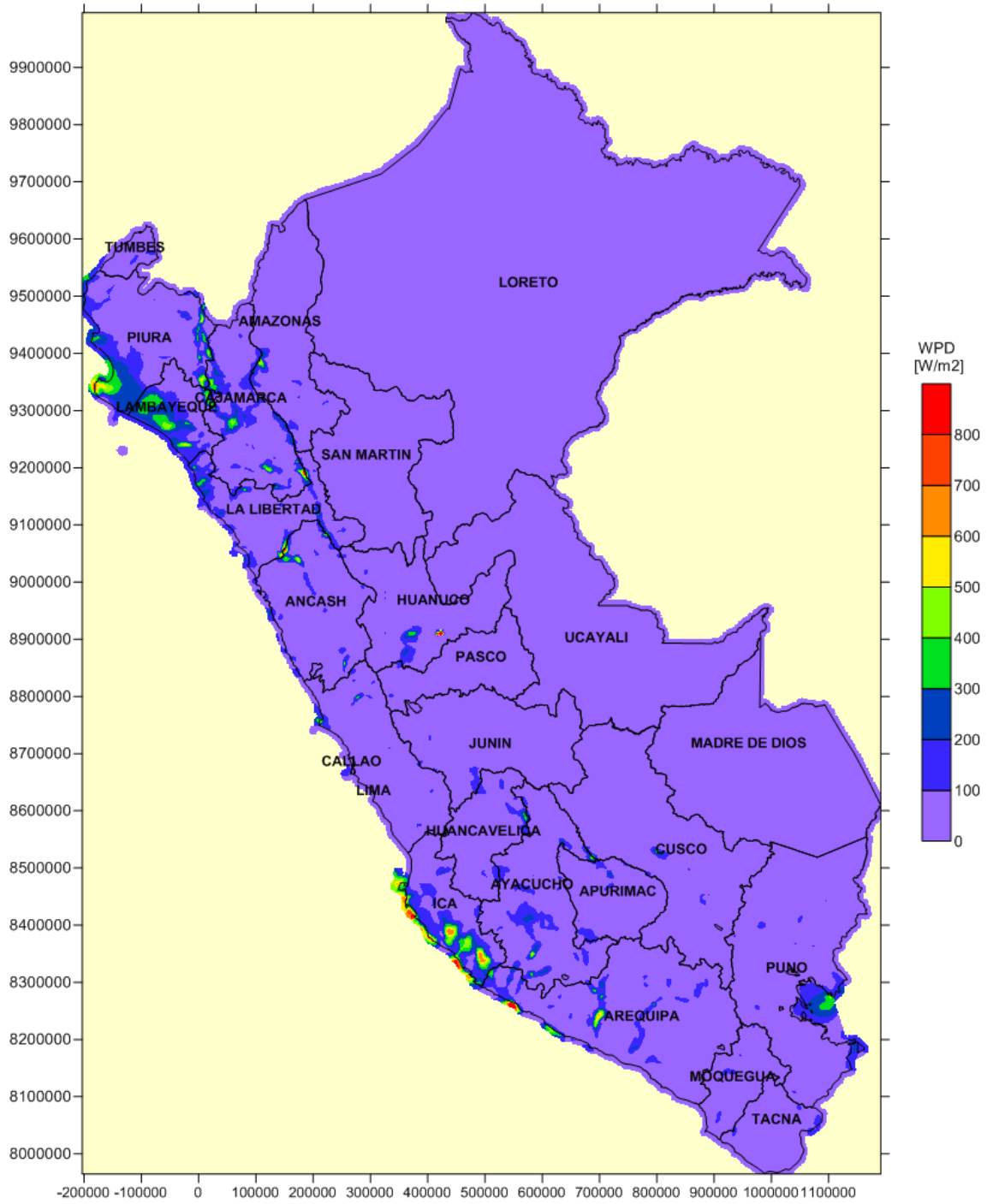
G.22. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN OCTUBRE A 25 m



G.23. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN NOVIEMBRE A 25 m

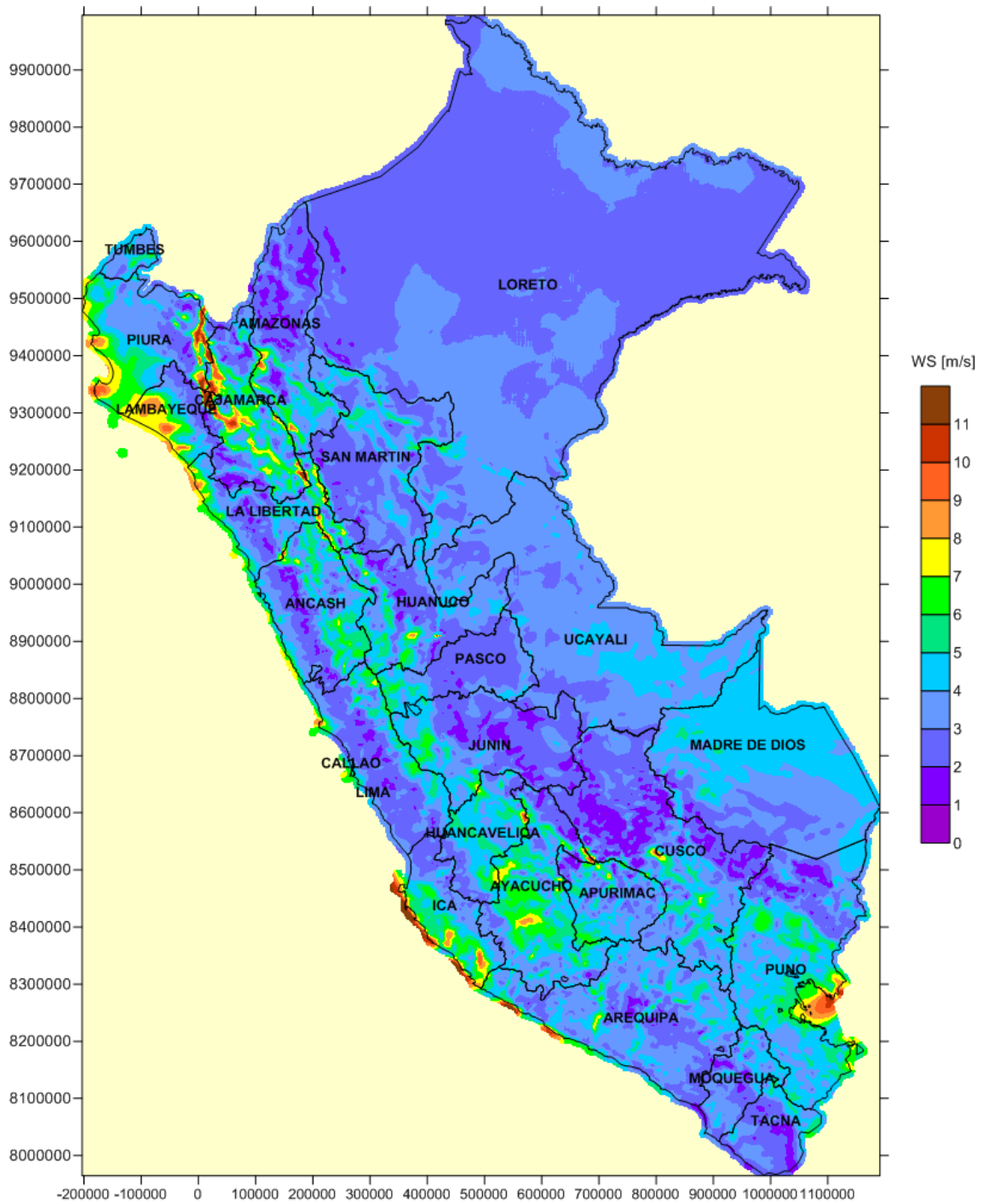


G.24. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN DICIEMBRE A 25 m

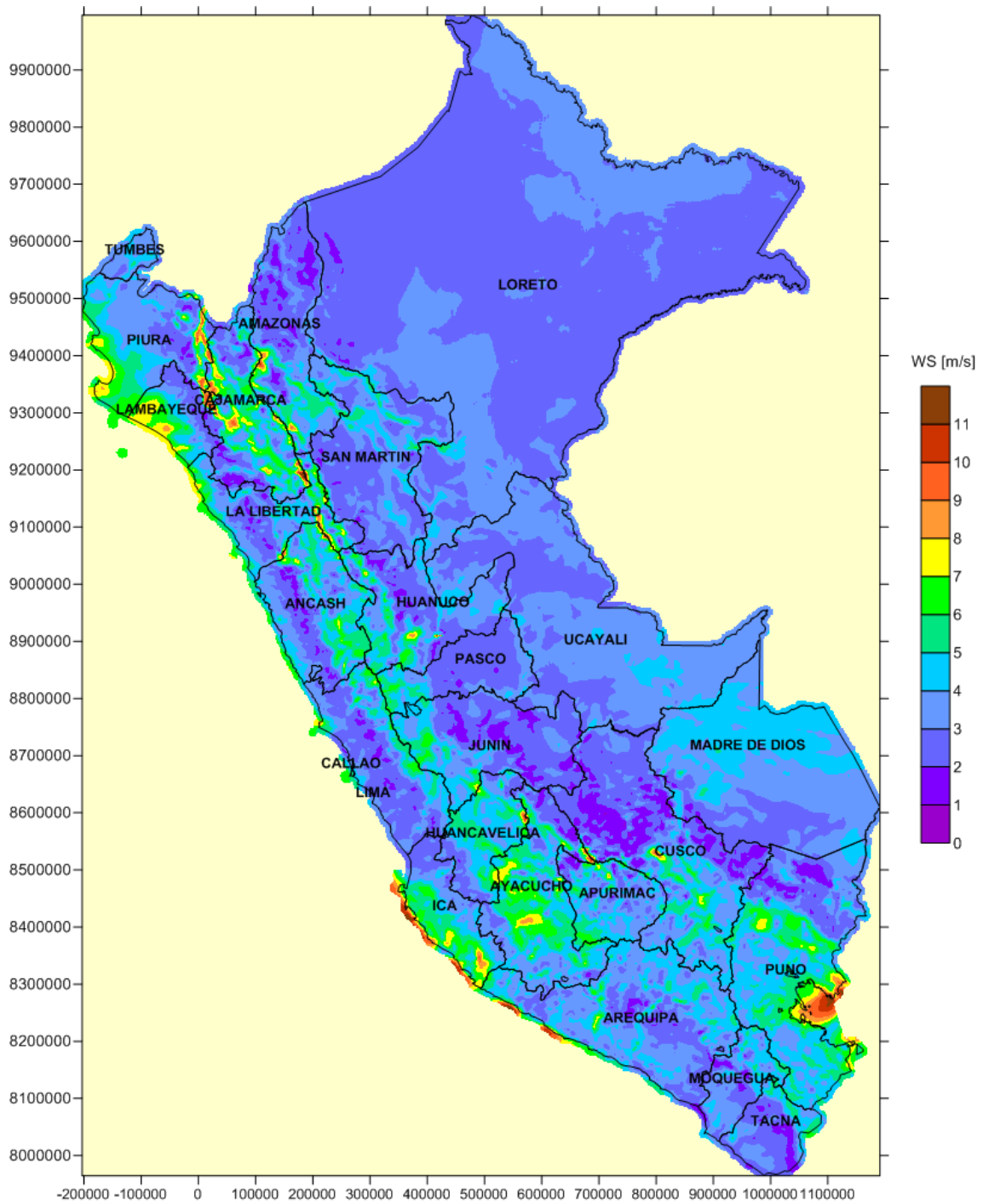


**ANEXO H.**  
**MAPAS DE POTENCIAL EÓLICO**  
**MENSUALES (75m)**

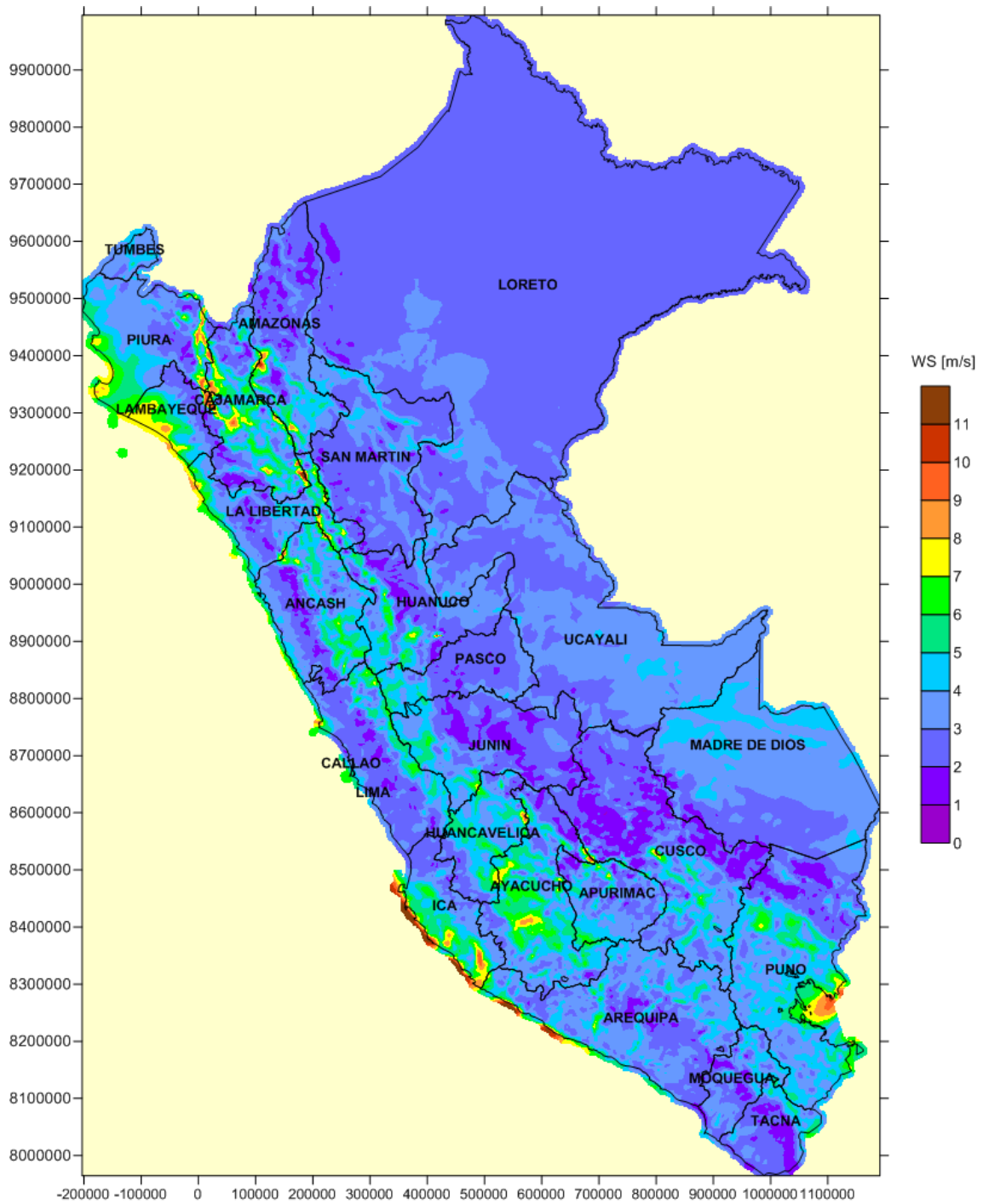
### H.1. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN ENERO A 75 m



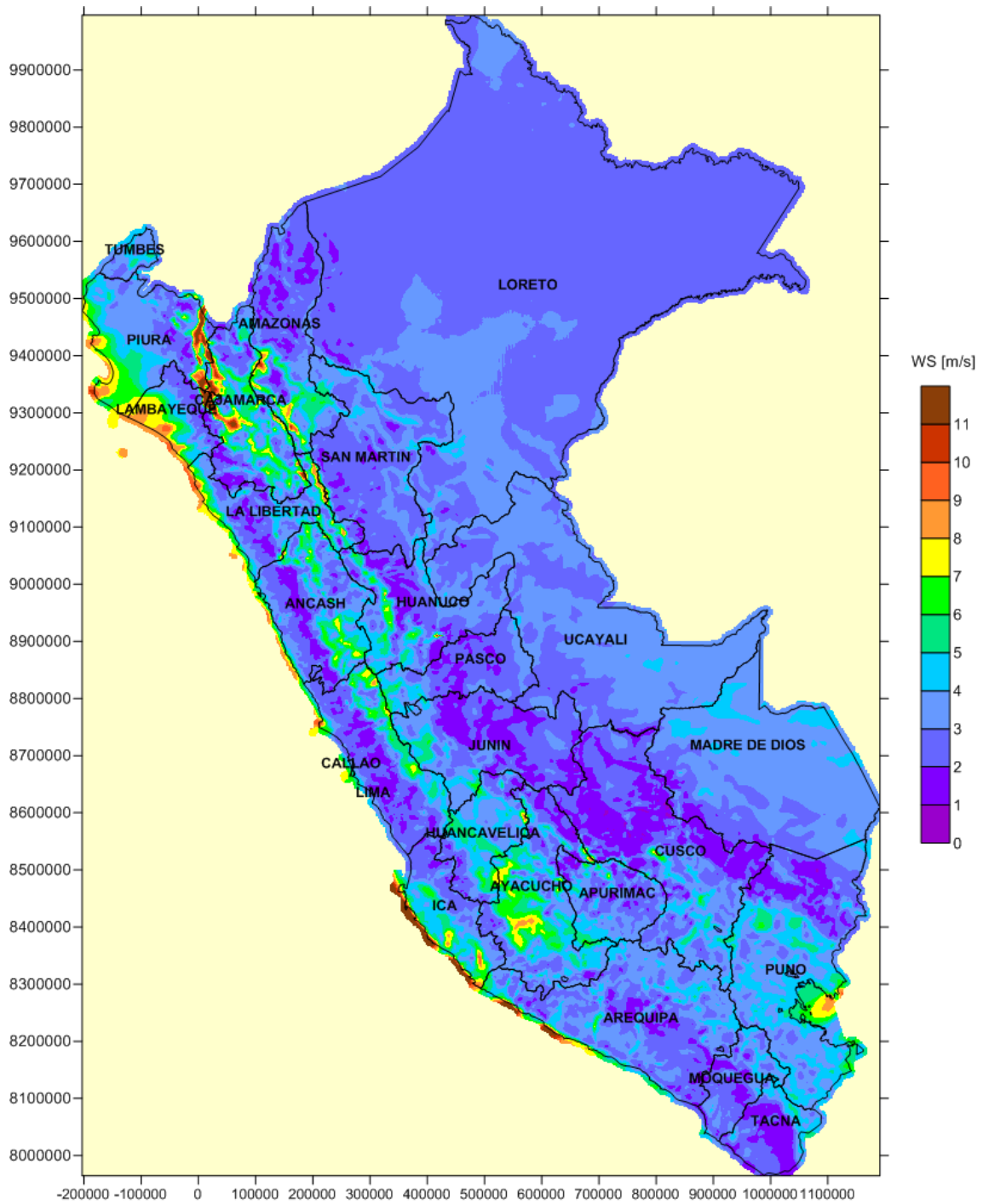
## H.2. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN FEBRERO A 75 m



### H.3. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN MARZO A 75 m

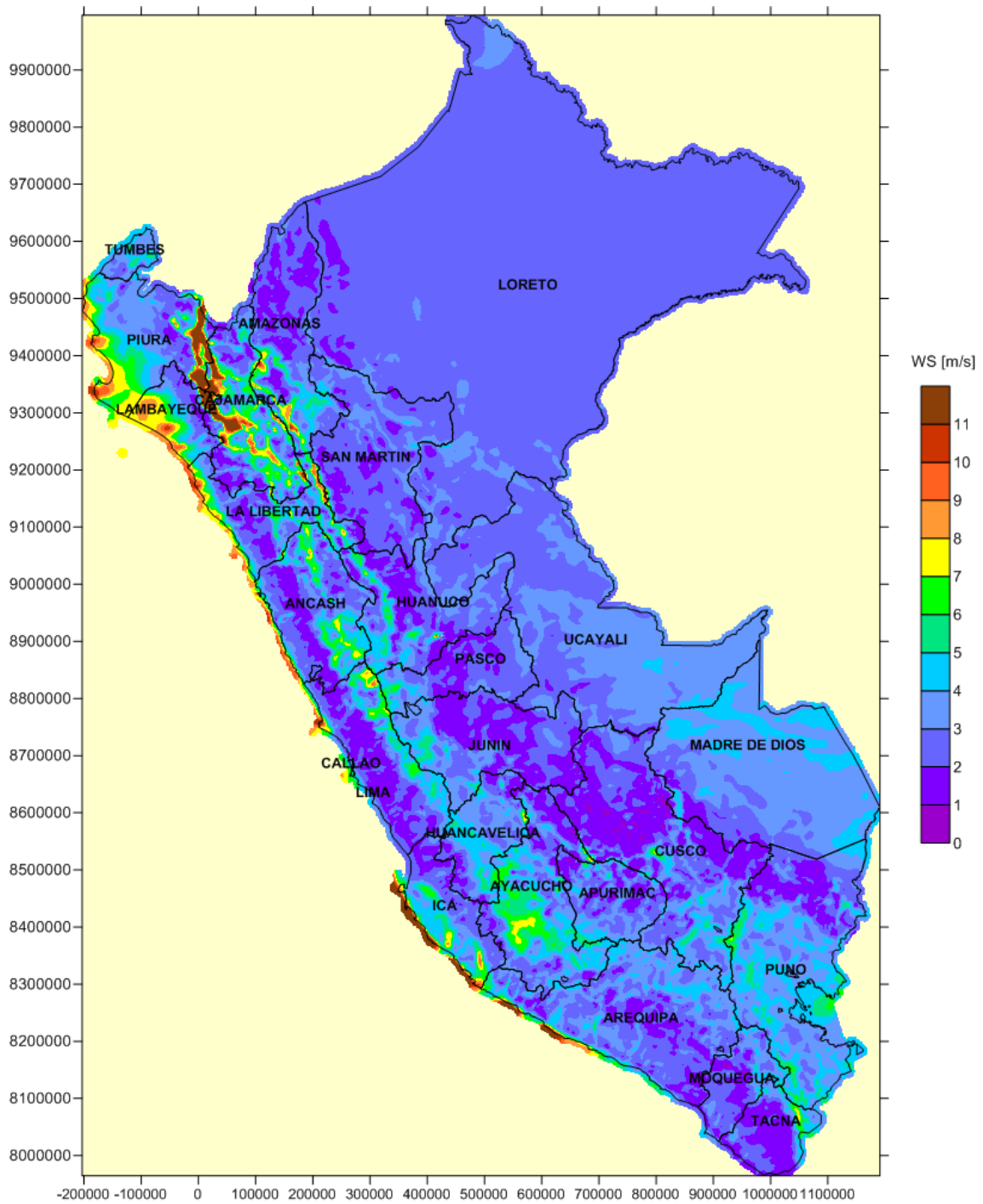


#### H.4. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN ABRIL A 75 m

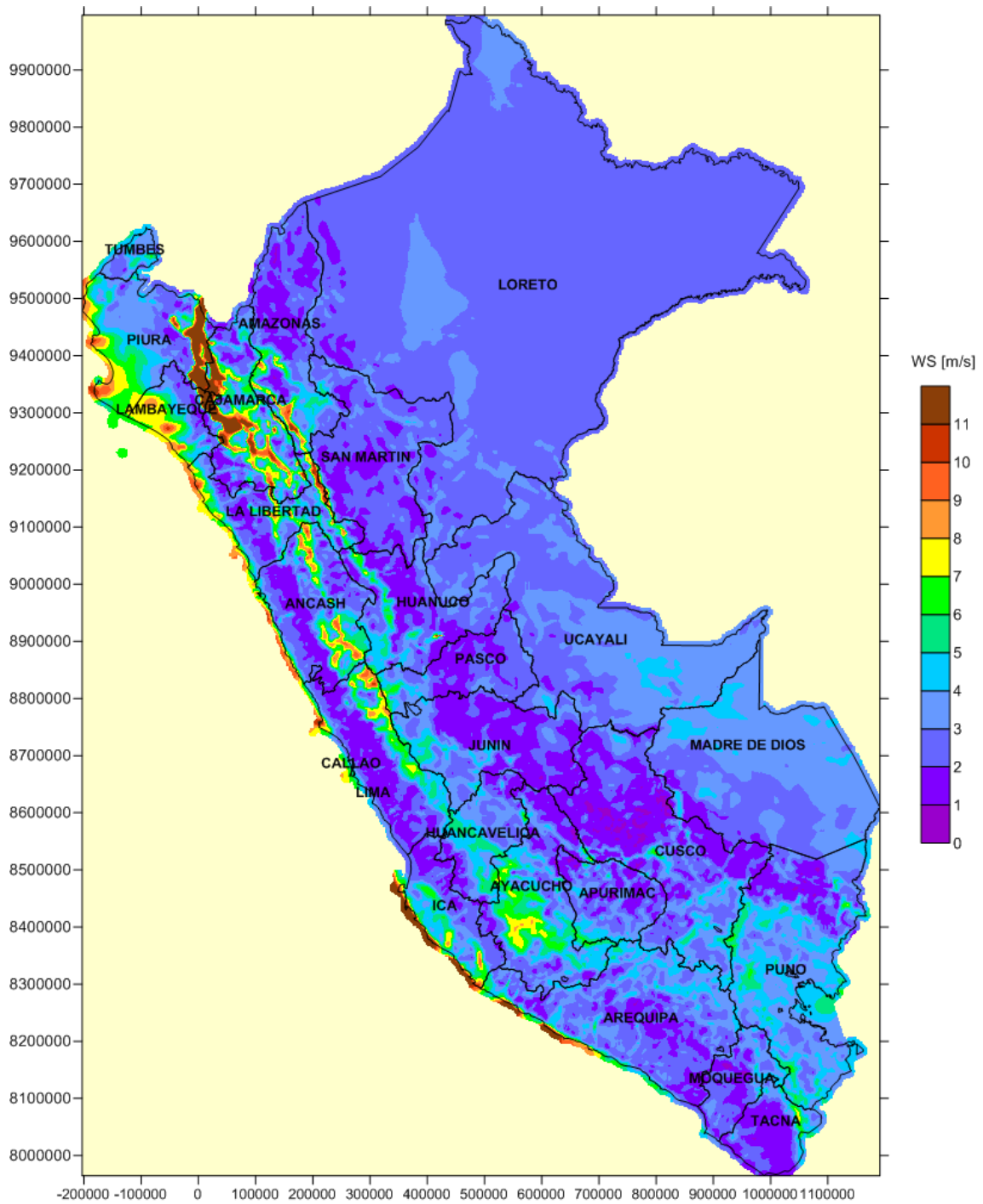




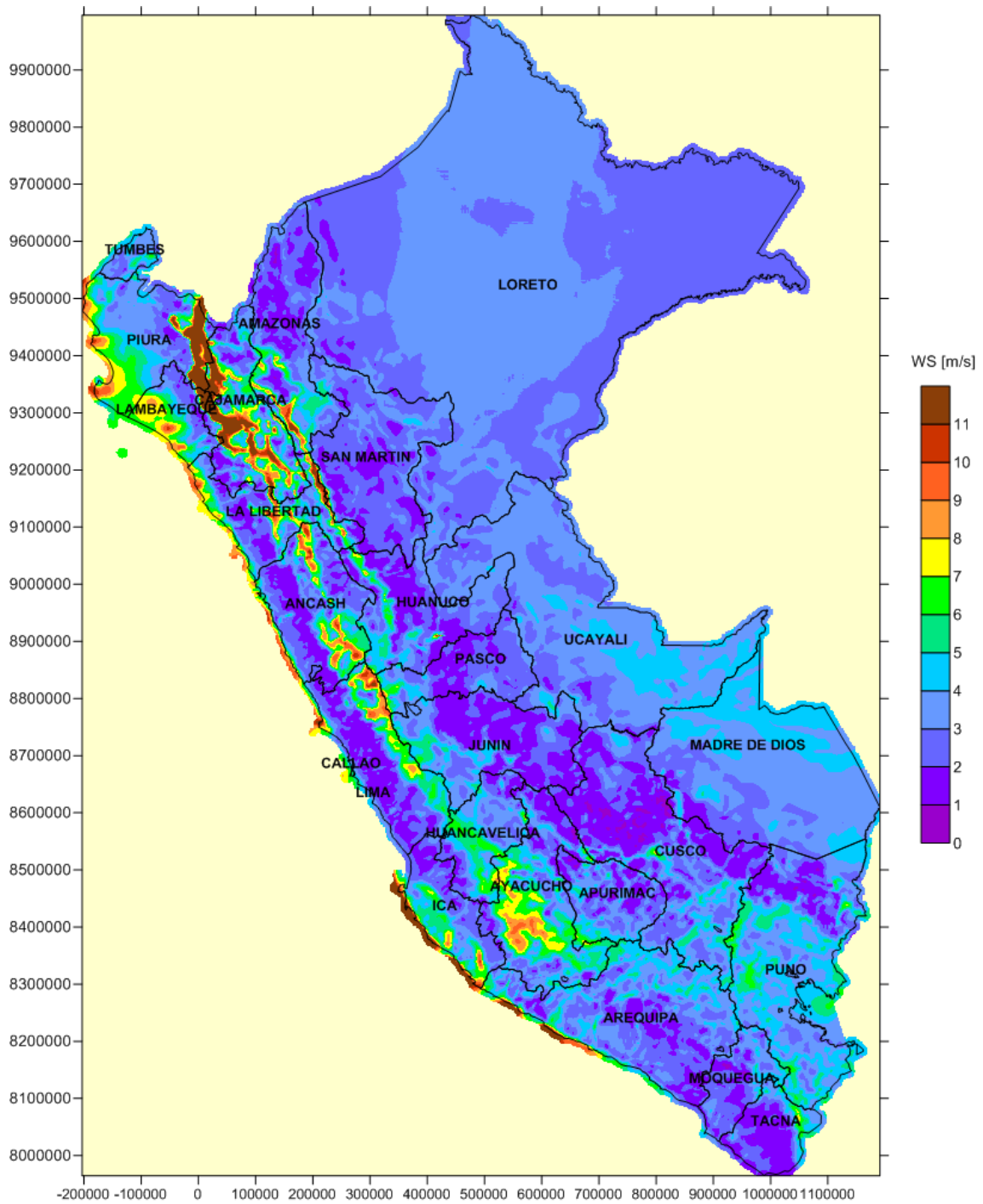
### H.5. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN MAYO A 75 m



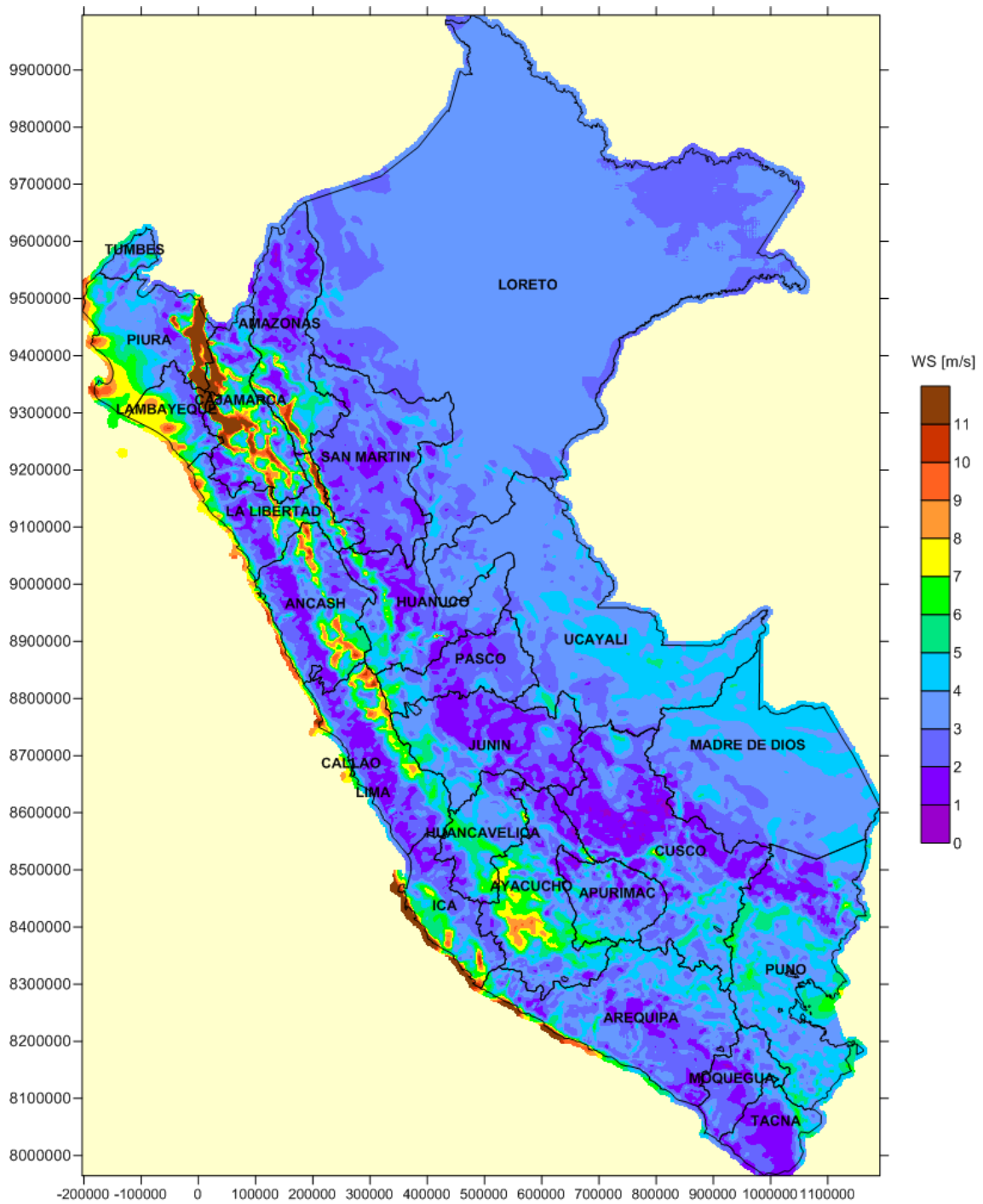
### H.6. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN JUNIO A 75 m



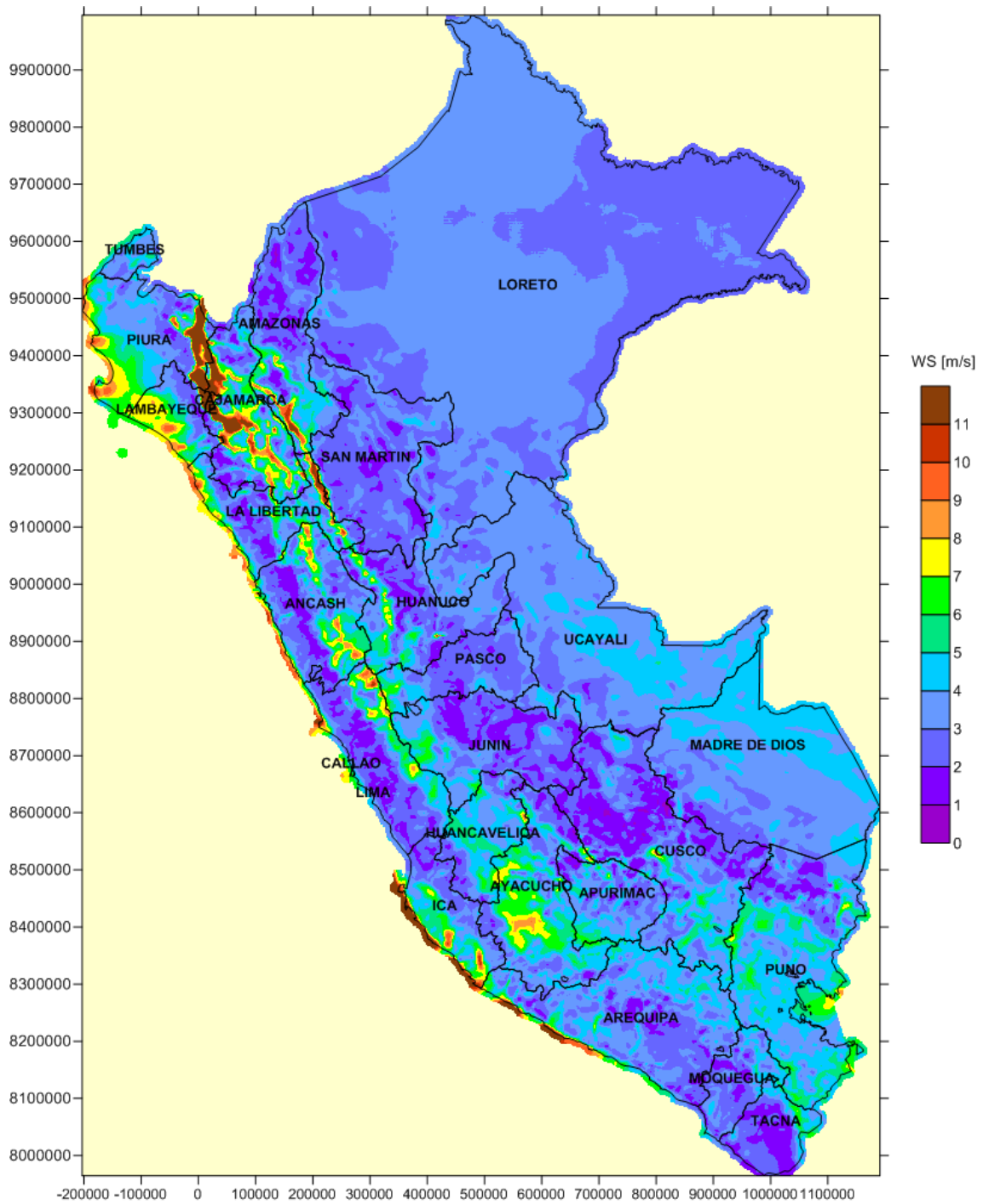
### H.7. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN JULIO A 75 m



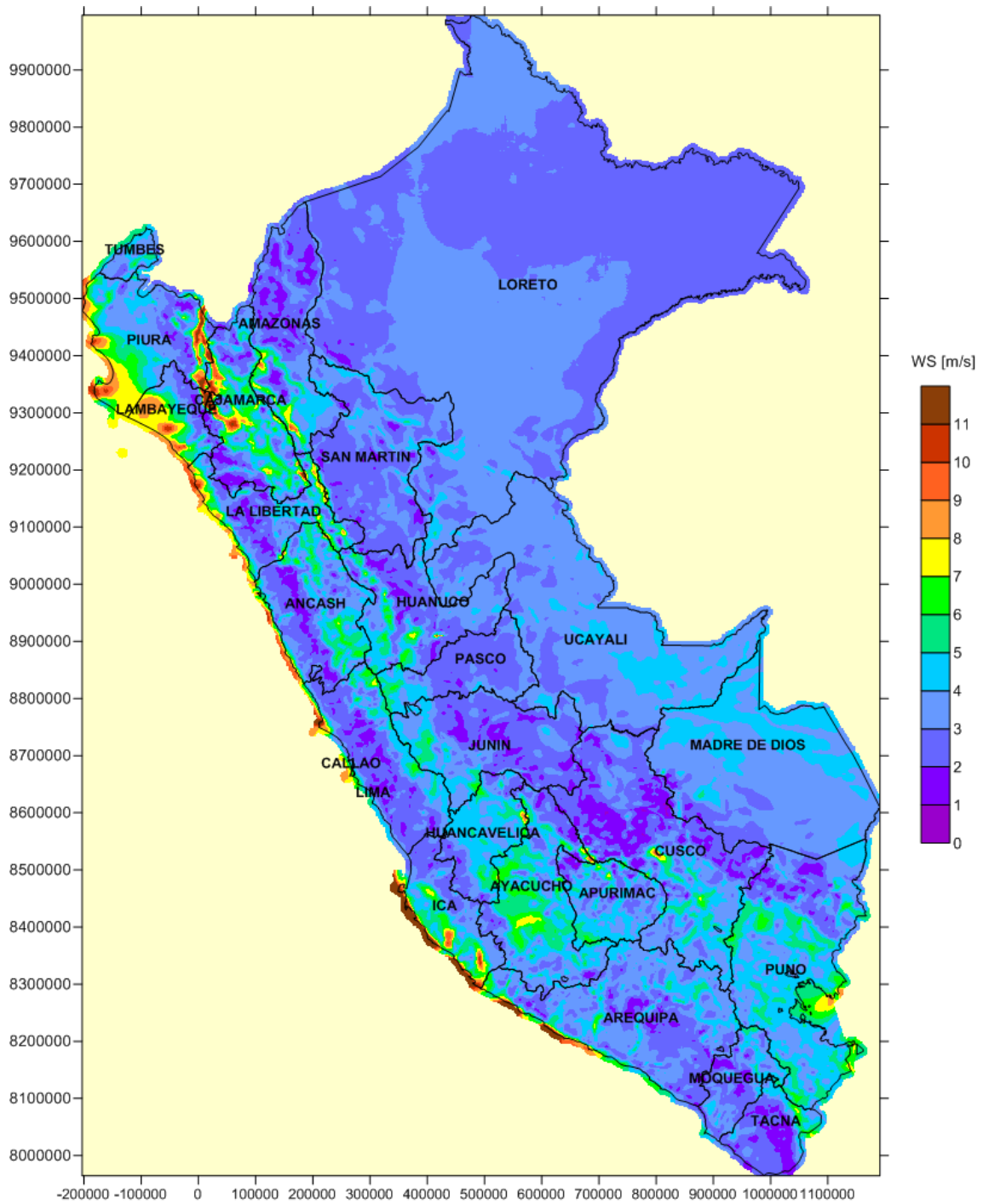
### H.8. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN AGOSTO A 75 m



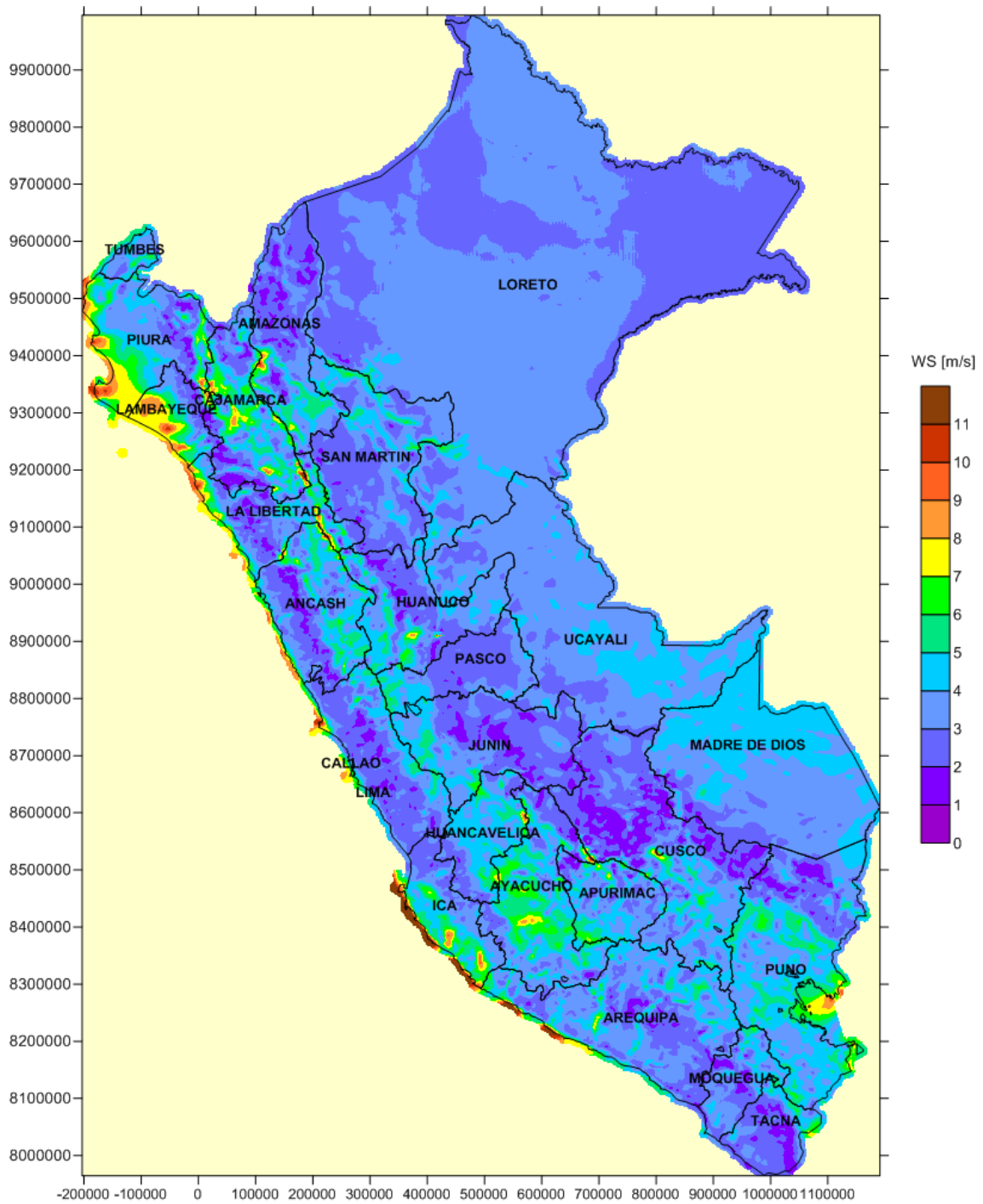
### H.9. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN SEPTIEMBRE A 75 m



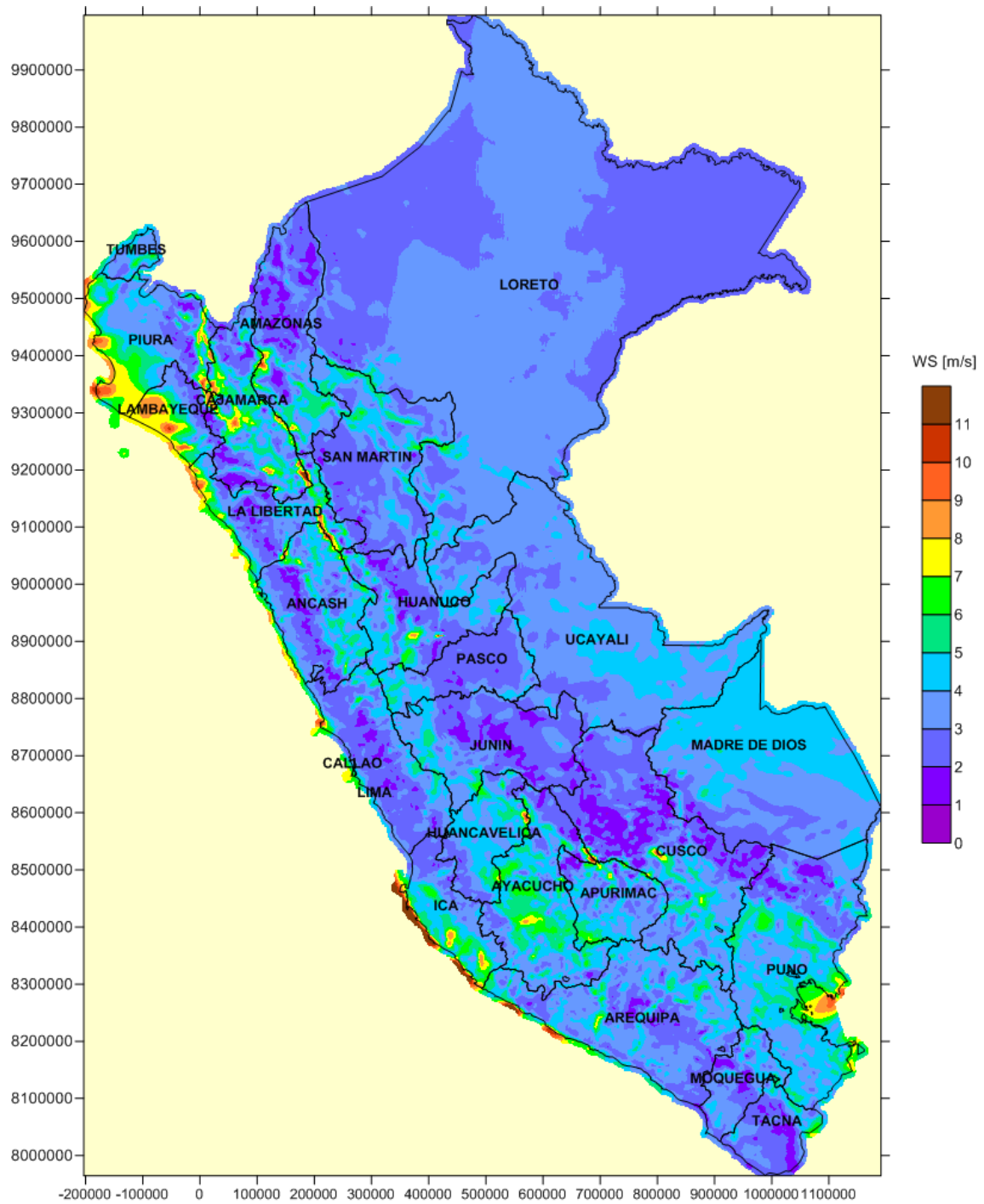
### H.10. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN OCTUBRE A 75 m



### H.11. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN NOVIEMBRE A 75 m

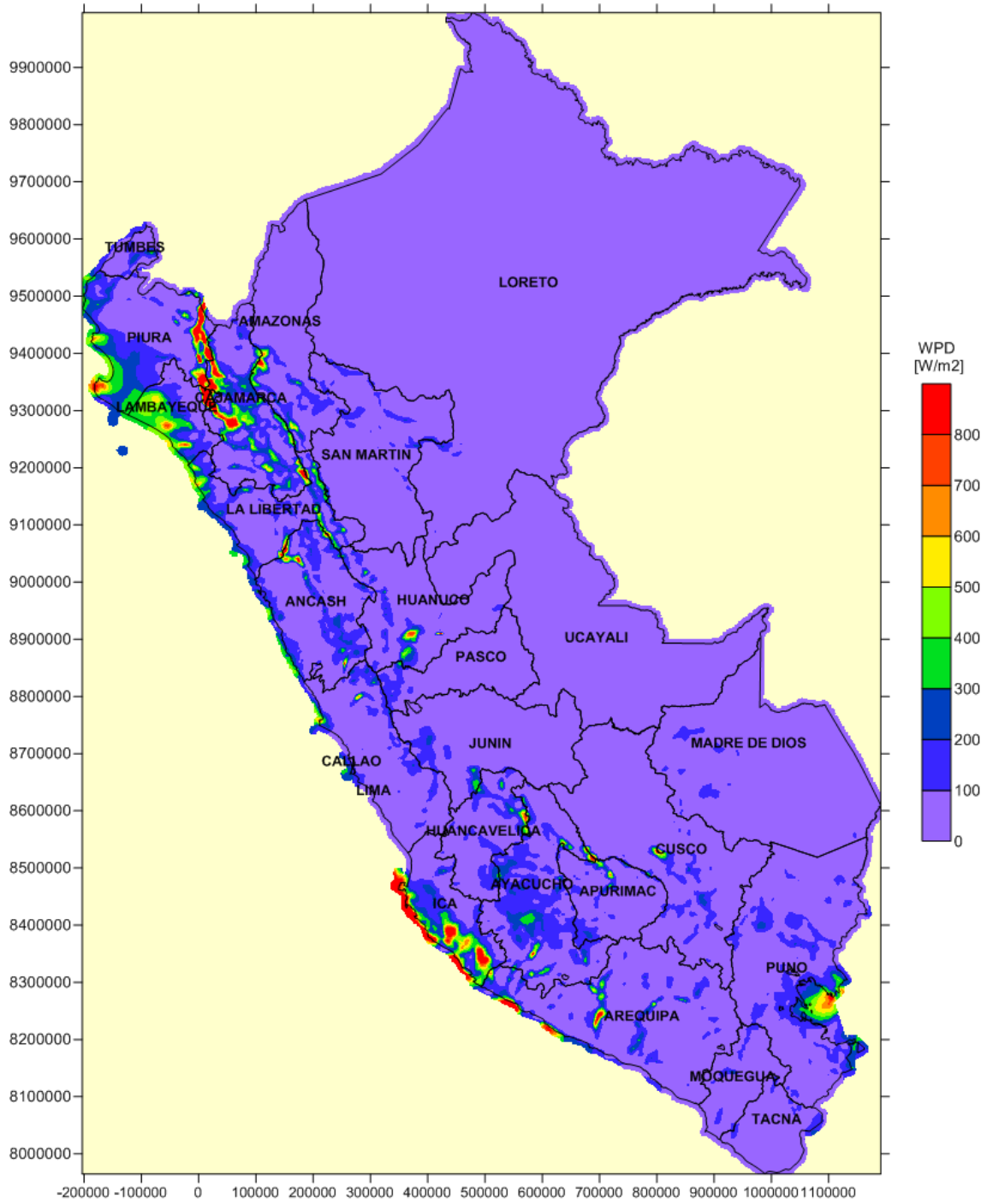


## H.12. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN DICIEMBRE A 75 m

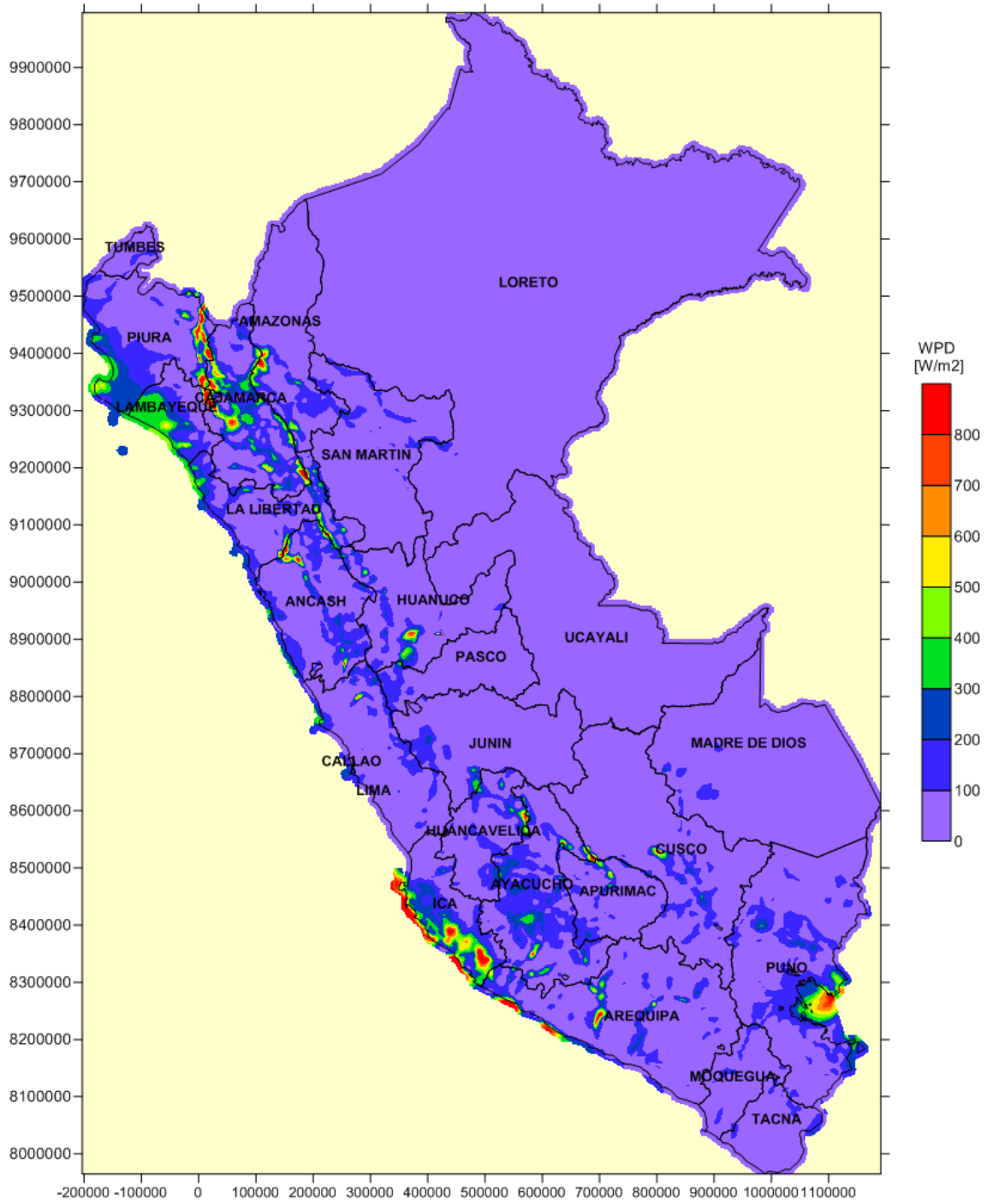




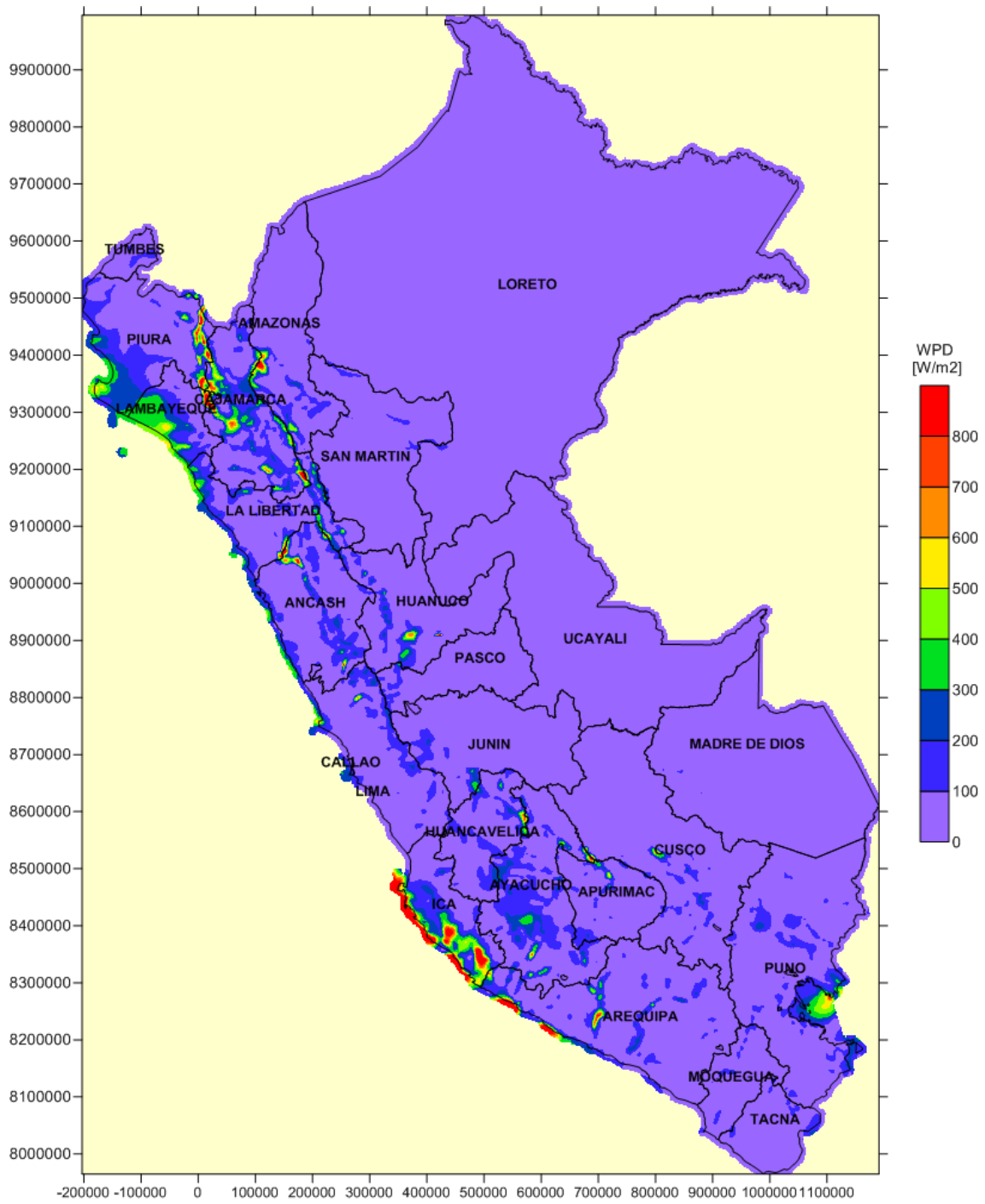
### H.13. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN ENERO A 75 m



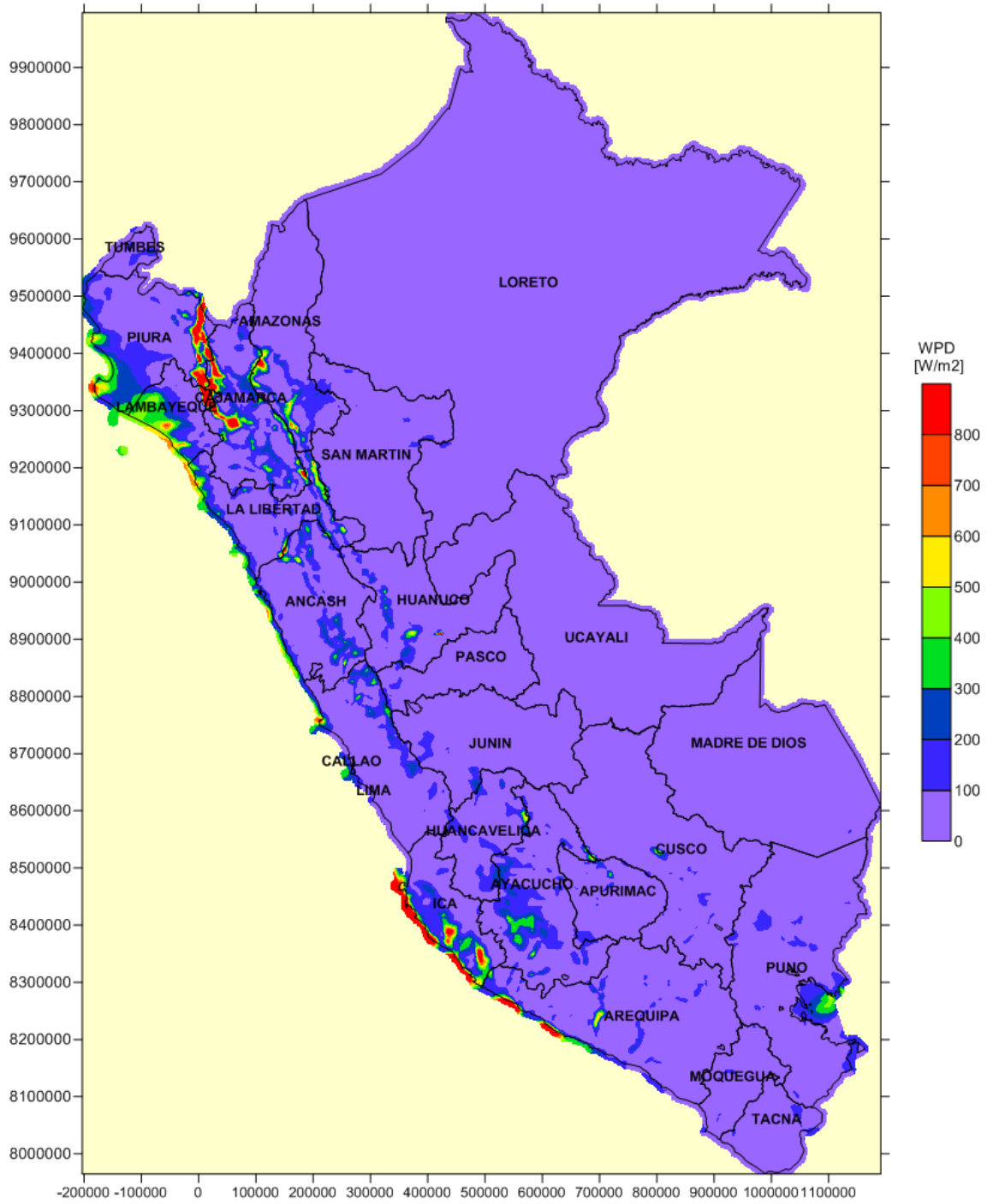
#### H.14. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN FEBRERO A 75 m



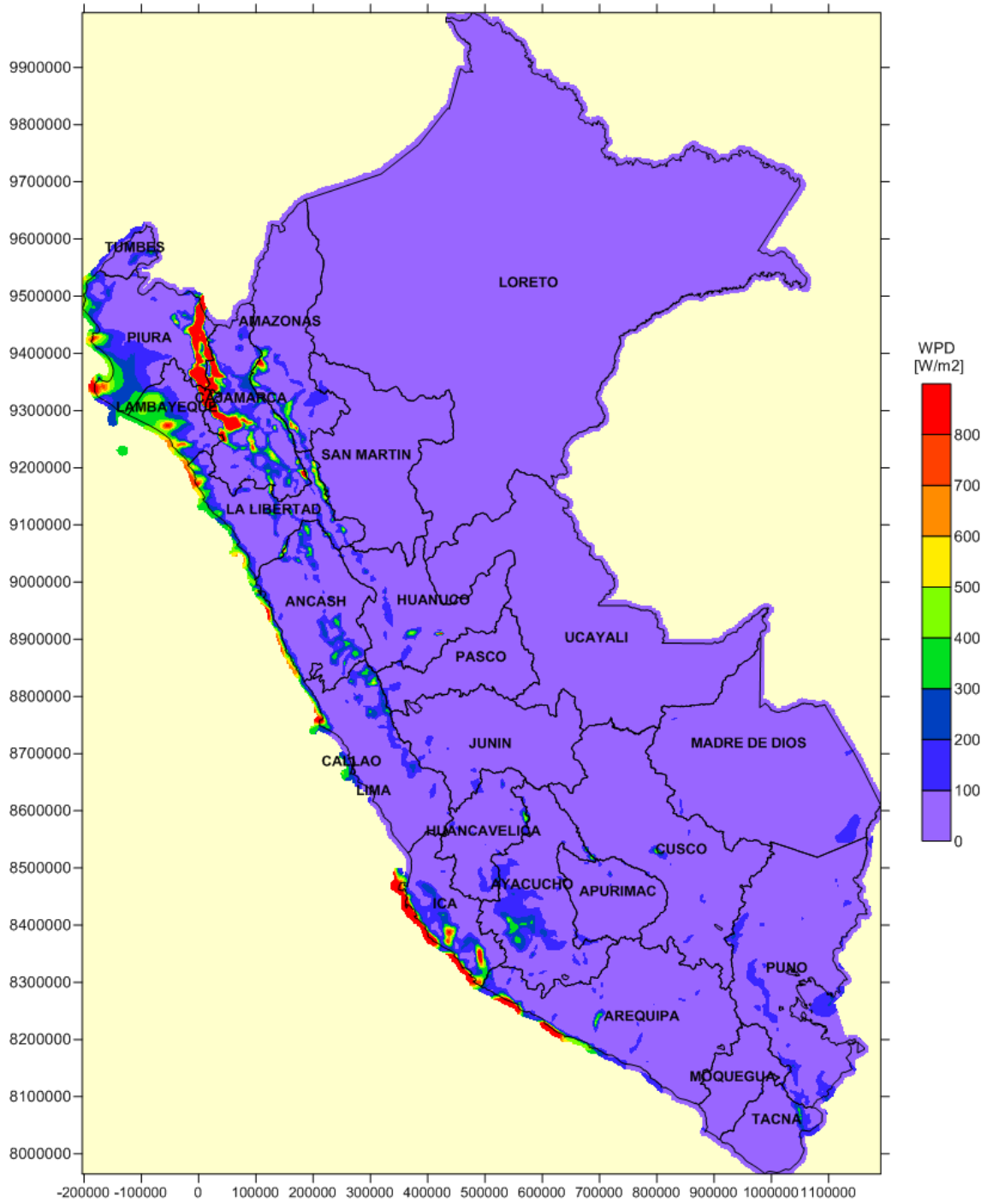
### H.15. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN MARZO A 75 m



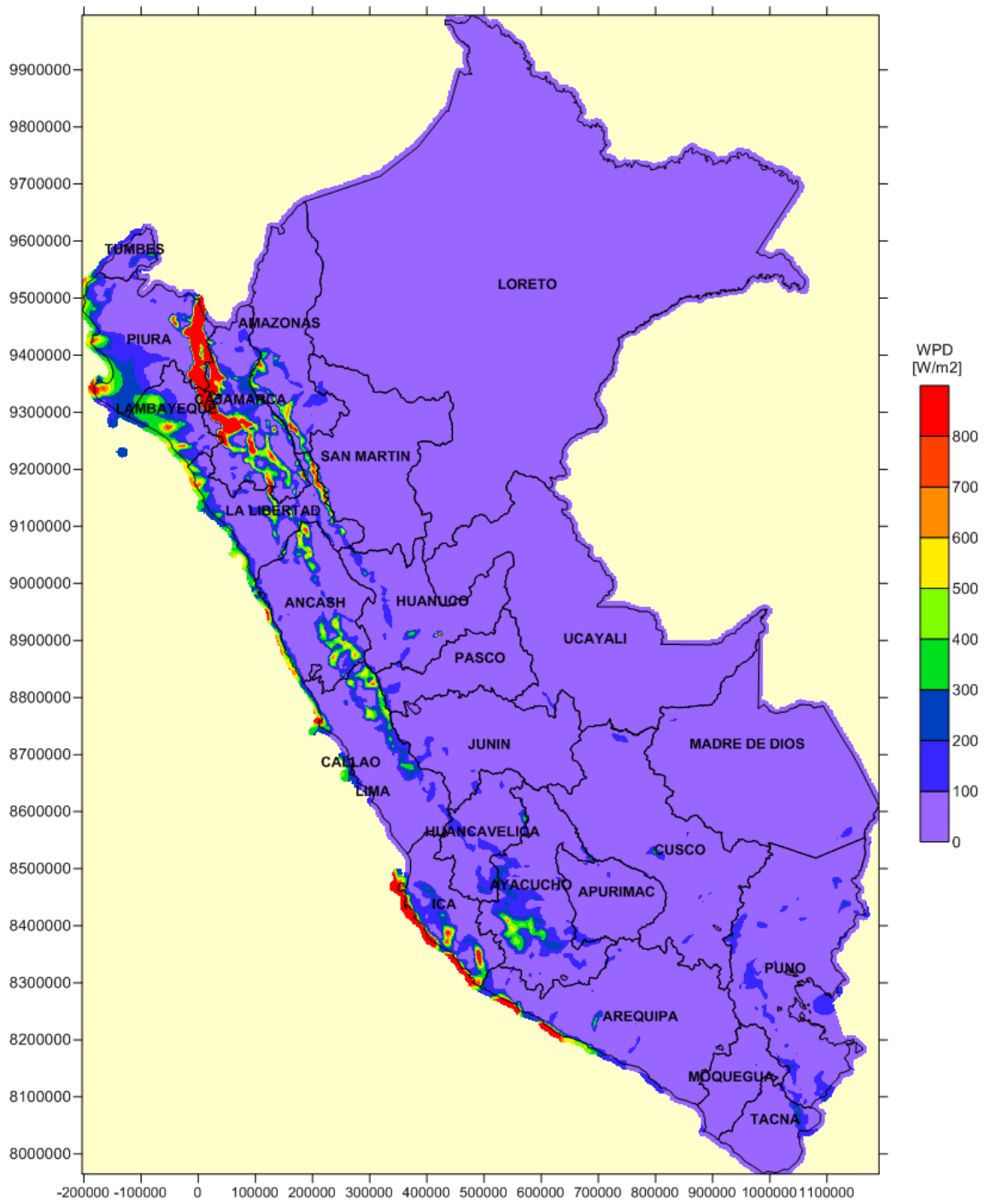
H.16. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN ABRIL A 75 m



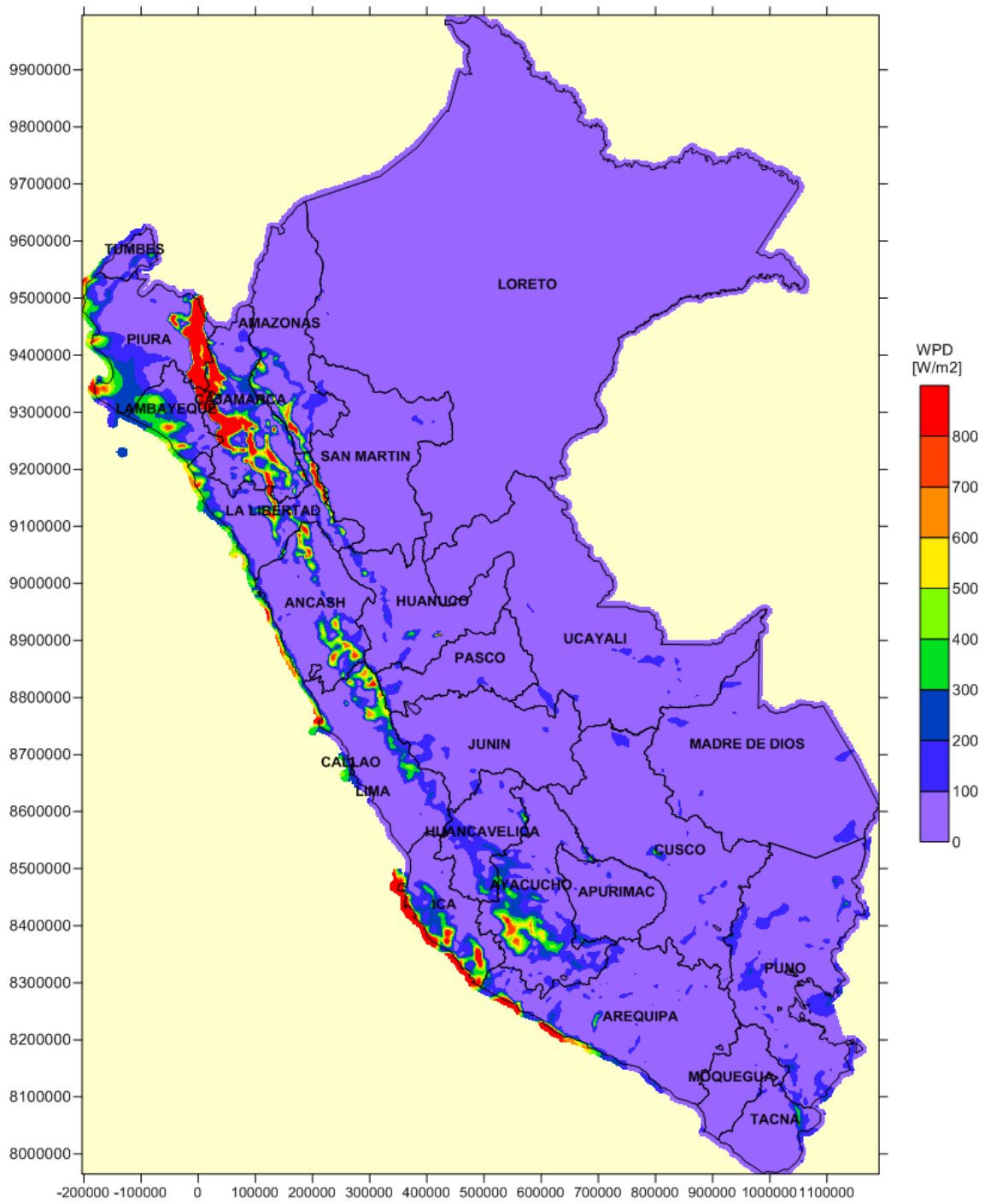
### H.17. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN MAYO A 75 m



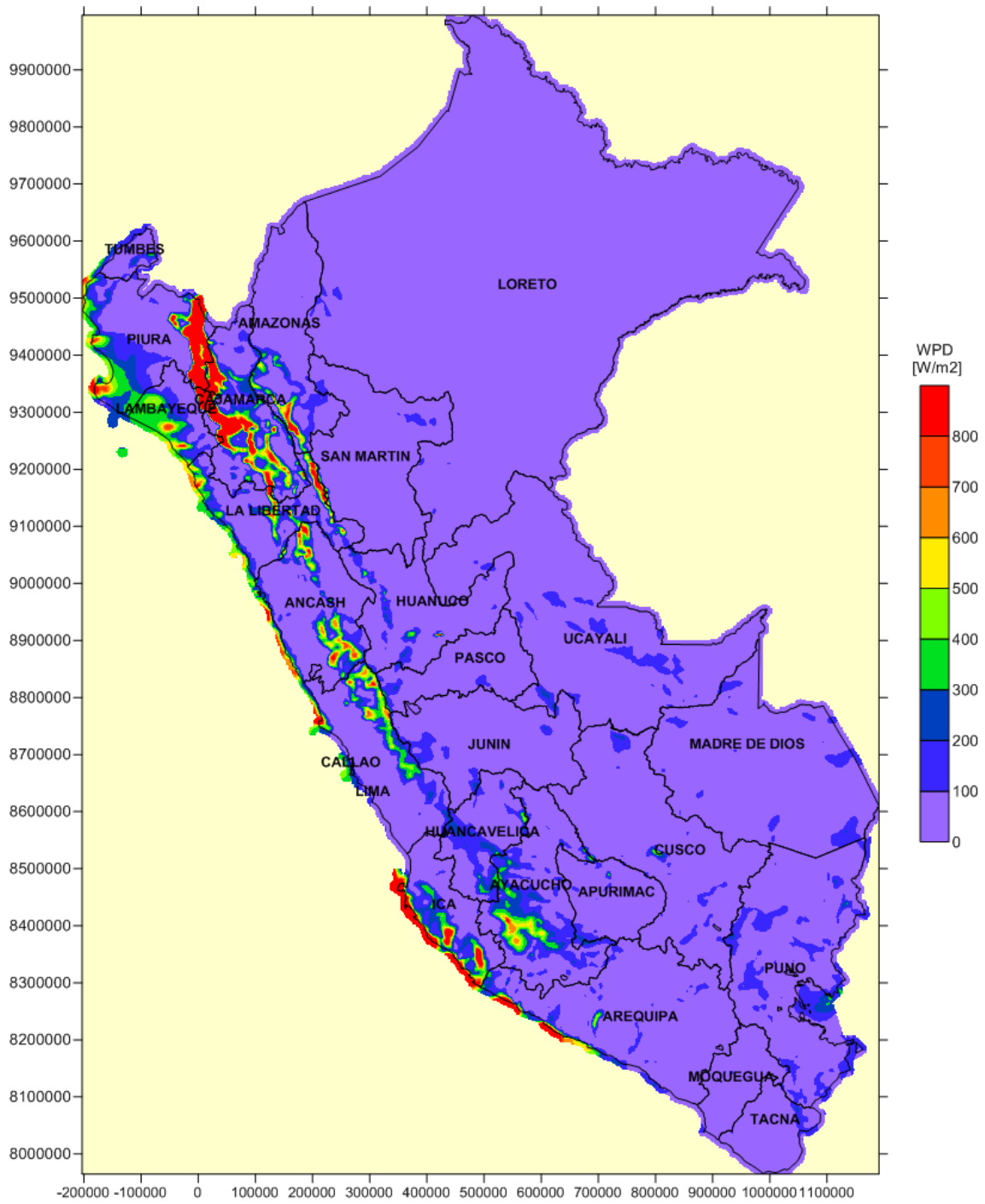
H.18. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN JUNIO A 75 m



### H.19. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN JULIO A 75 m

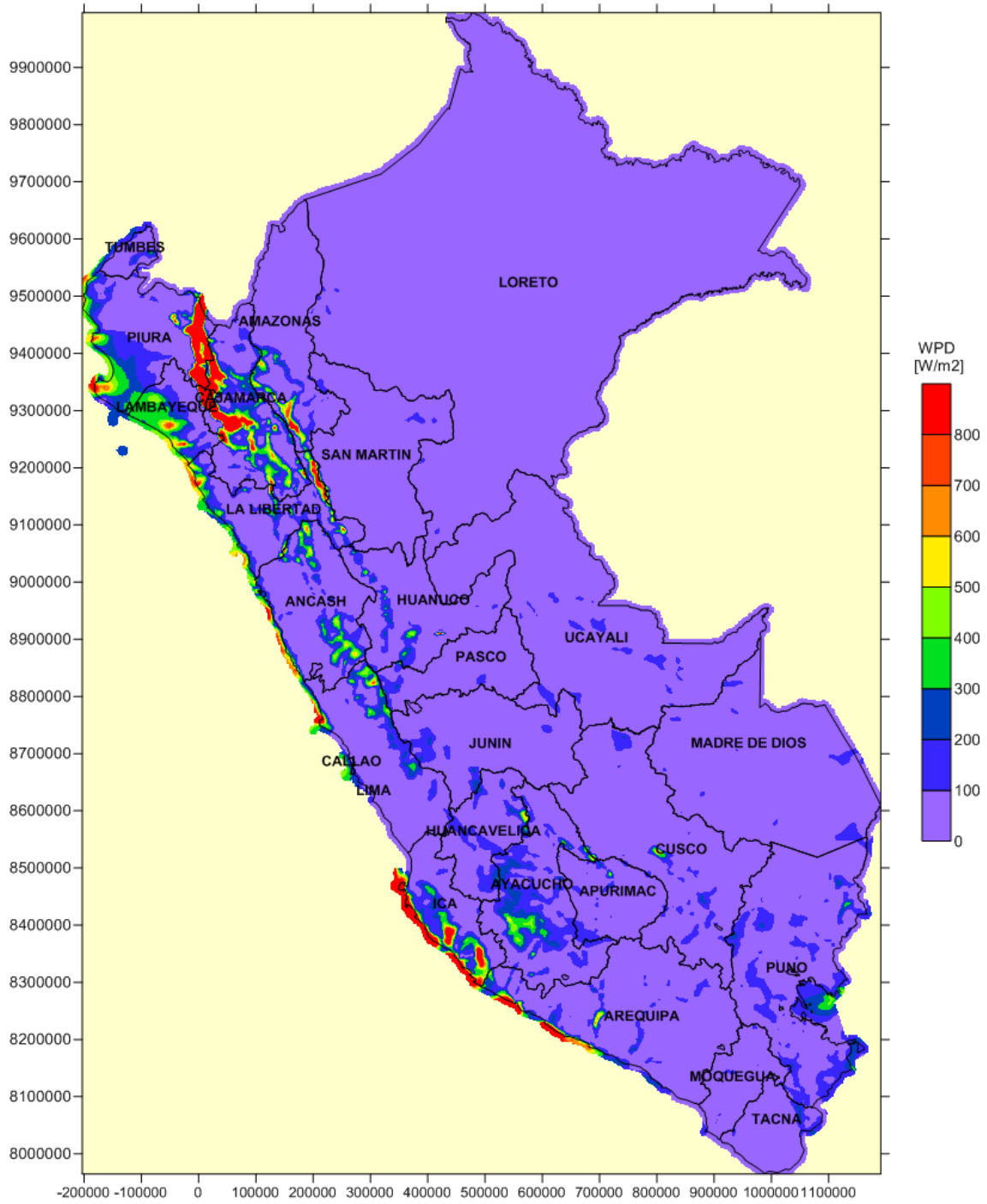


## H.20. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN AGOSTO A 75 m

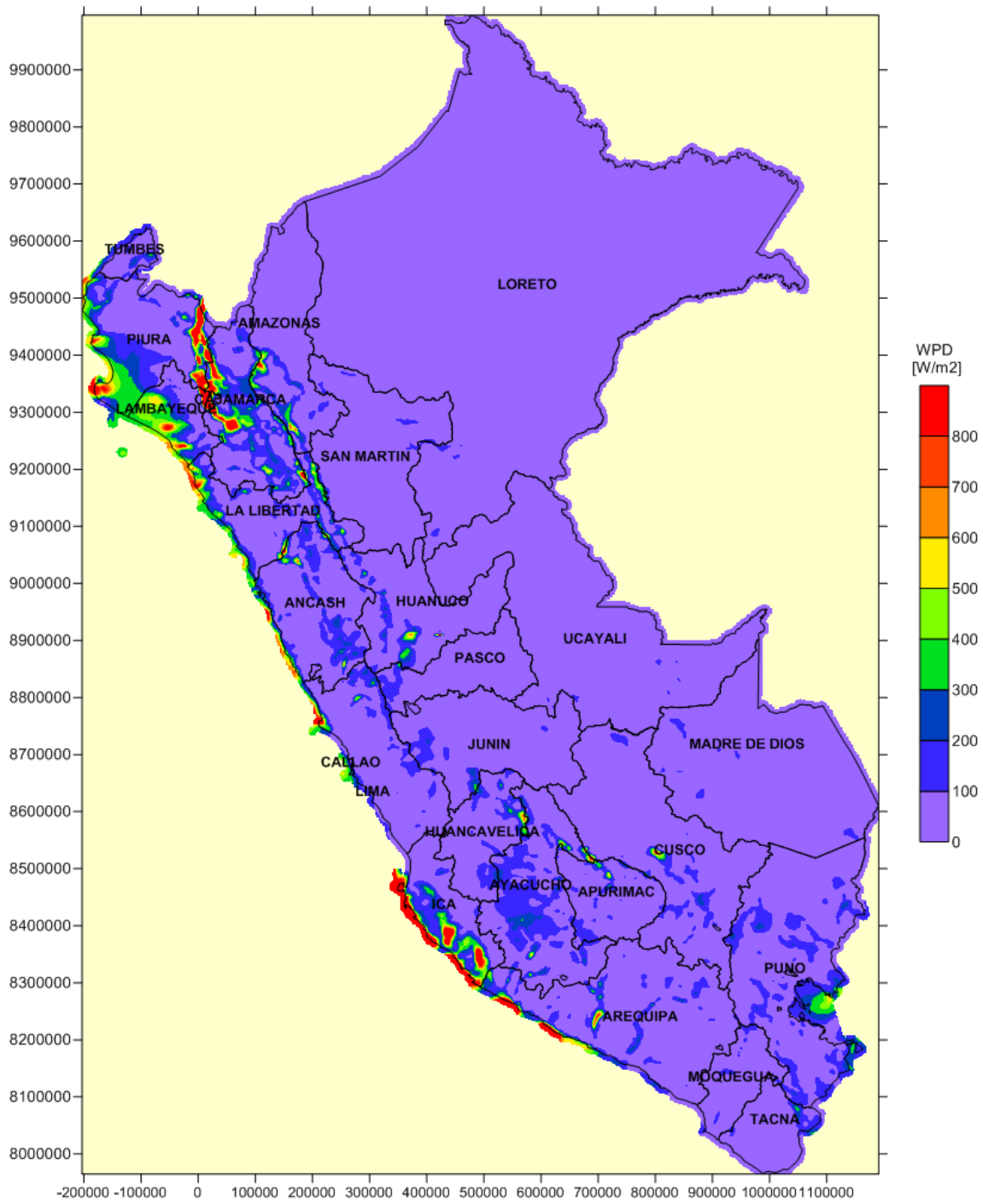




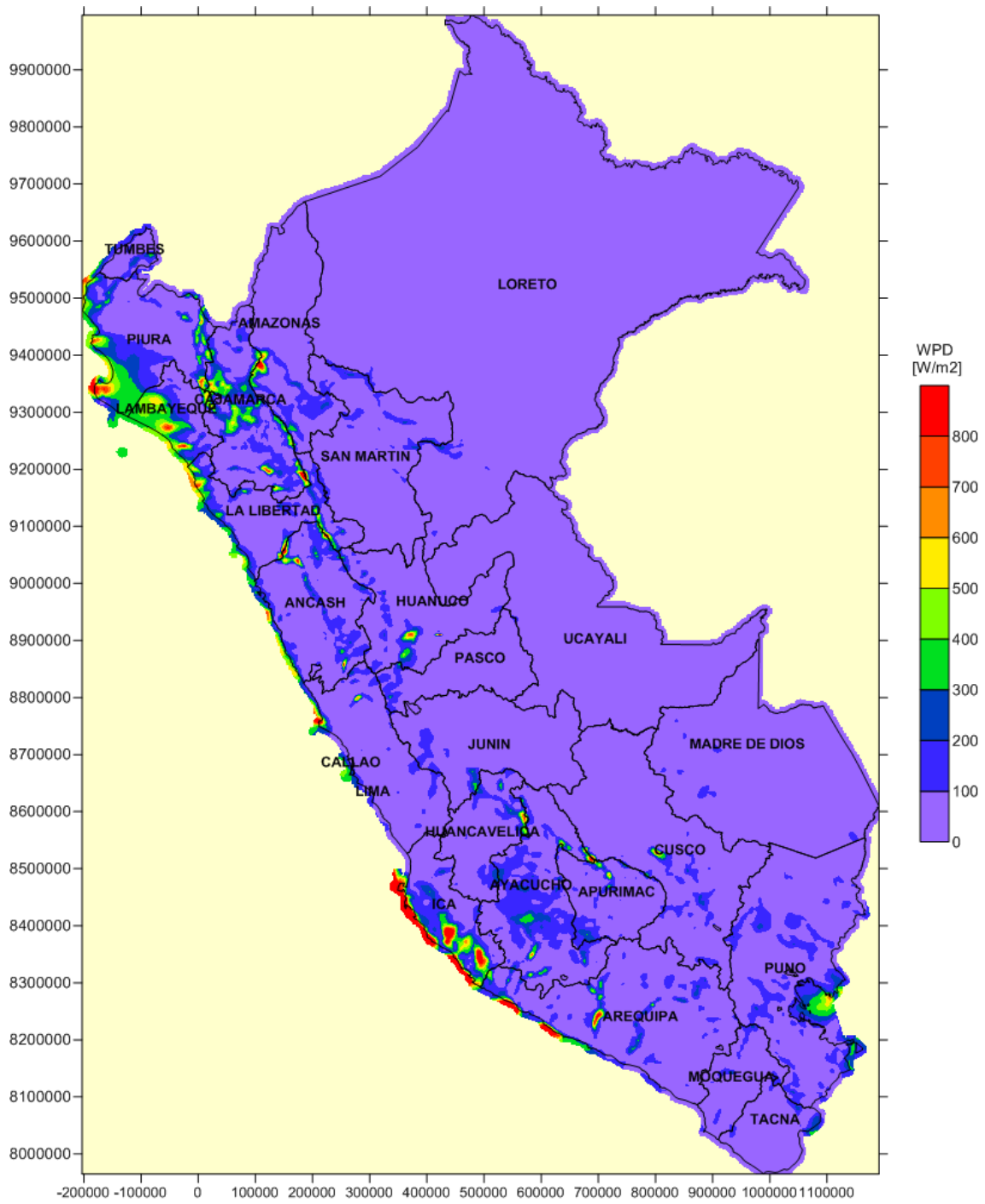
## H.21. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN SEPTIEMBRE A 75 m



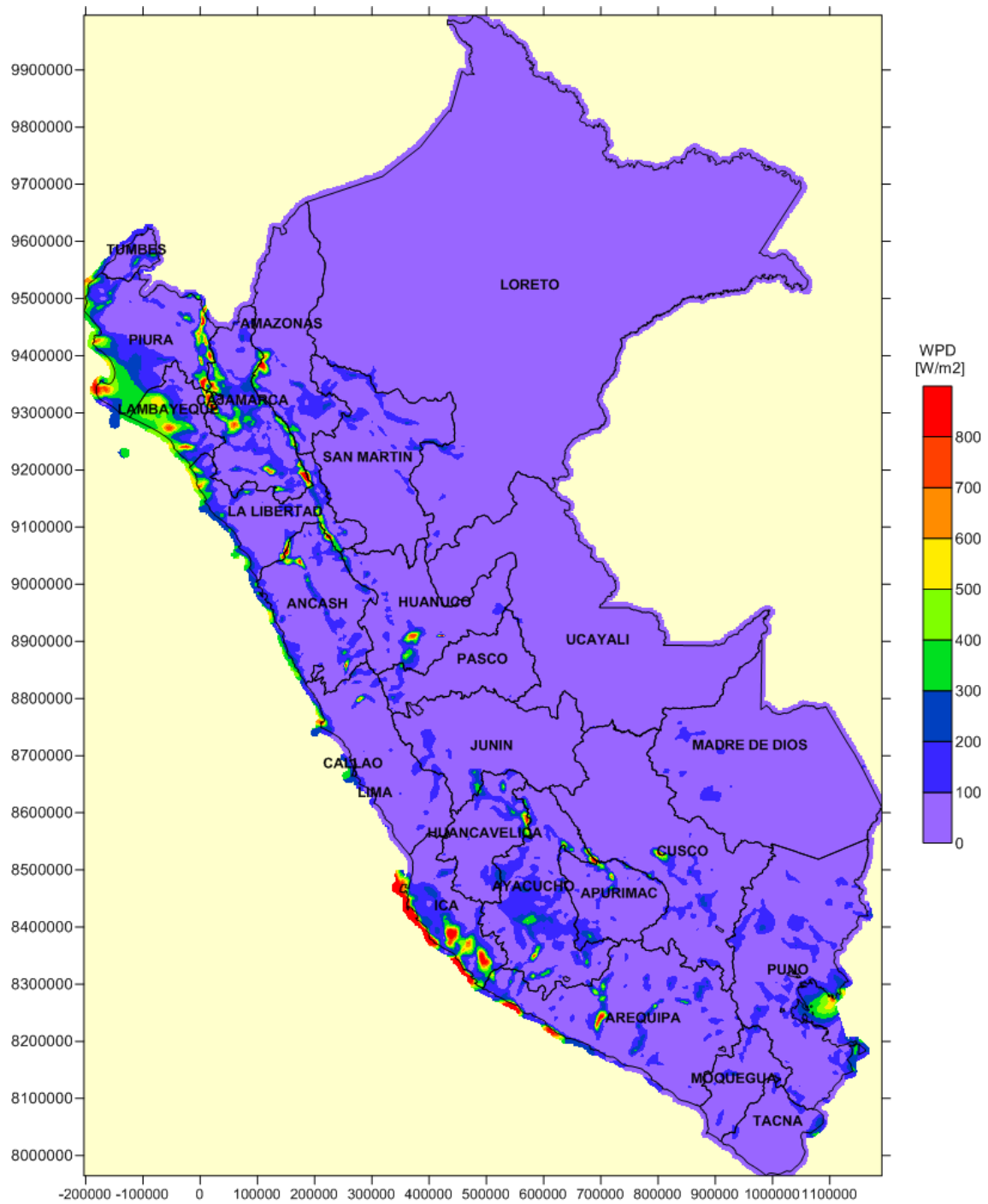
## H.22. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN OCTUBRE A 75 m



### H.23. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN NOVIEMBRE A 75 m

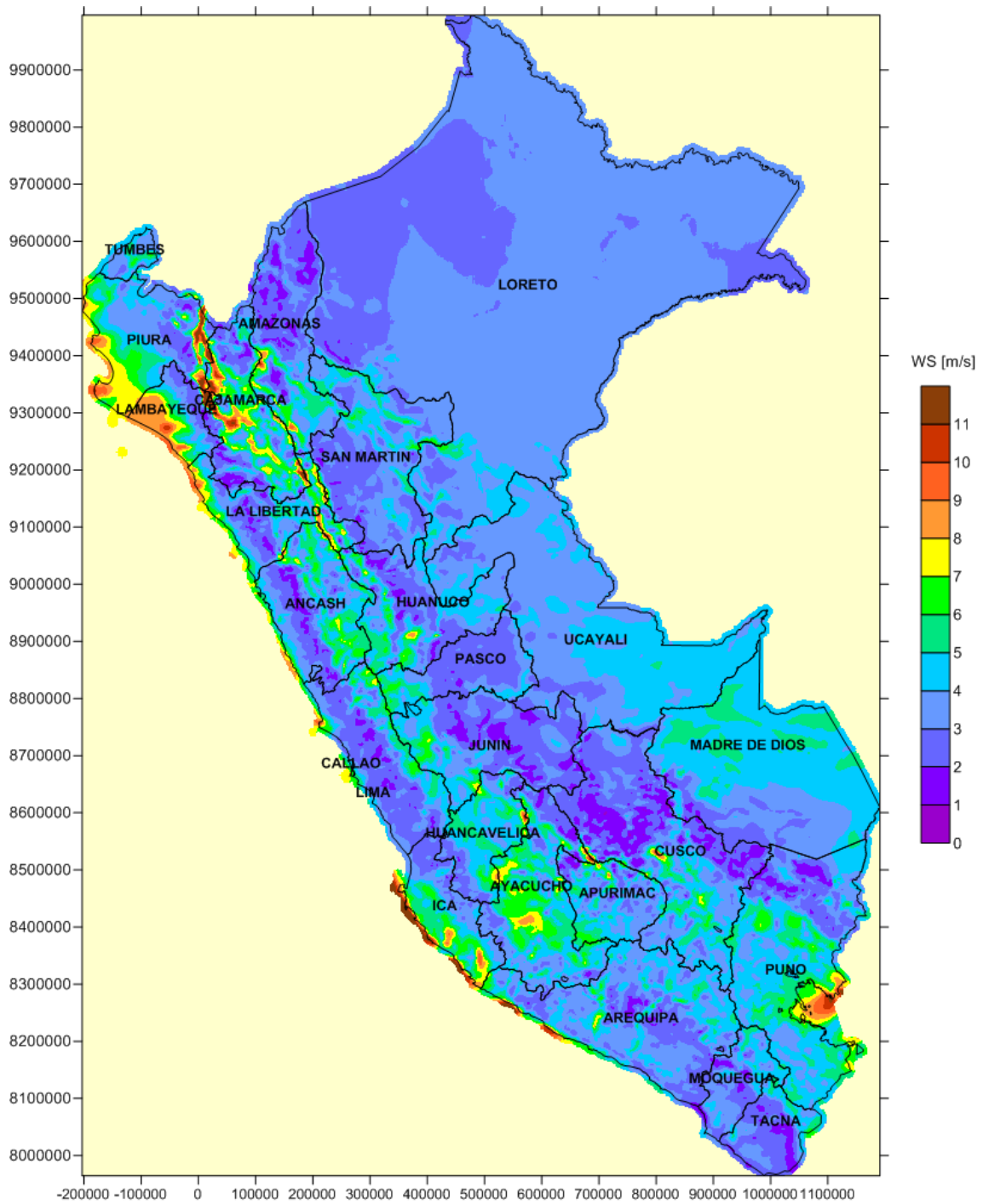


## H.24. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN DICIEMBRE A 75 m

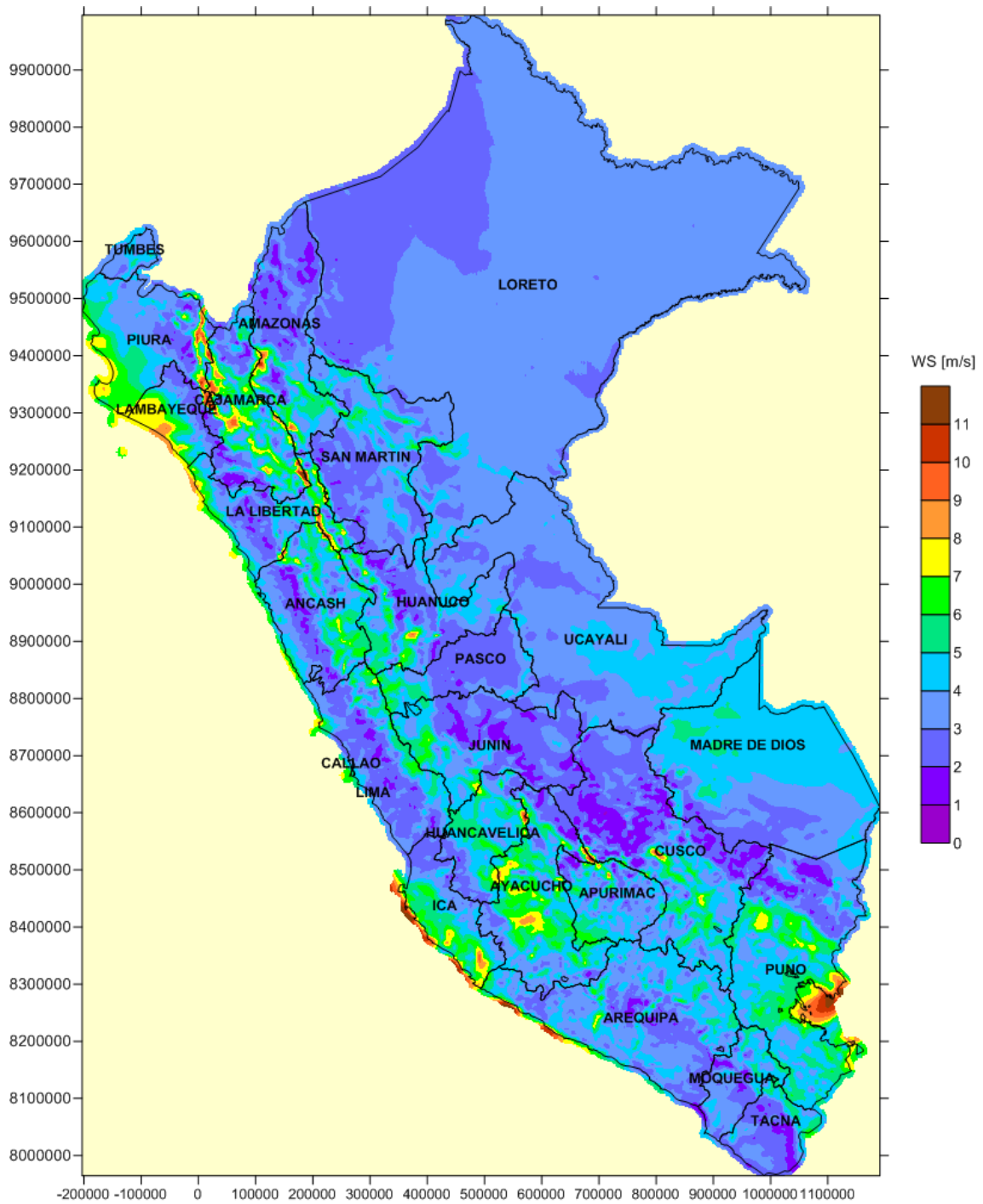


**ANEXO I.**  
**MAPAS DE POTENCIAL EÓLICO**  
**MENSUALES (100m)**

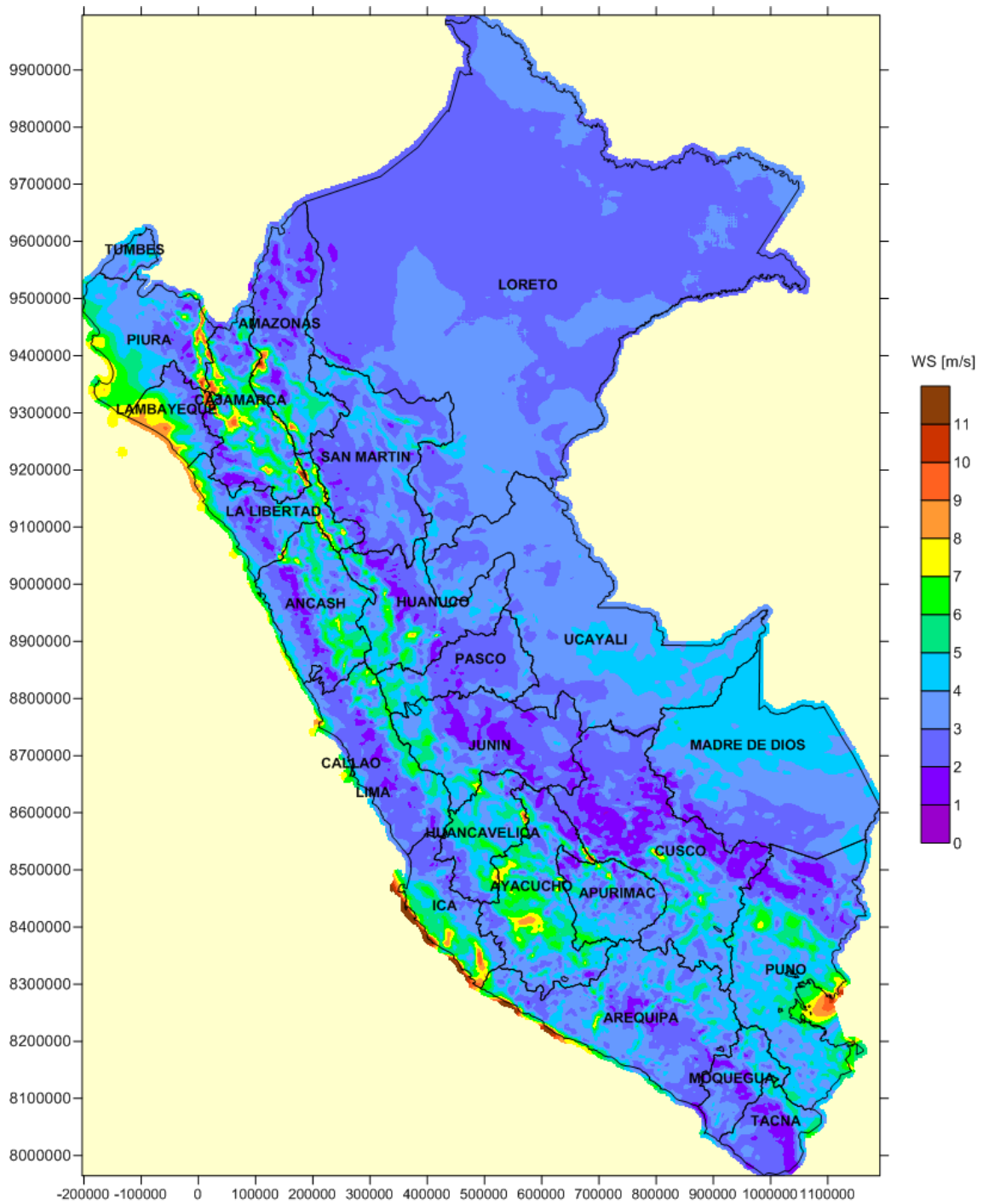
I.1. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN ENERO A 100 m



## I.2. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN FEBRERO A 100 m

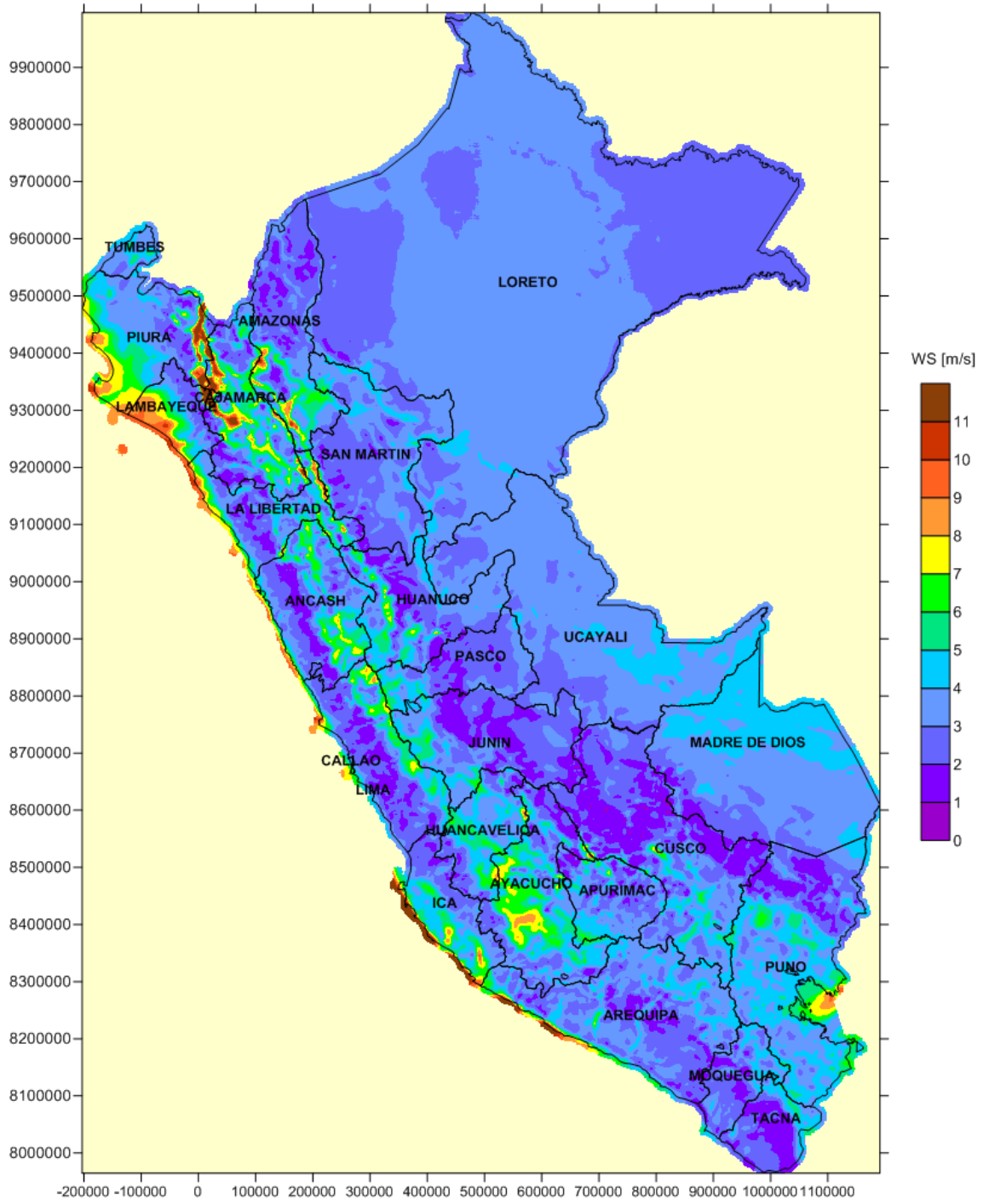


### I.3. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN MARZO A 100 m

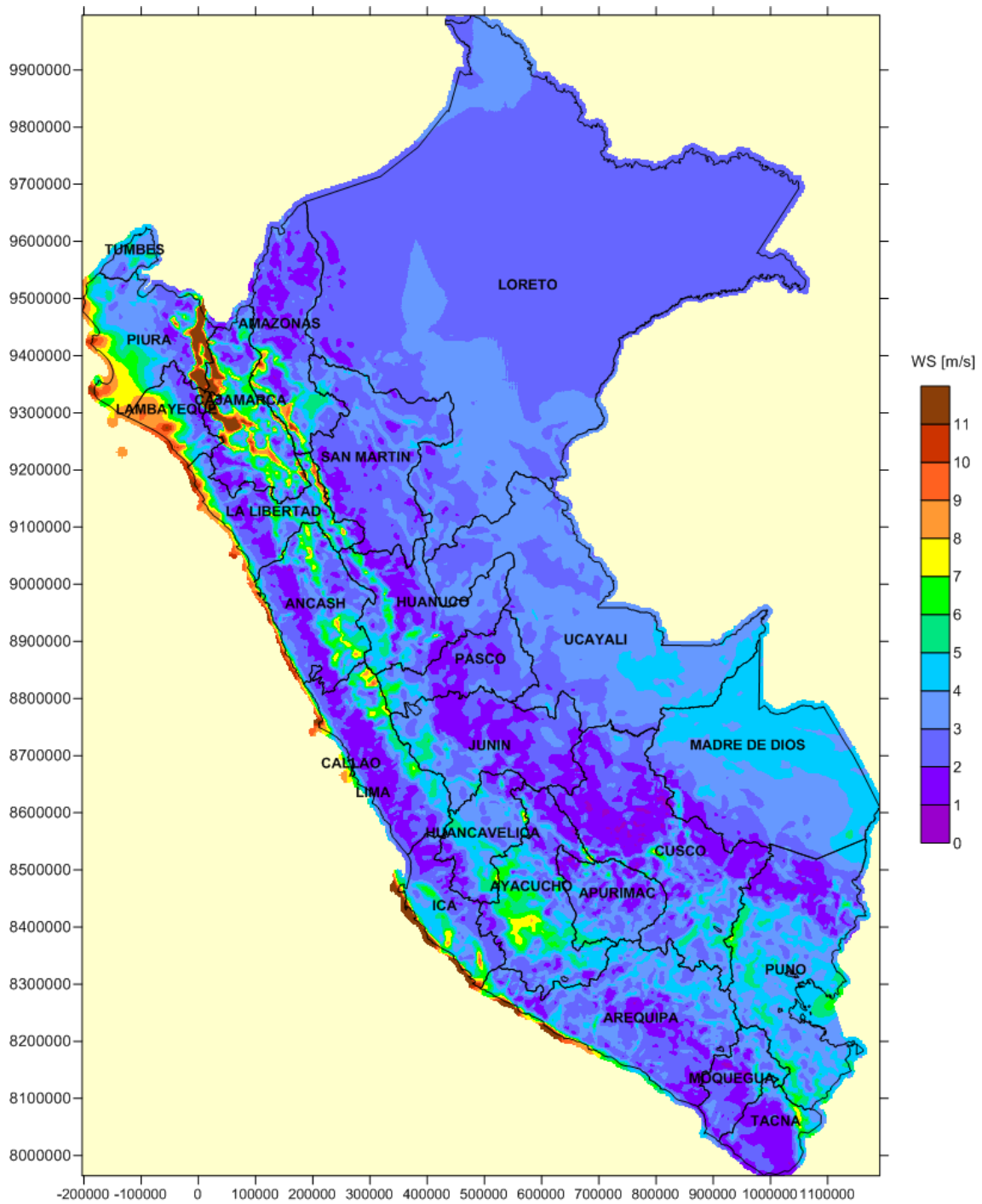




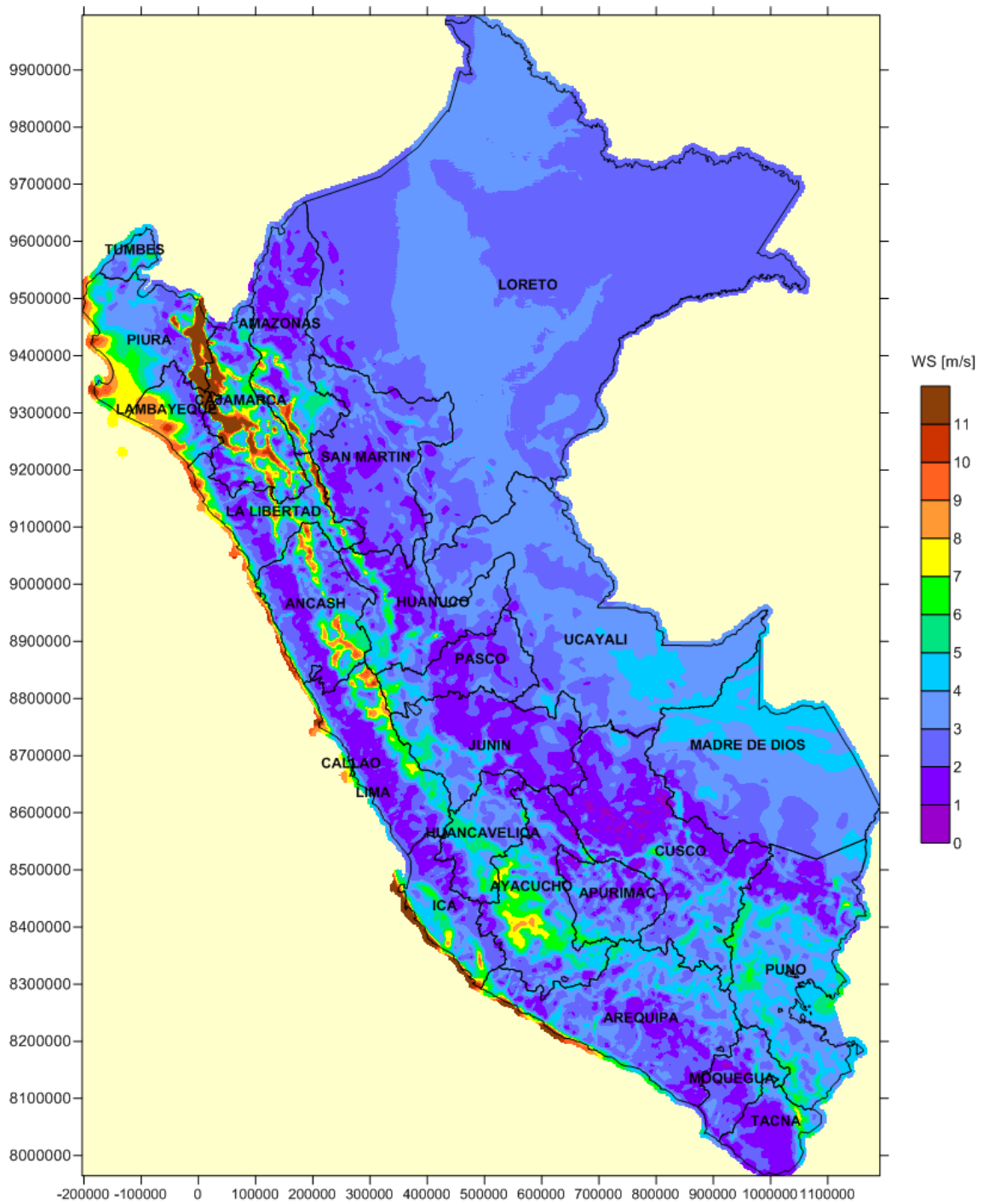
I.4. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN ABRIL A 100 m



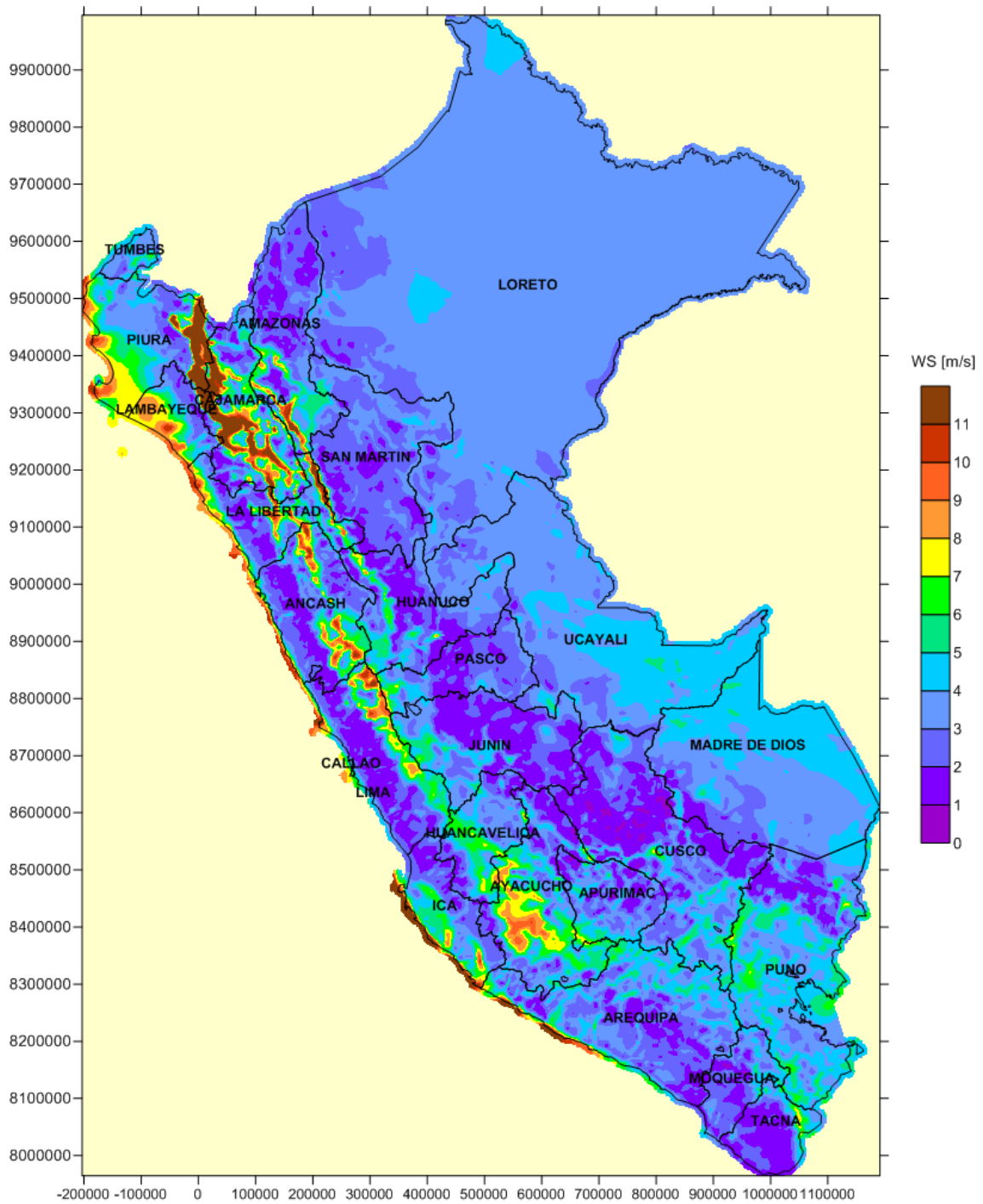
### I.5. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN MAYO A 100 m



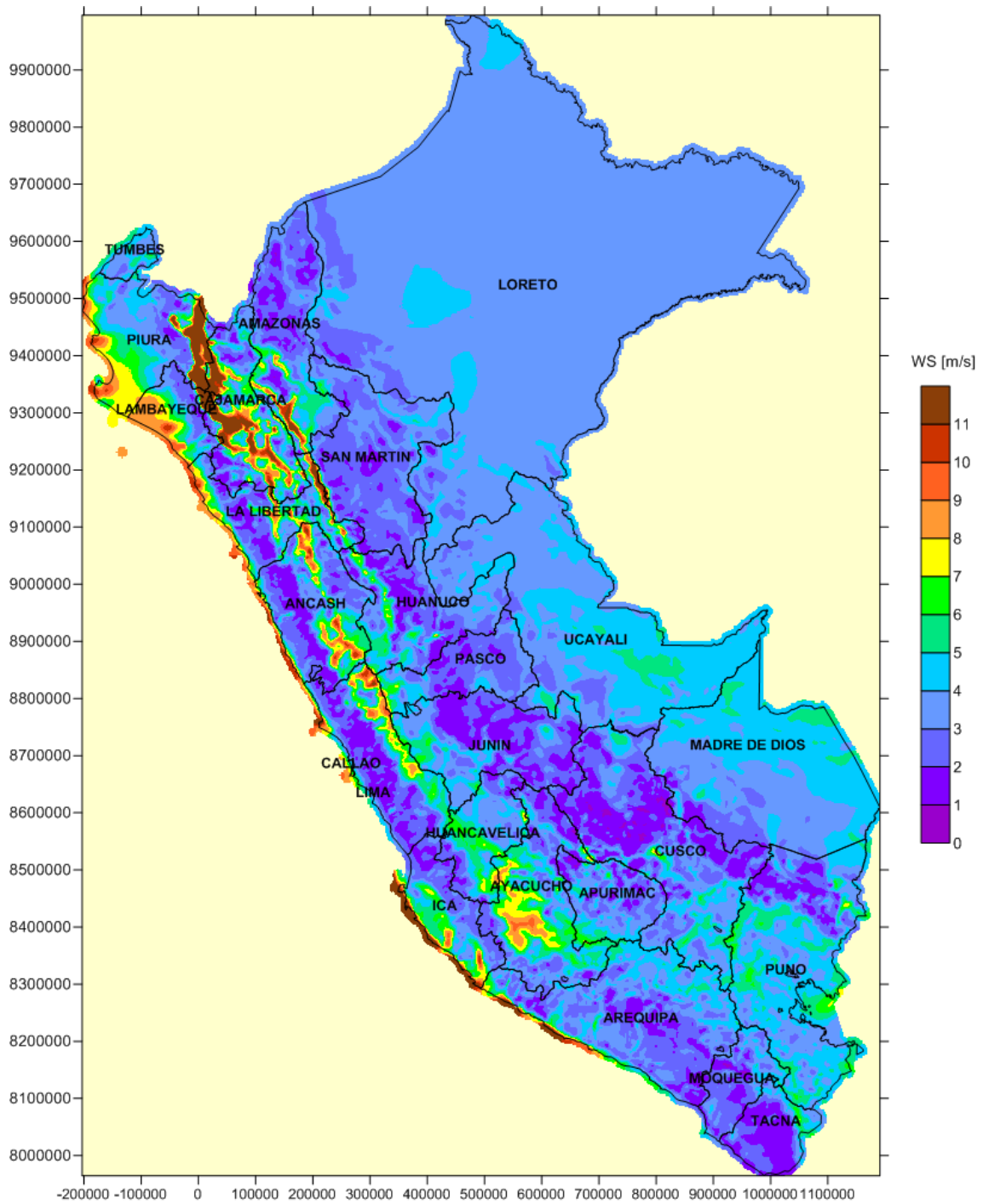
I.6. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN JUNIO A 100 m



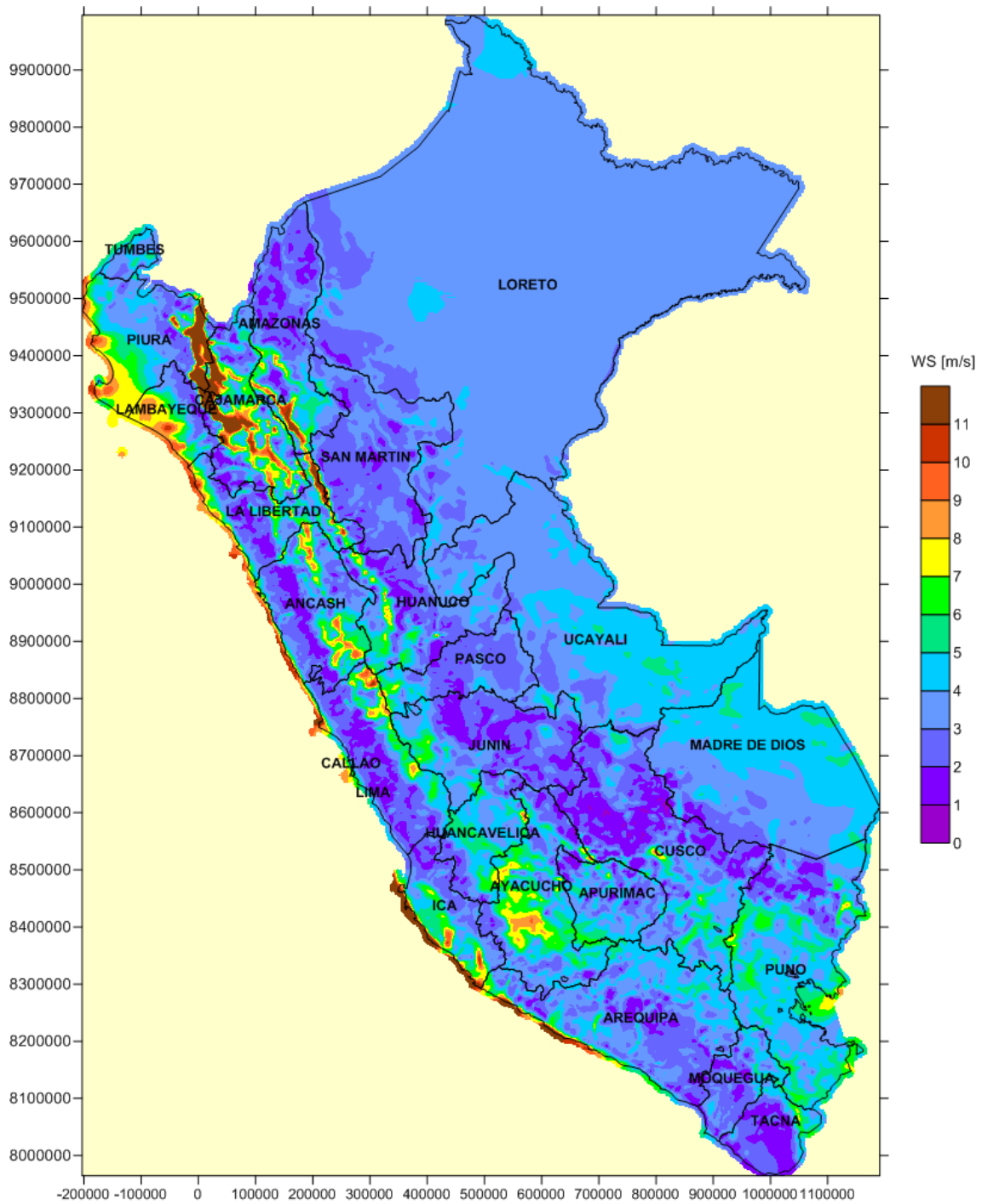
I.7. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN JULIO A 100 m



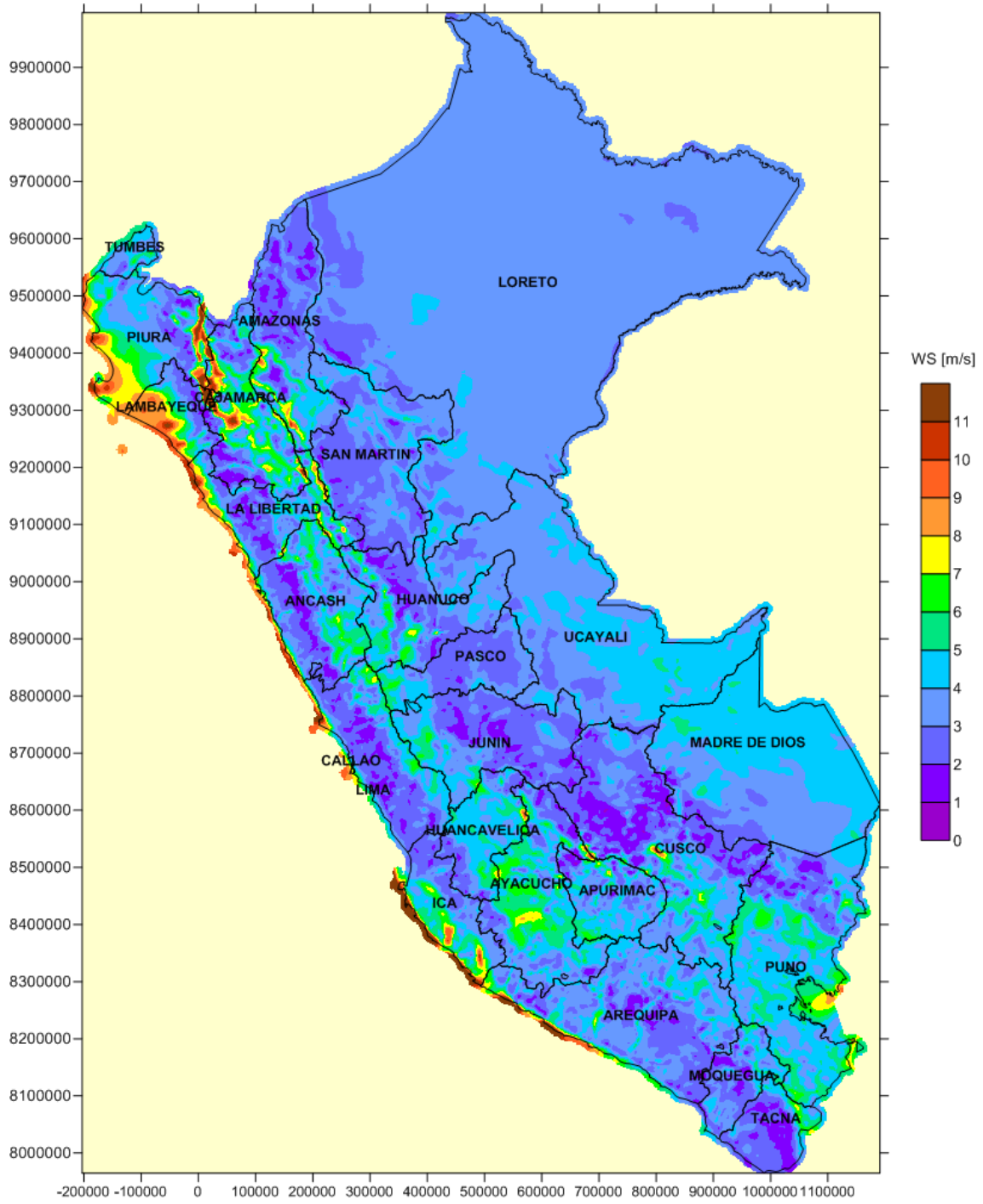
I.8. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN AGOSTO A 100 m



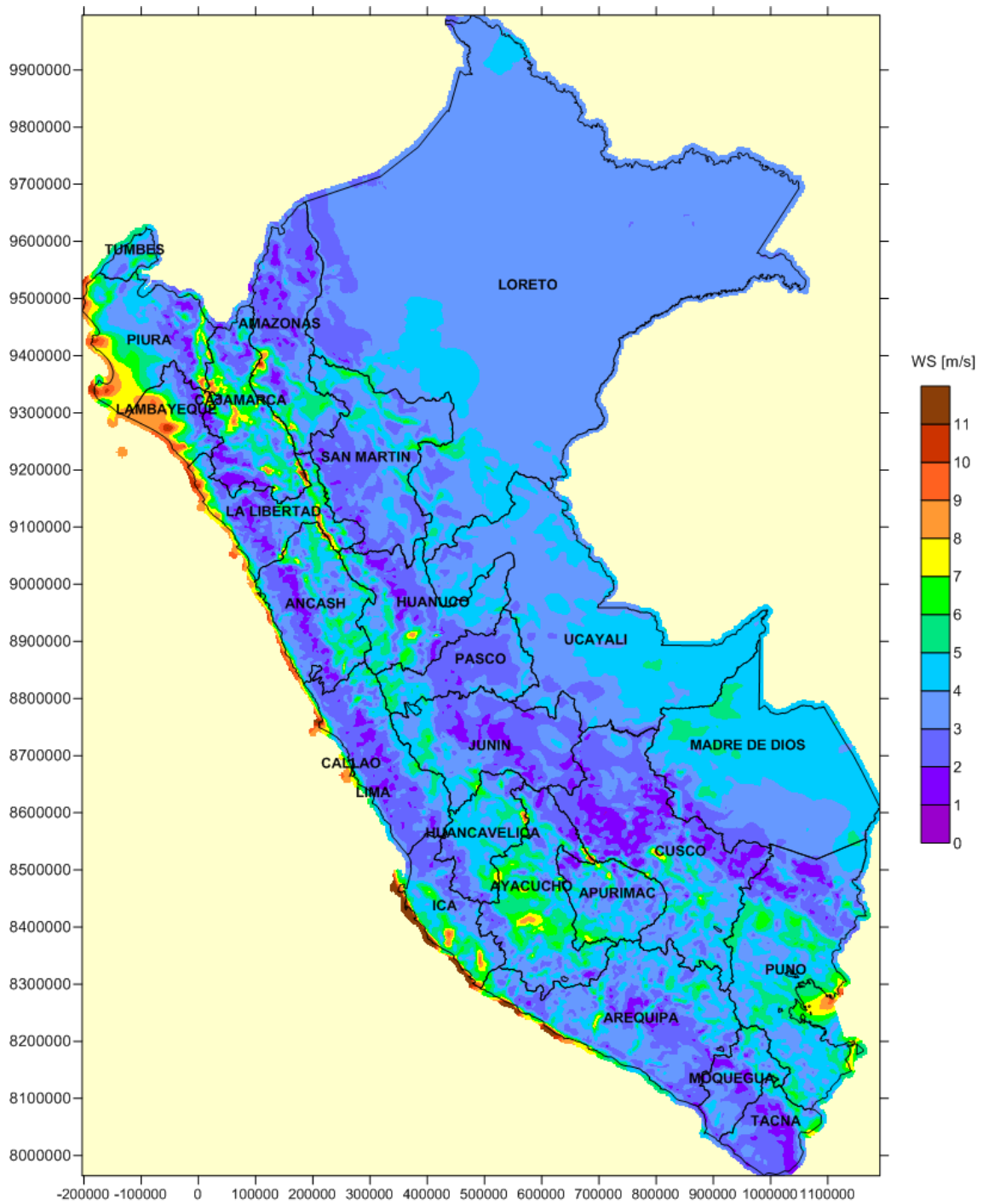
I.9. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN SEPTIEMBRE A 100 m



I.10. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN OCTUBRE A 100 m

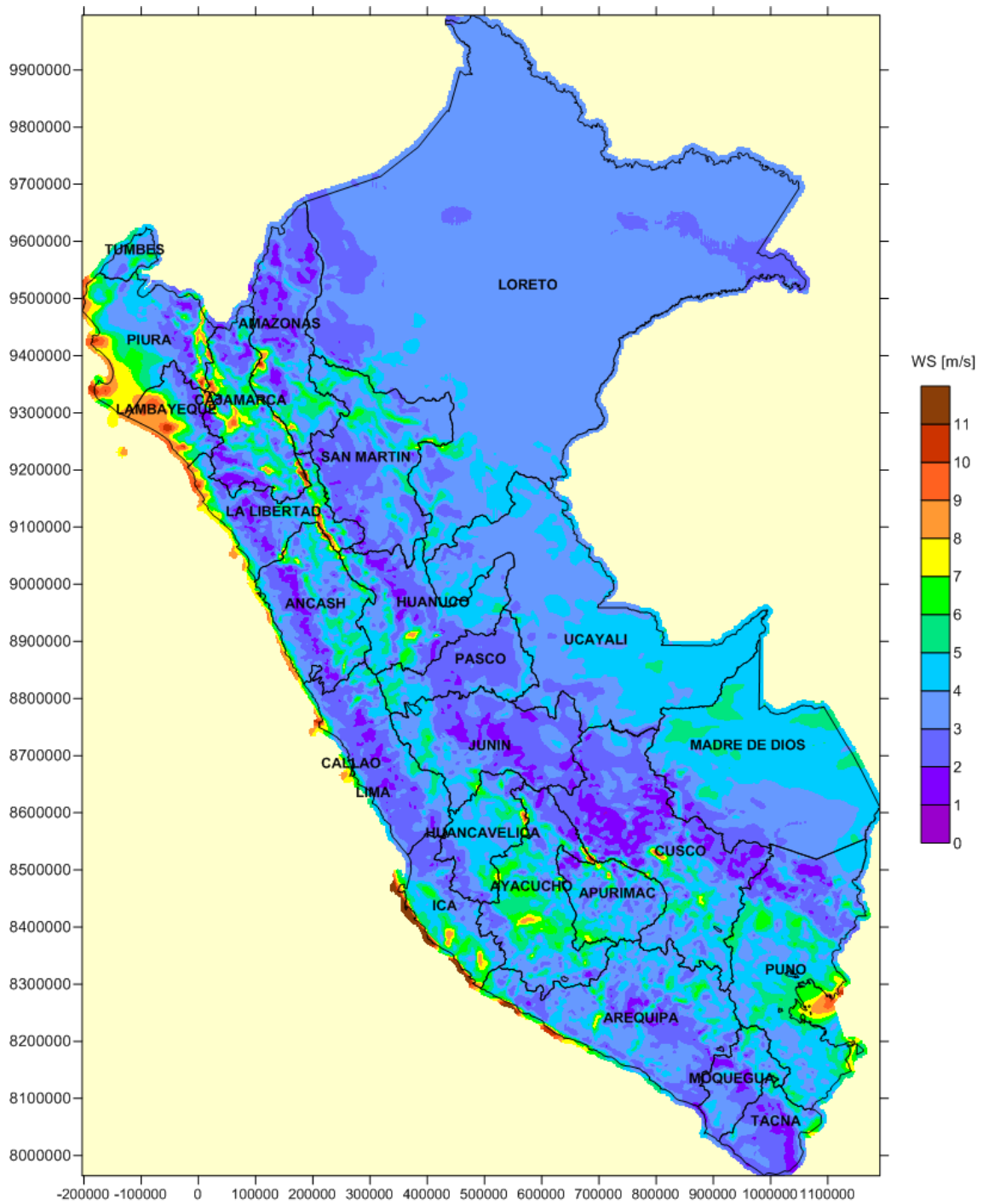


I.11. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN NOVIEMBRE A 100 m

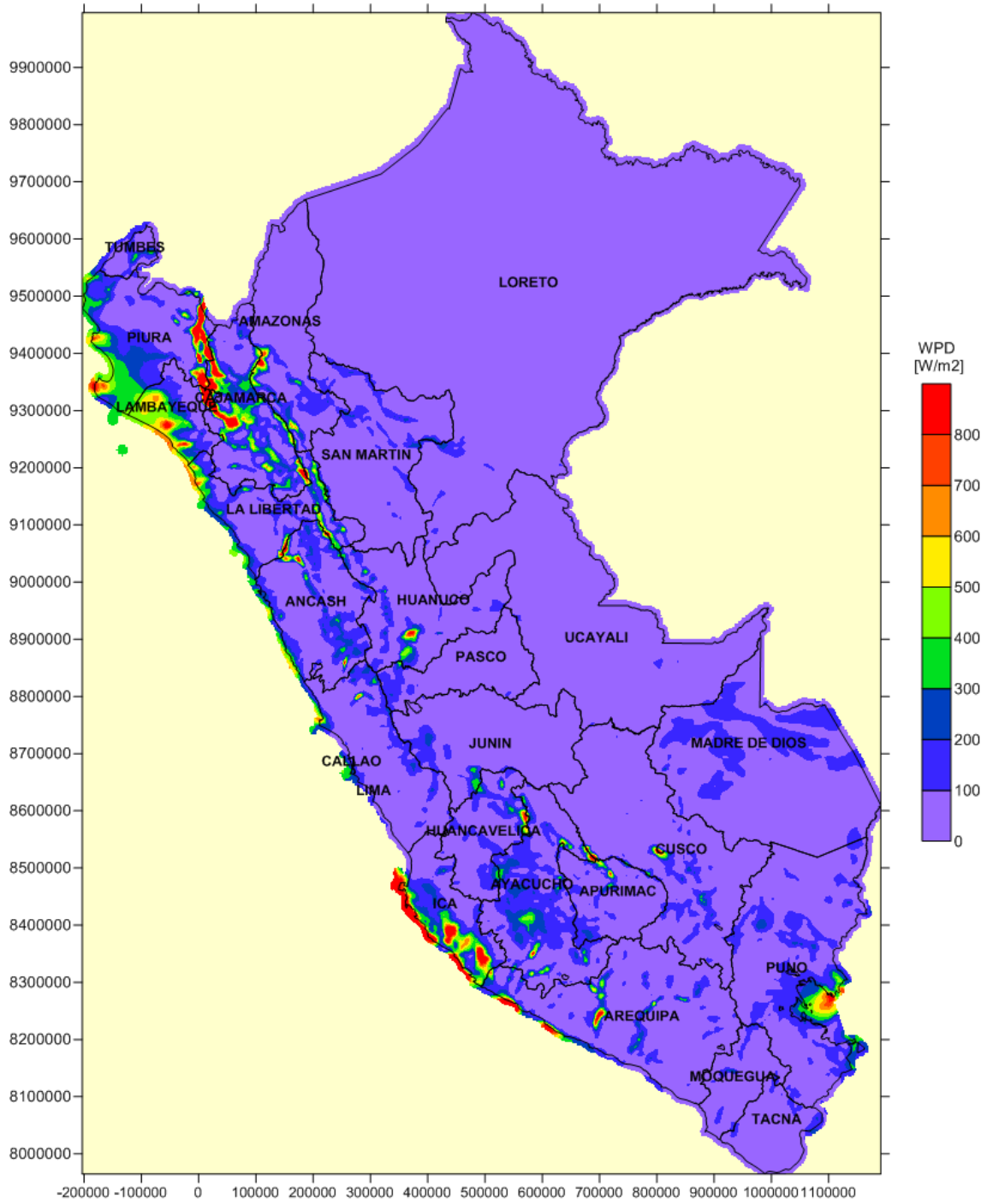




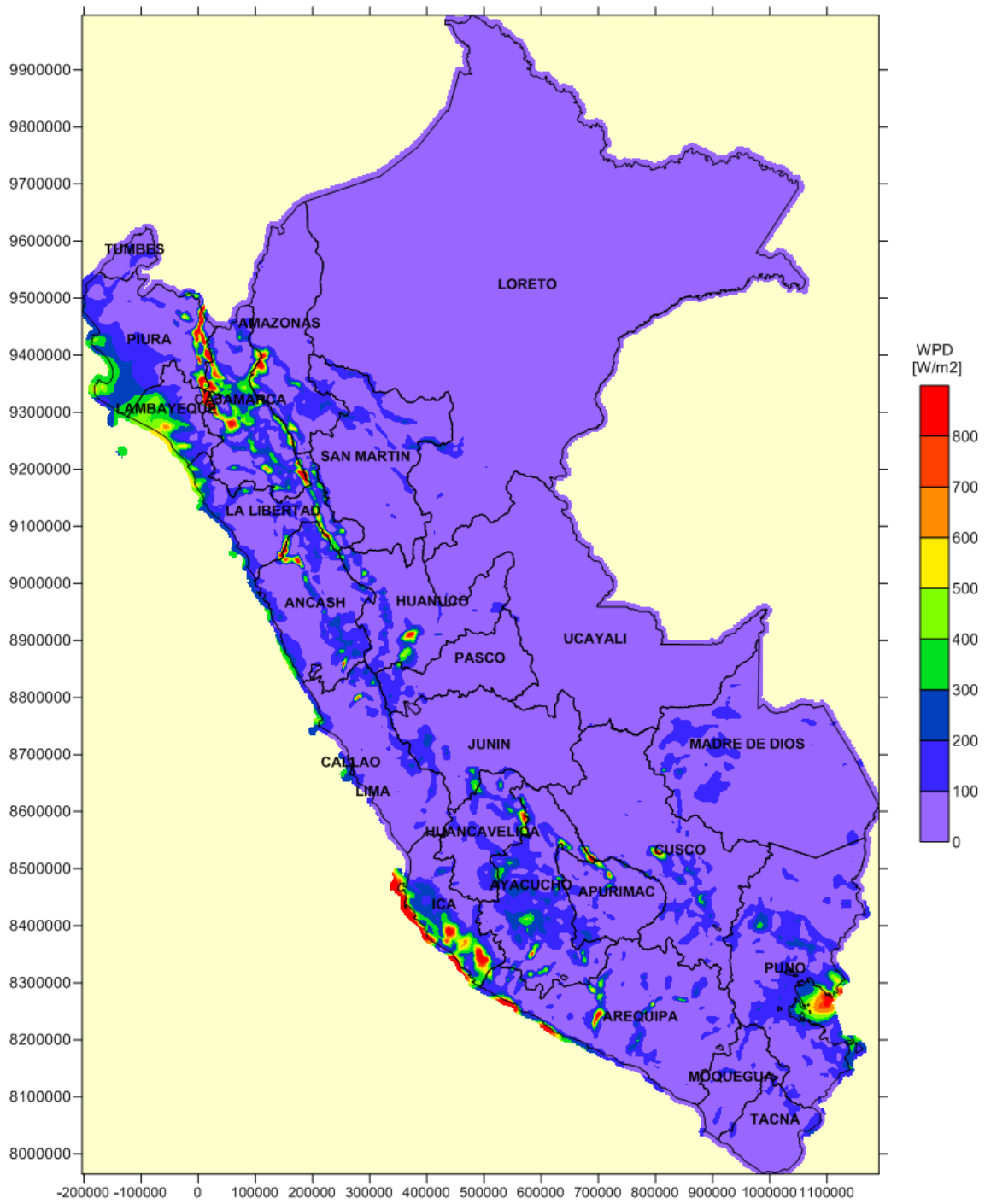
I.12. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN DICIEMBRE A 100 m



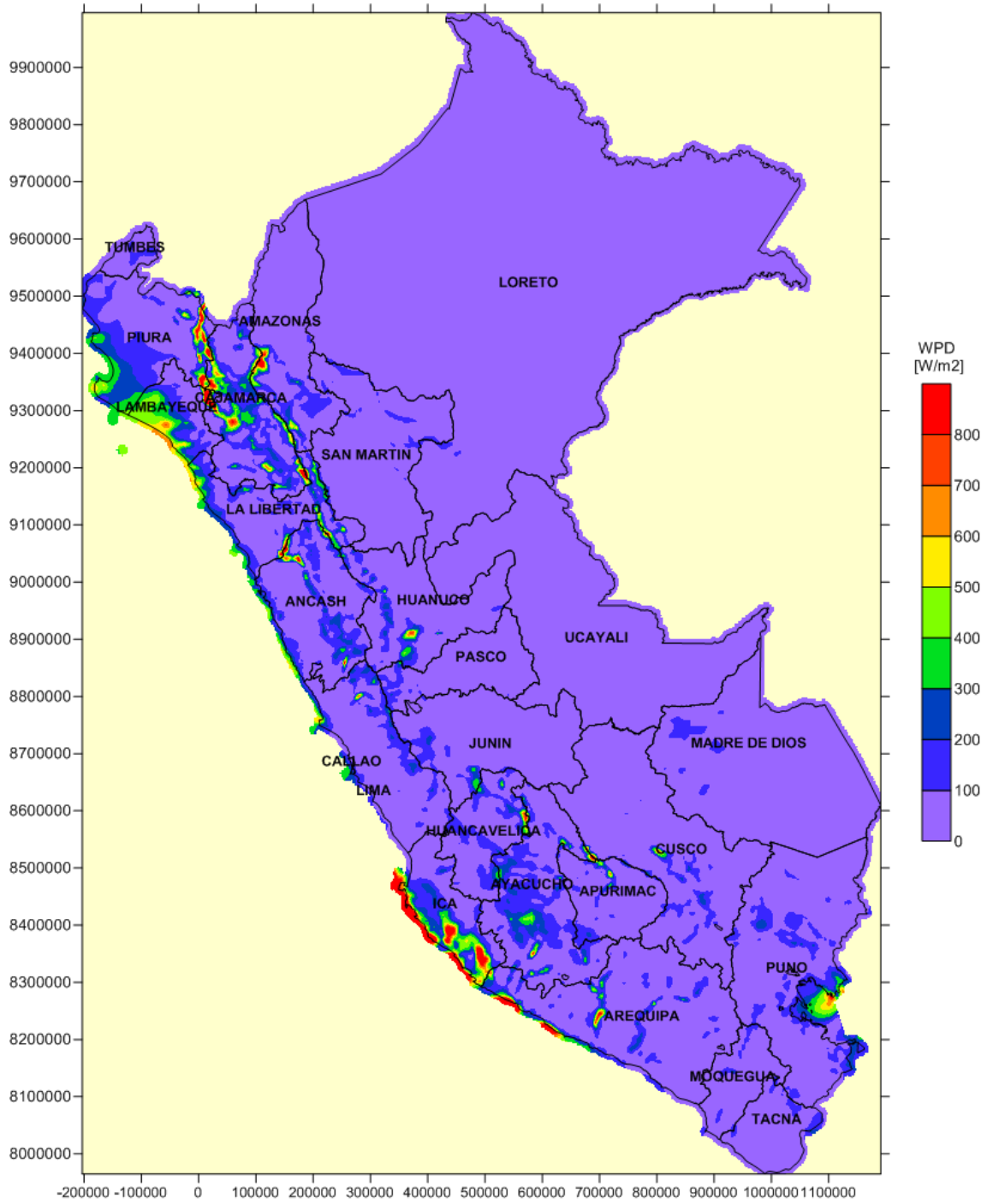
I.13. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN ENERO A 100 m



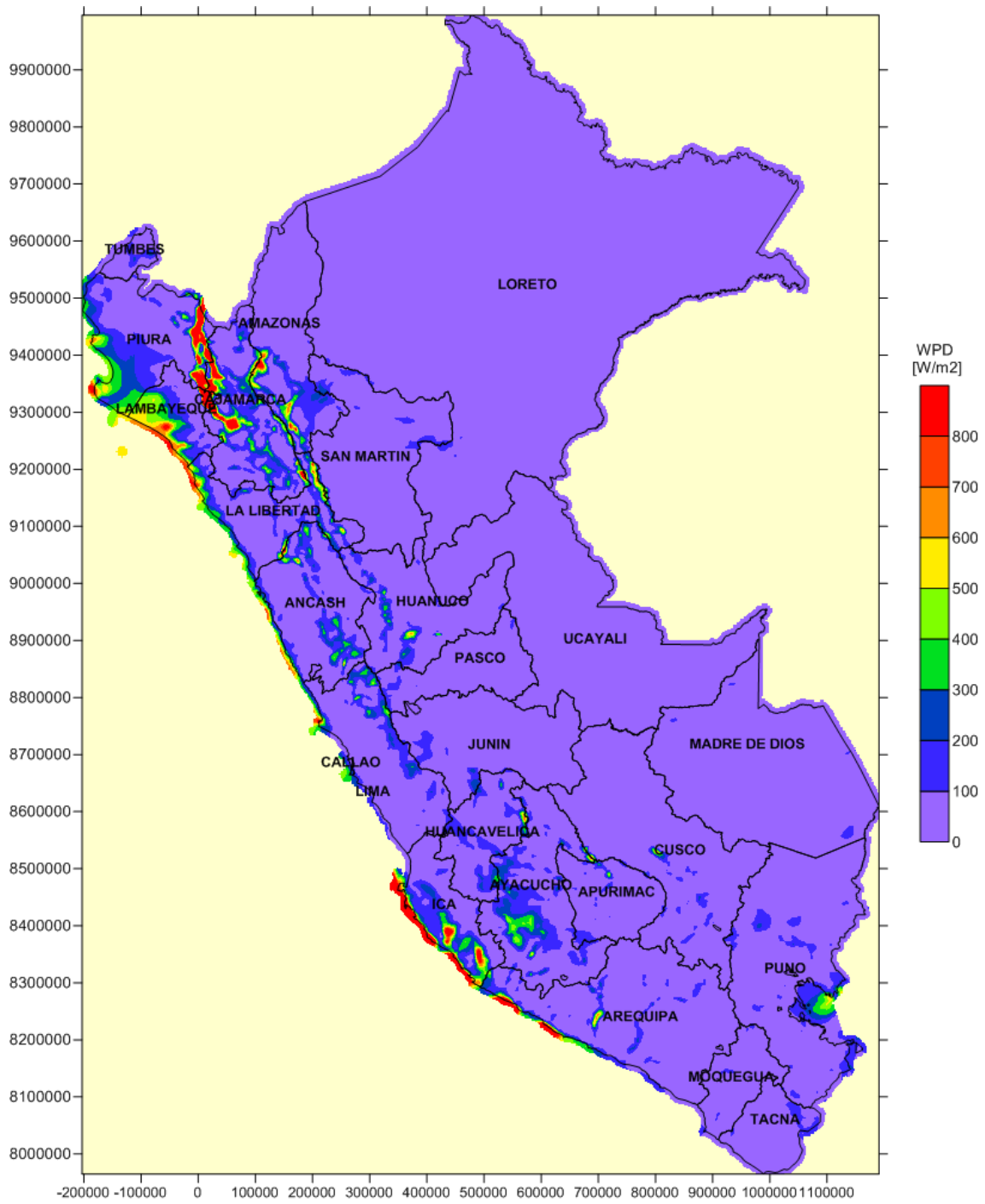
I.14. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN FEBRERO A 100 m



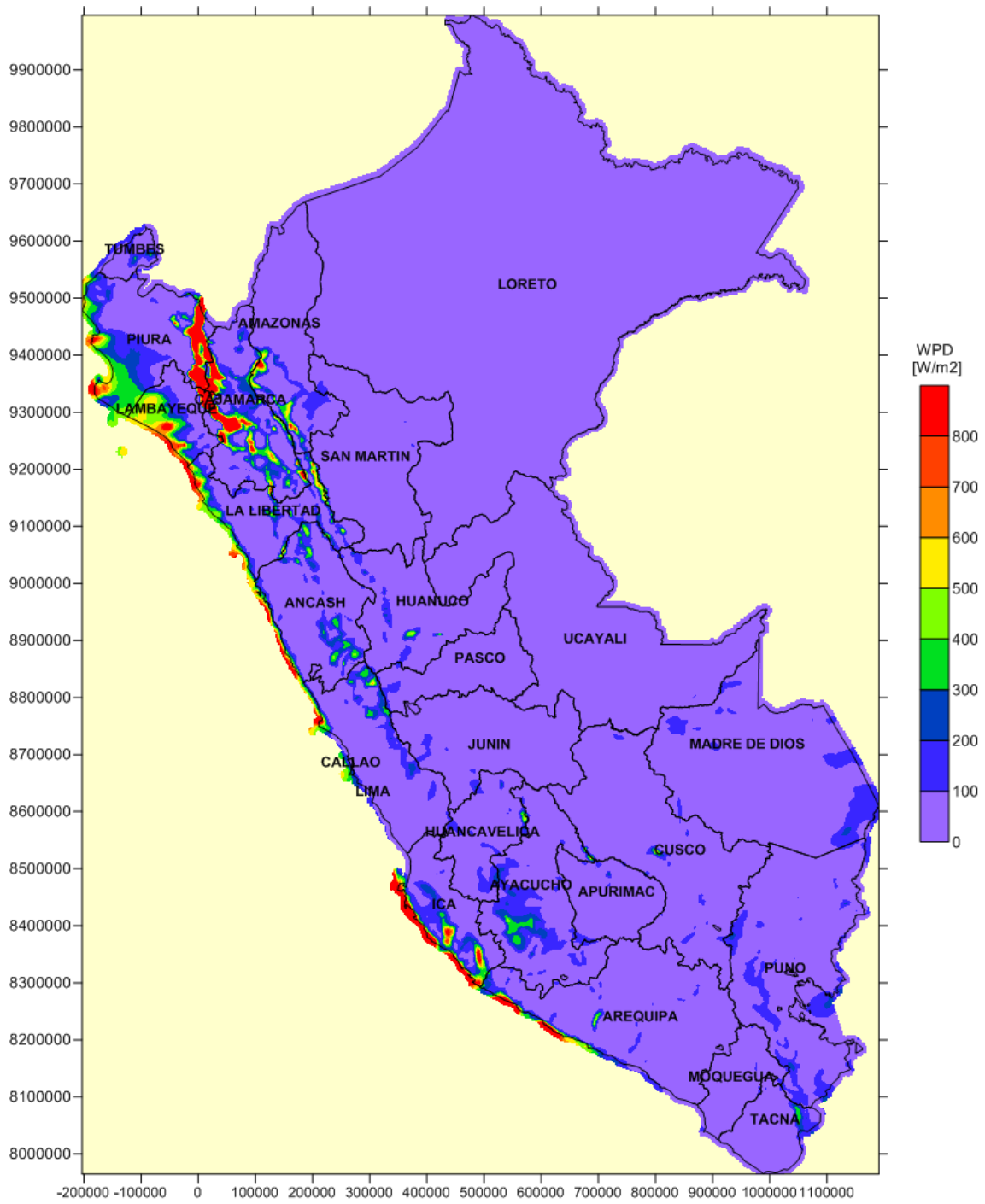
I.15. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN MARZO A 100 m



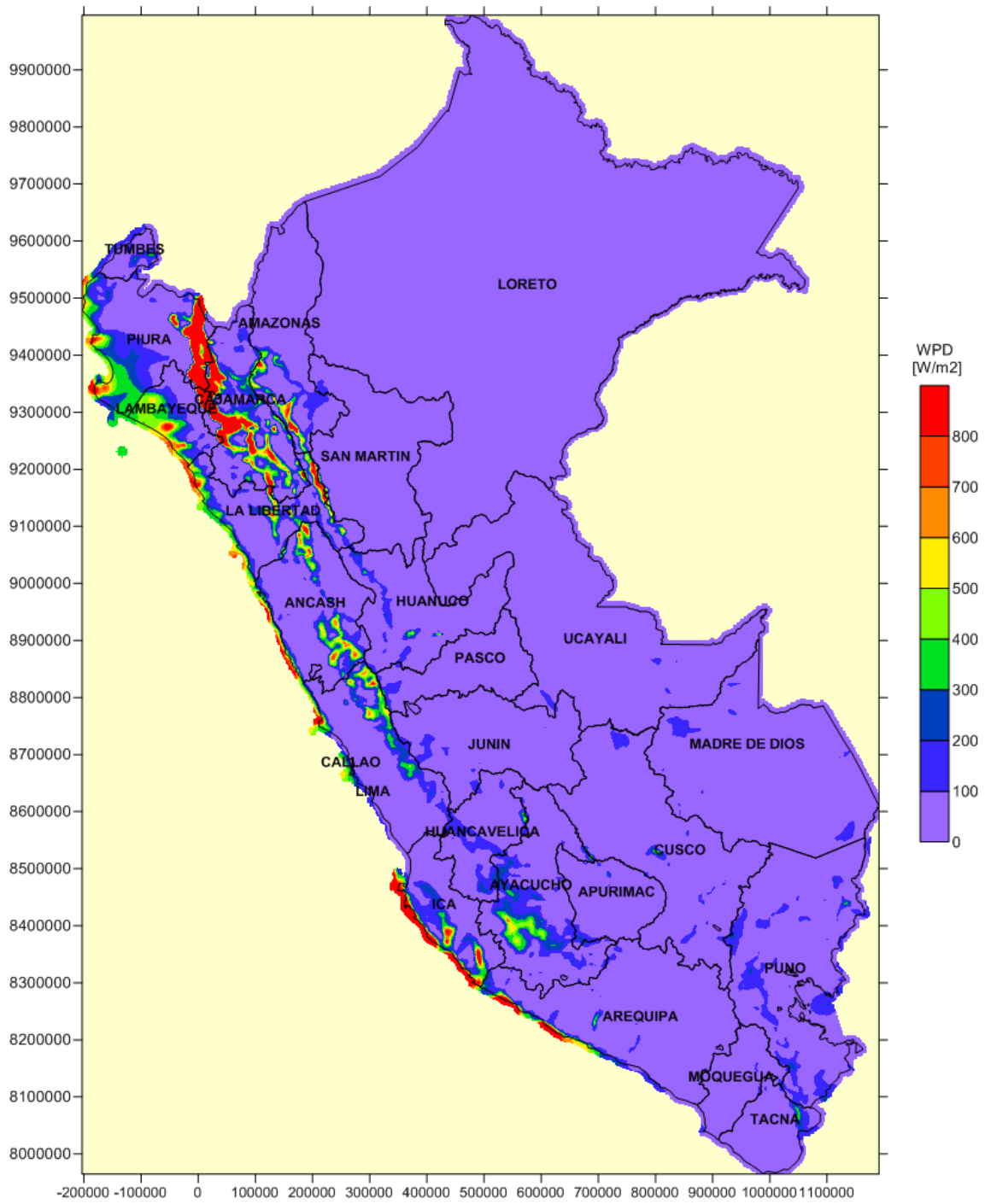
I.16. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN ABRIL A 100 m



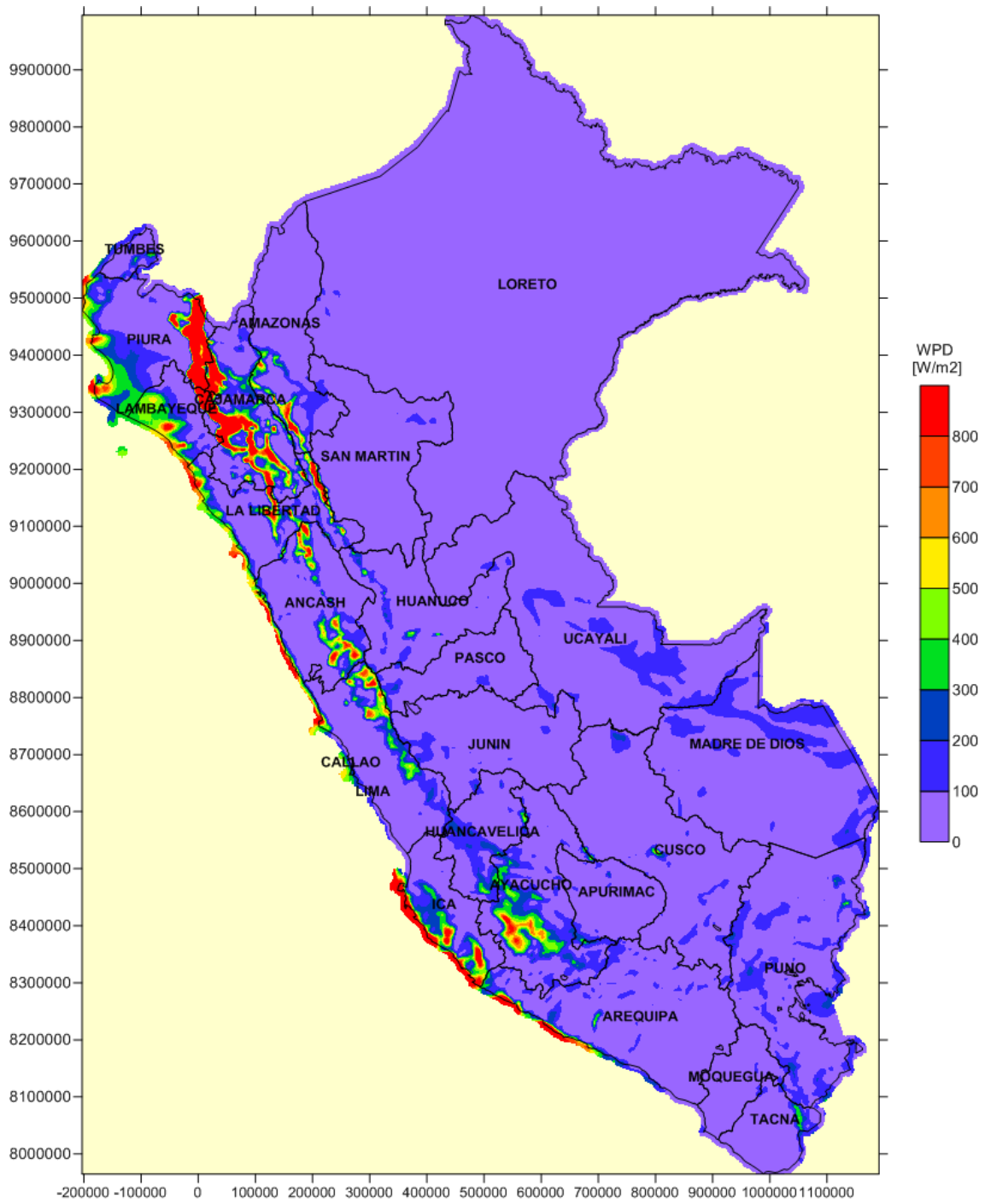
I.17. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN MAYO A 100 m



I.18. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN JUNIO A 100 m

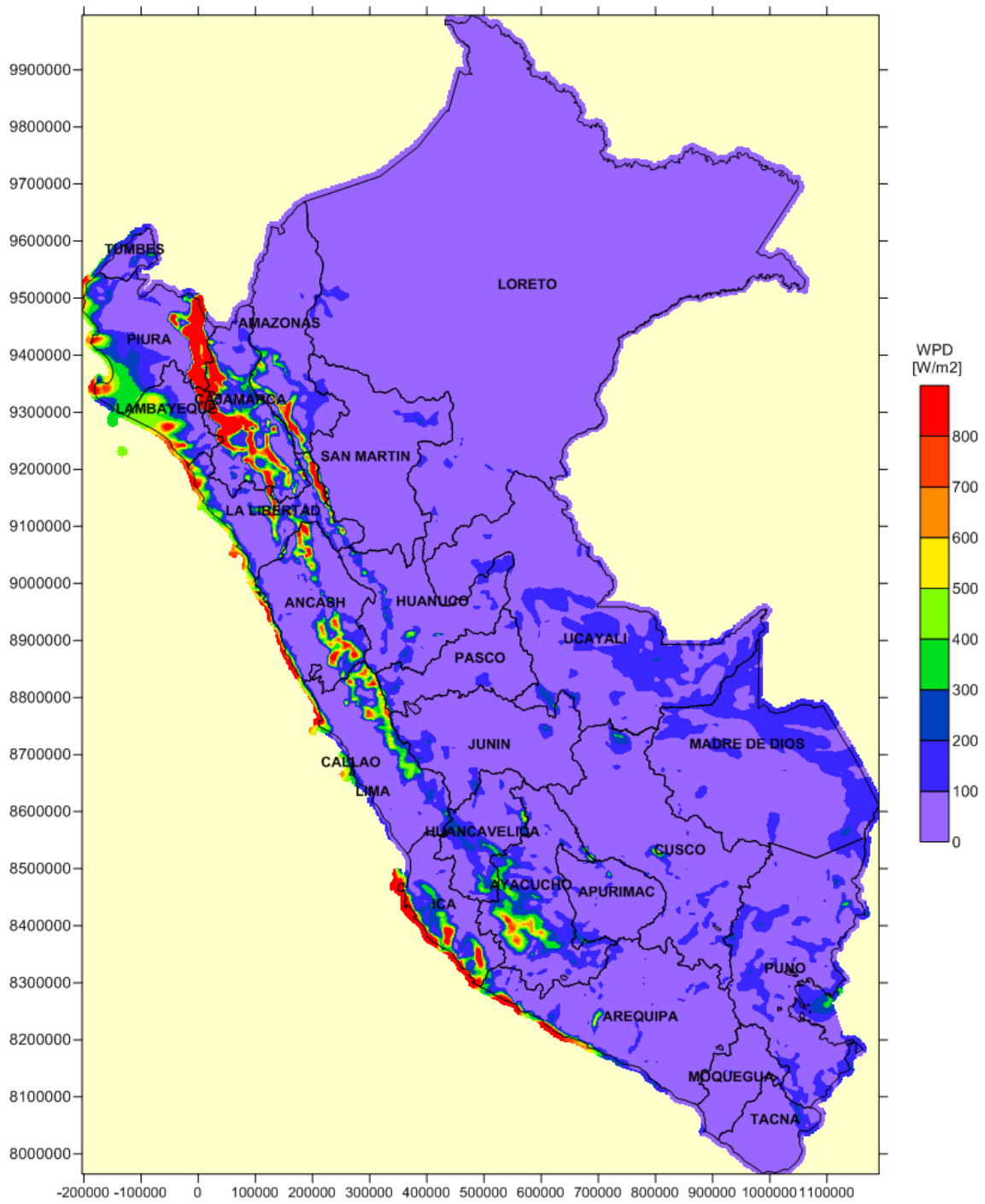


I.19. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN JULIO A 100 m

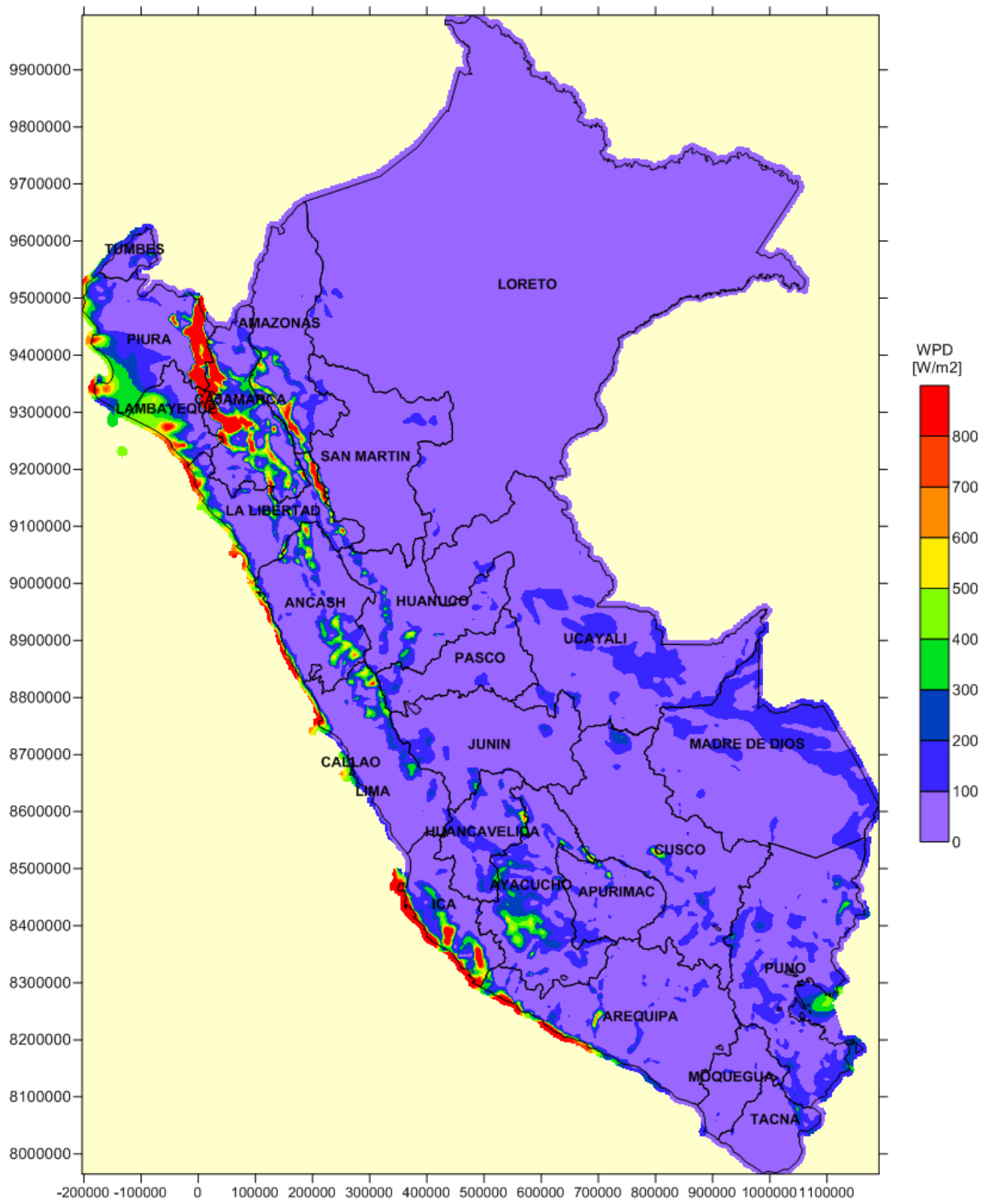




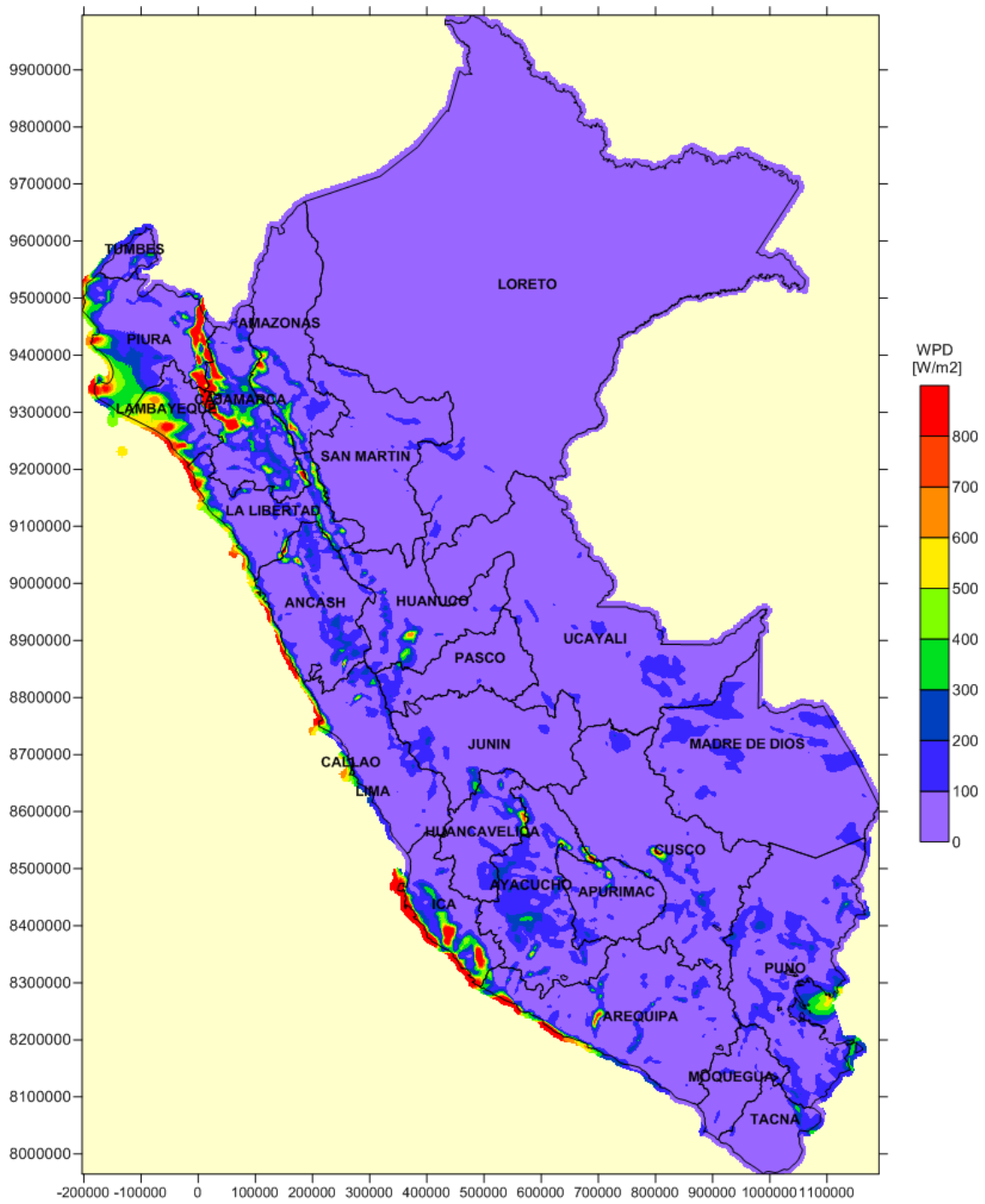
I.20. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN AGOSTO A 100 m



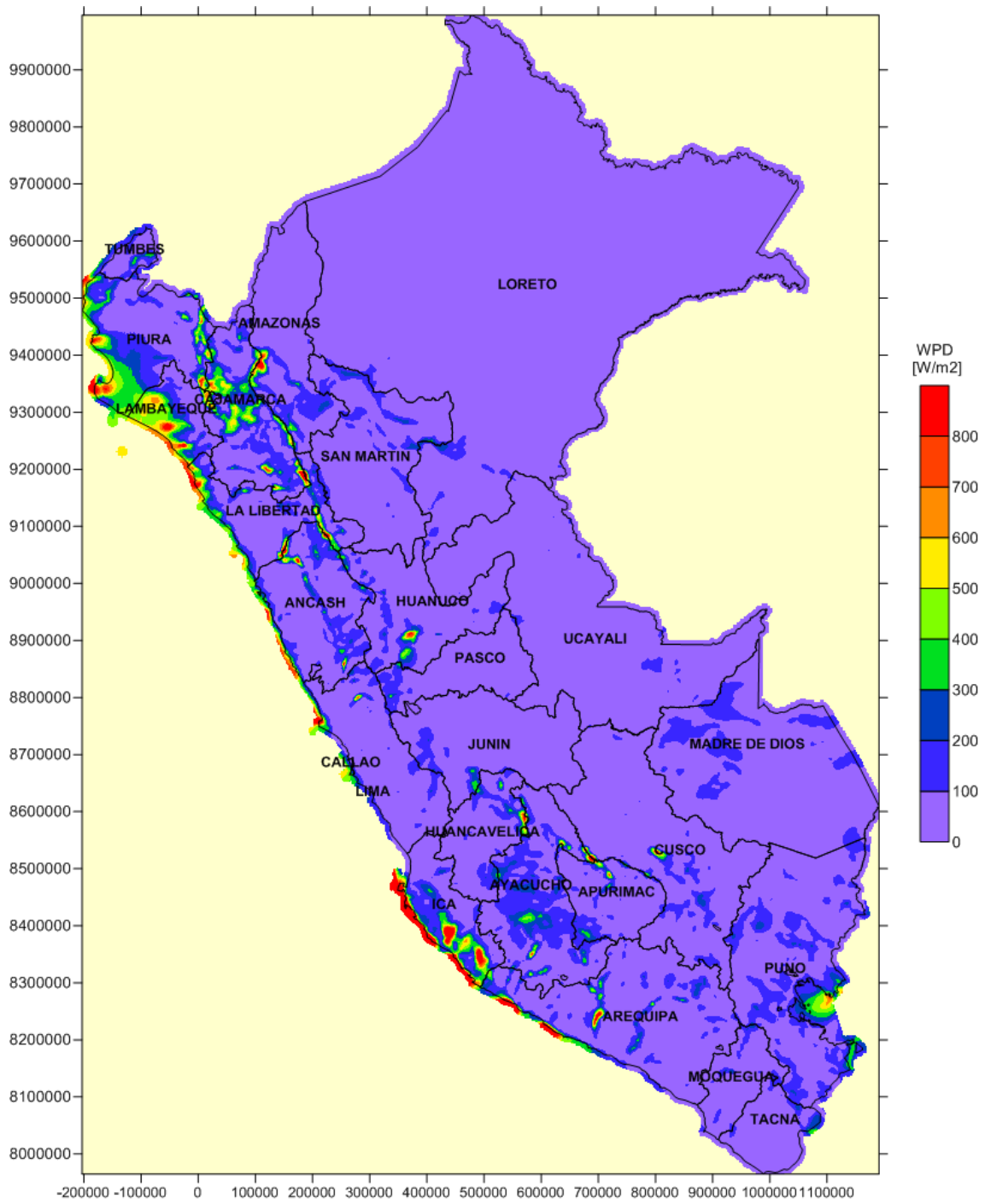
I.21. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN SEPTIEMBRE A 100 m



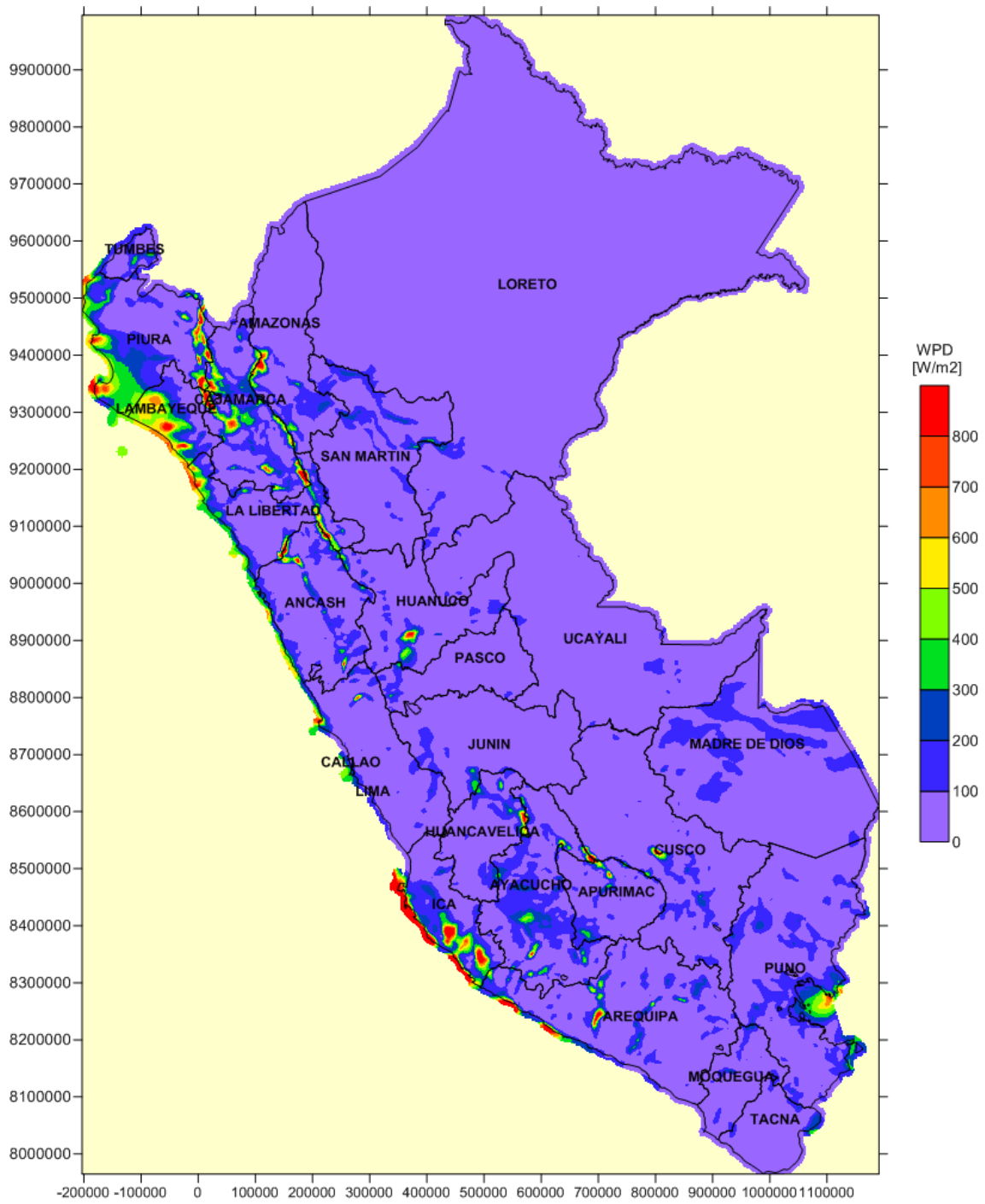
I.22. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN OCTUBRE A 100 m



I.23. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN NOVIEMBRE A 100 m

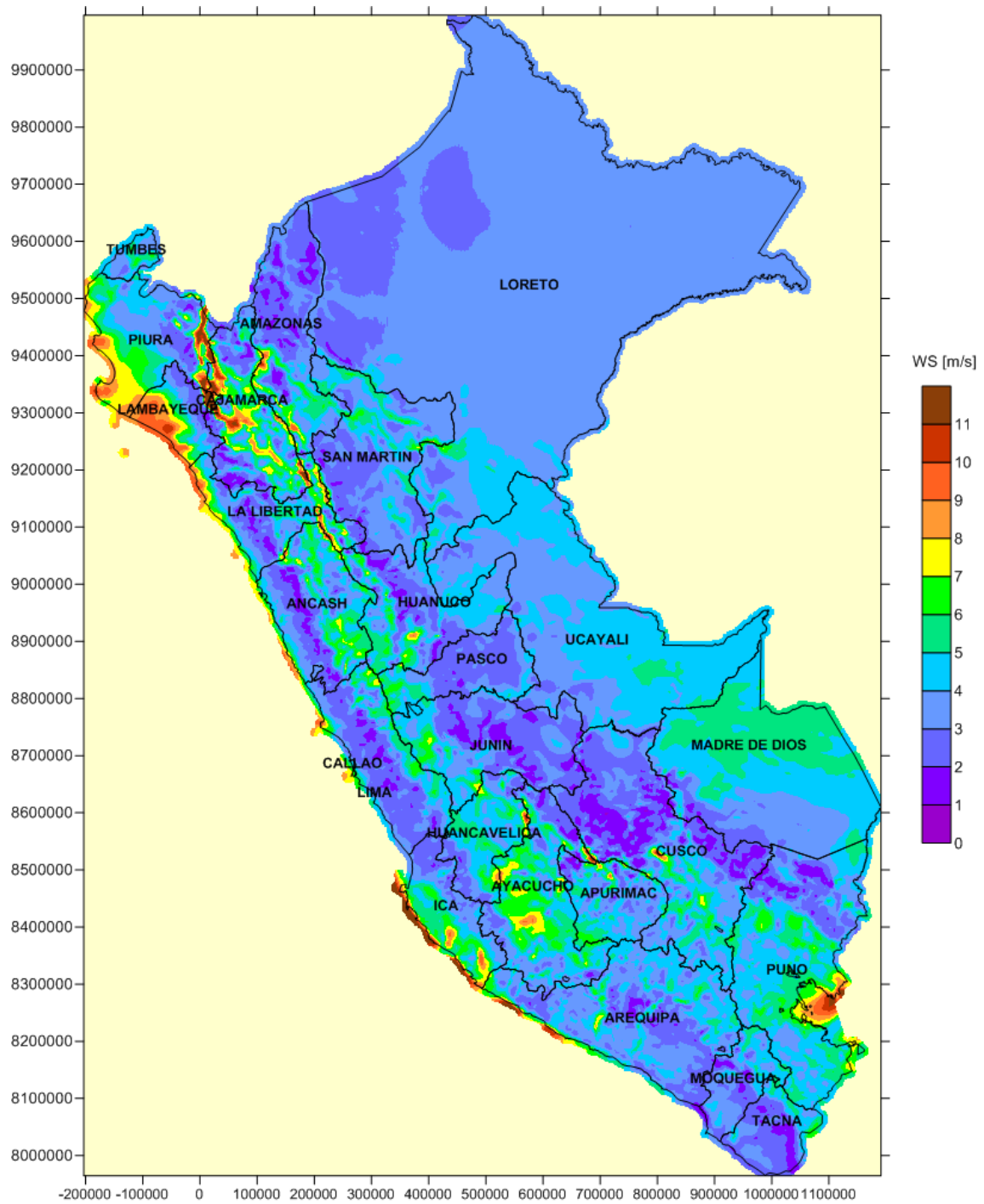


I.24. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN DICIEMBRE A 100 m

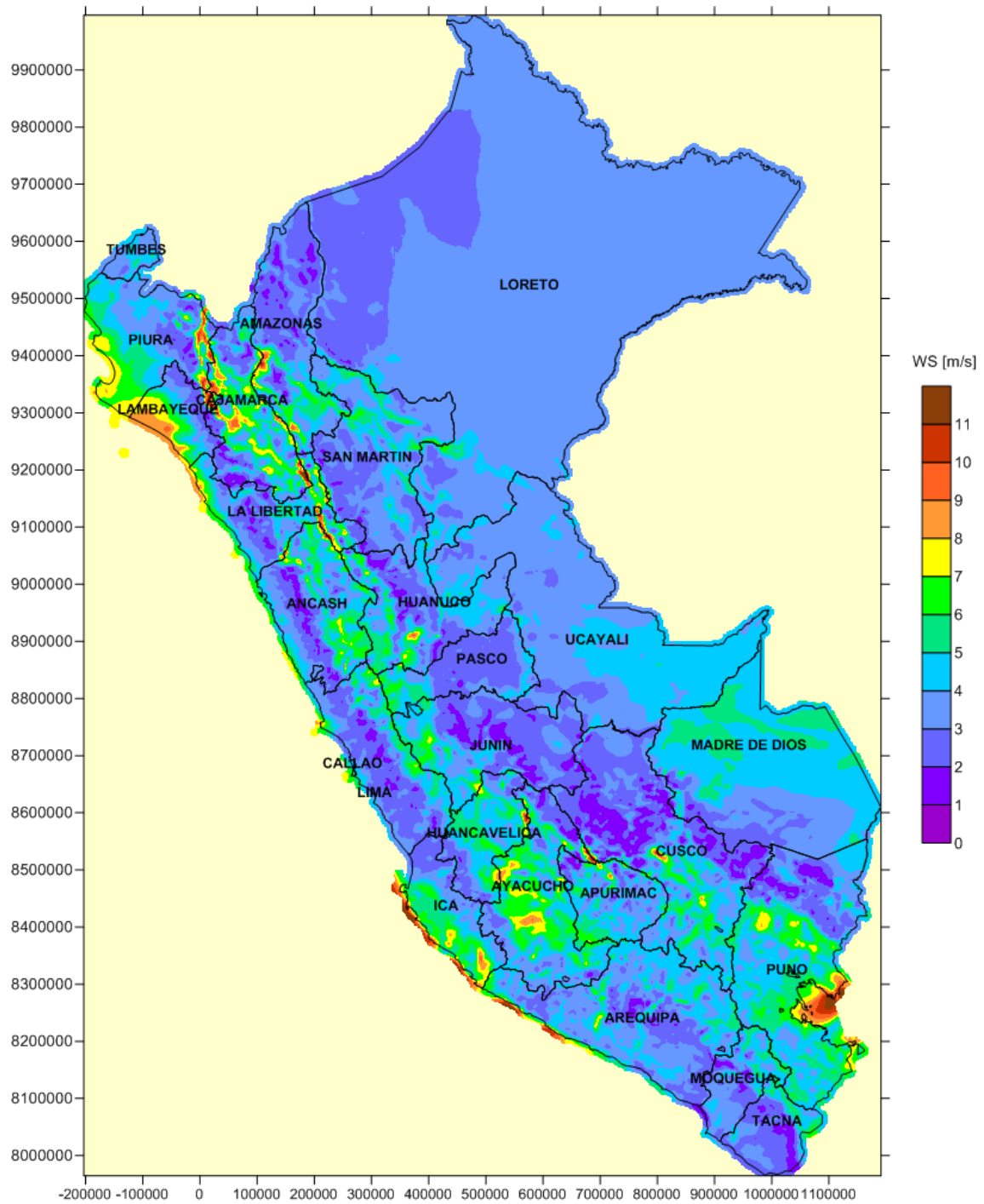


**ANEXO J.**  
**MAPAS DE POTENCIAL EÓLICO**  
**MENSUALES (125m)**

J.1. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN ENERO A 125 m

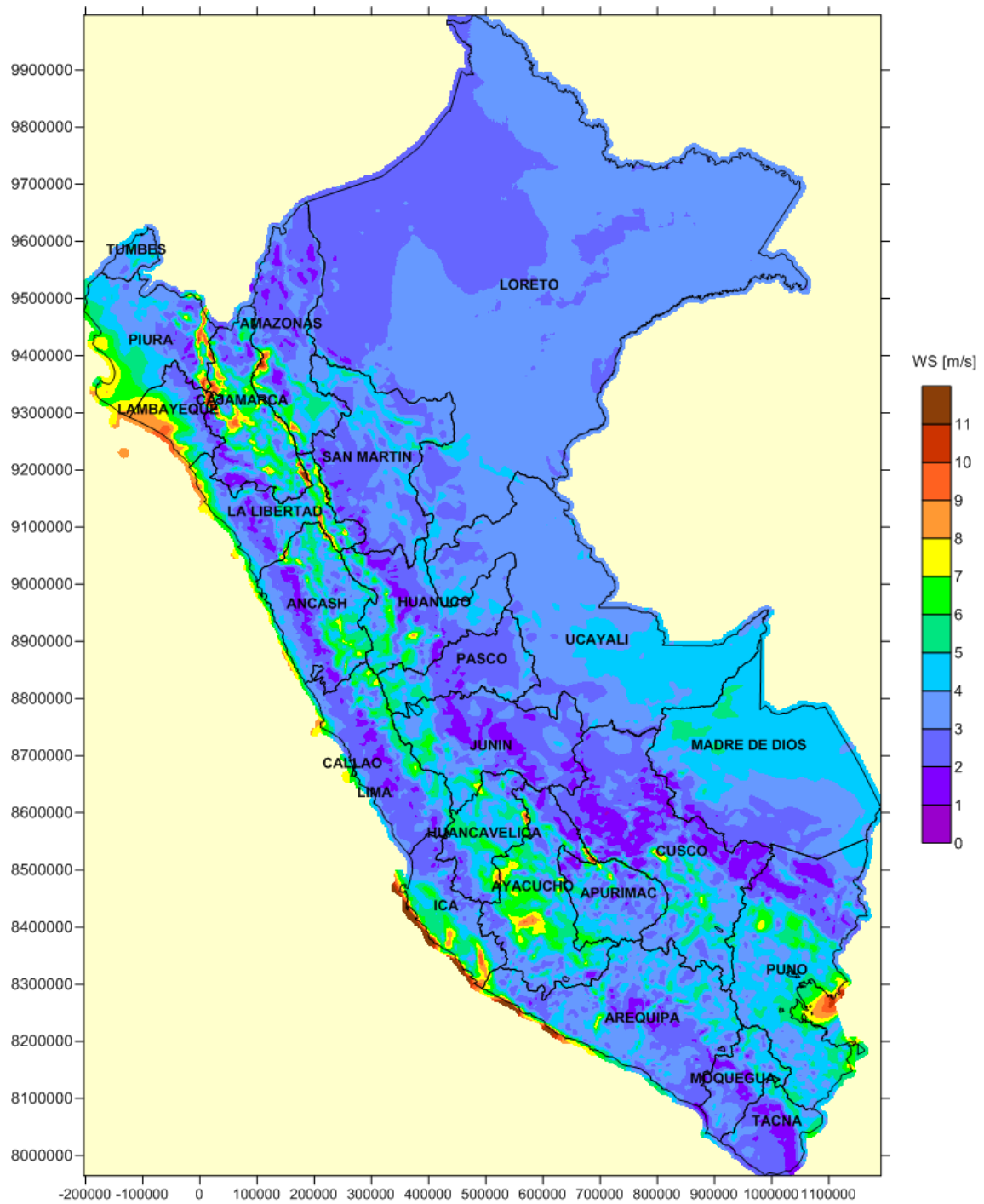


J.2. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN FEBRERO A 125 m

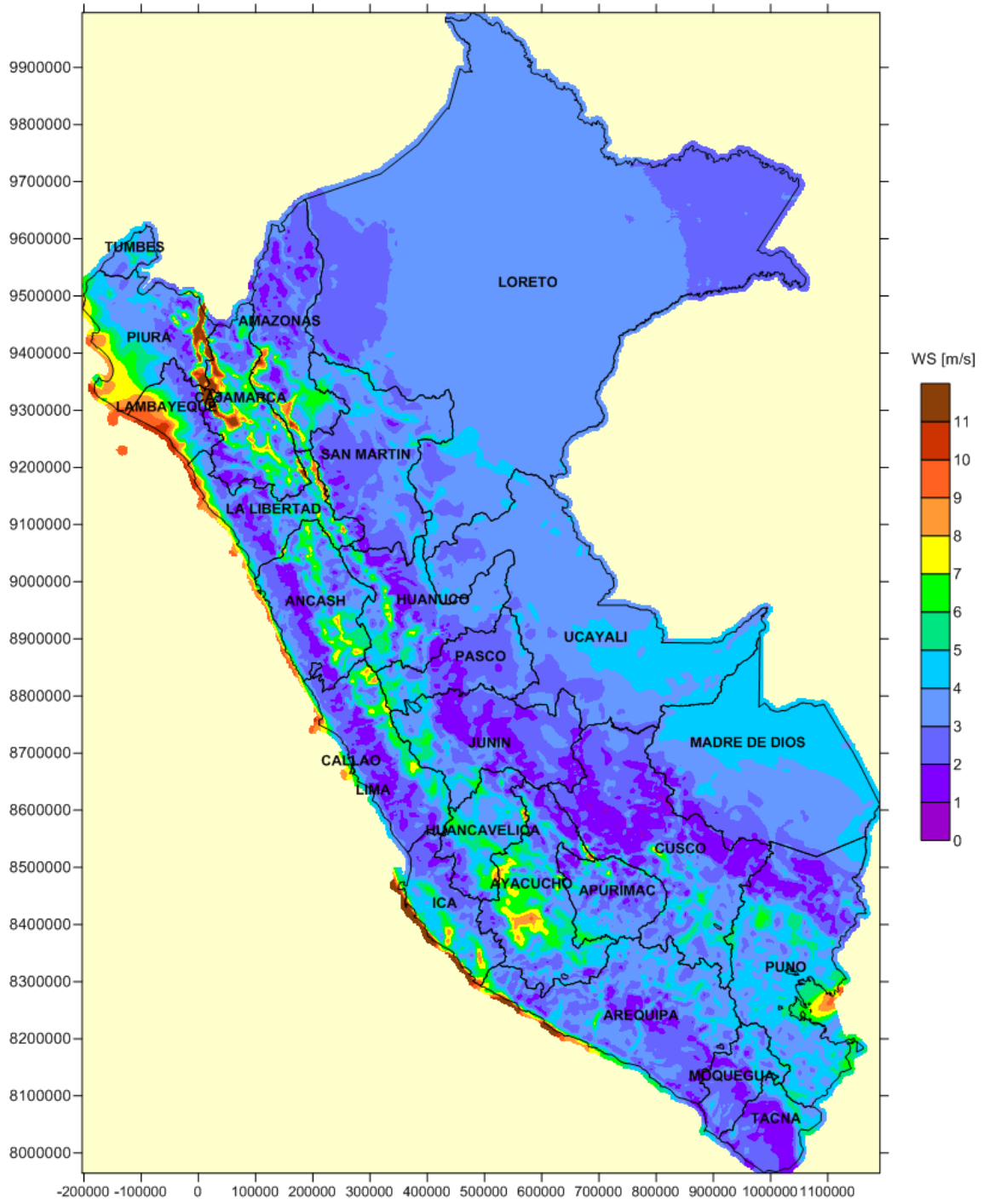




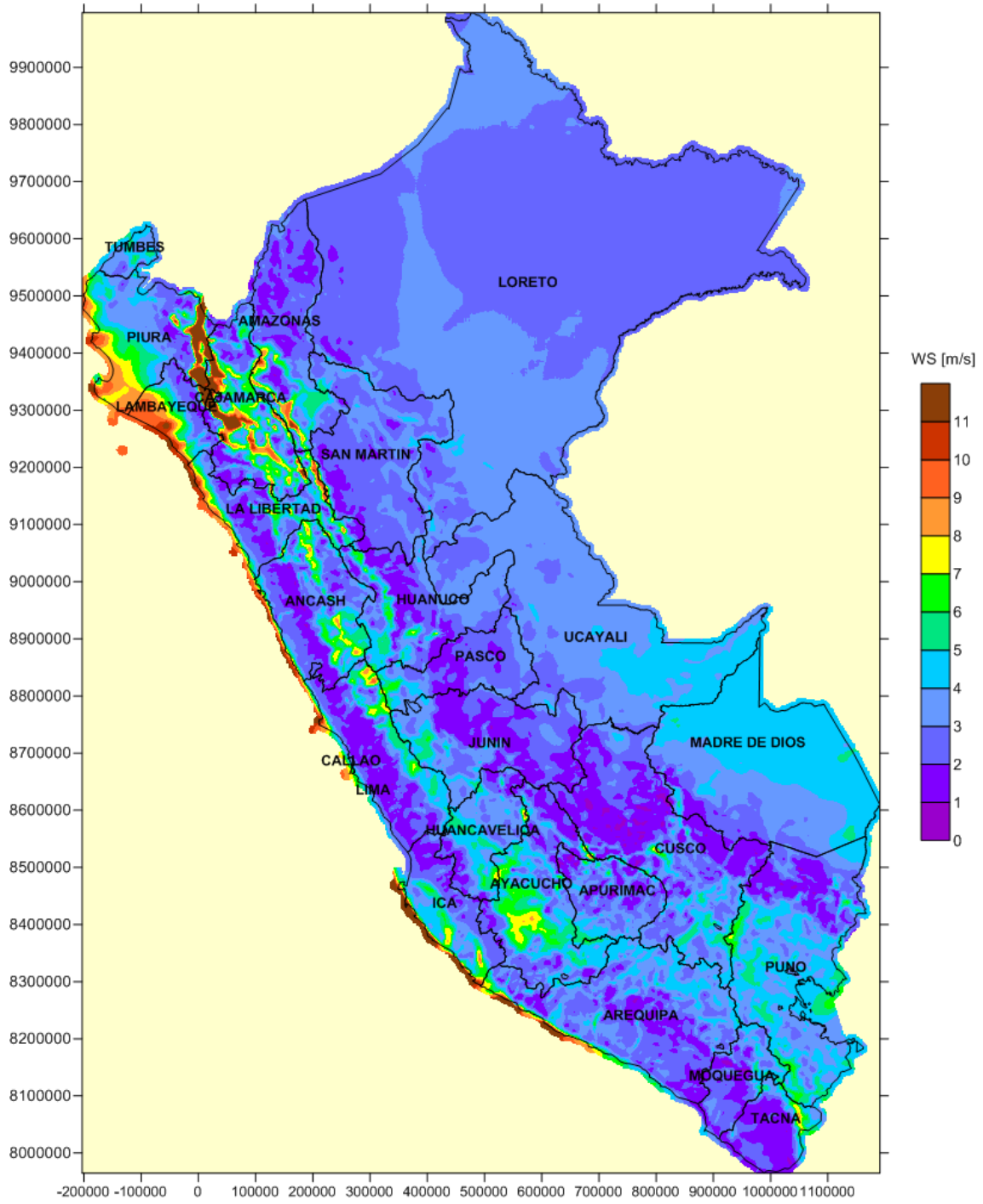
### J.3. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN MARZO A 125 m



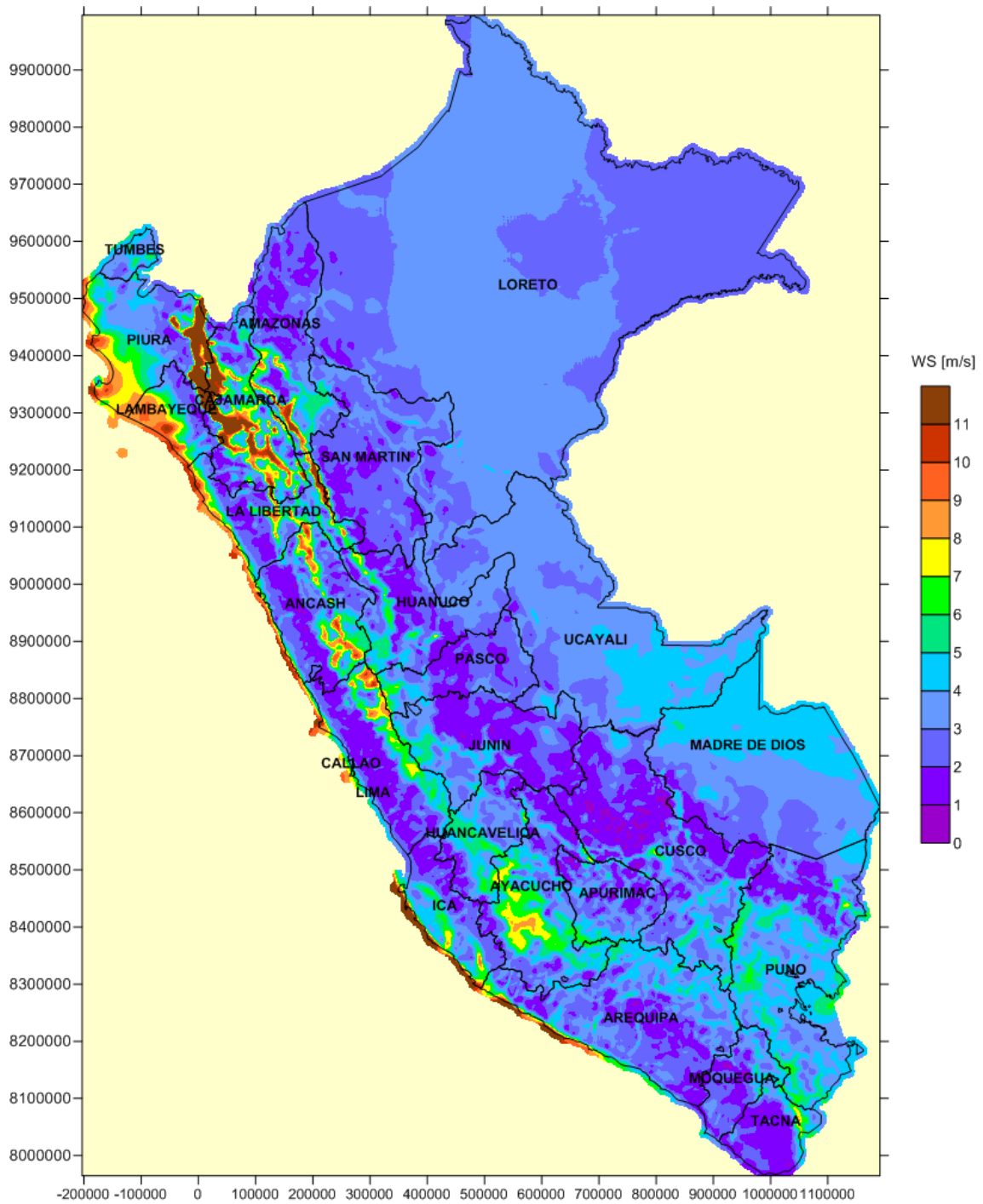
J.4. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN ABRIL A 125 m



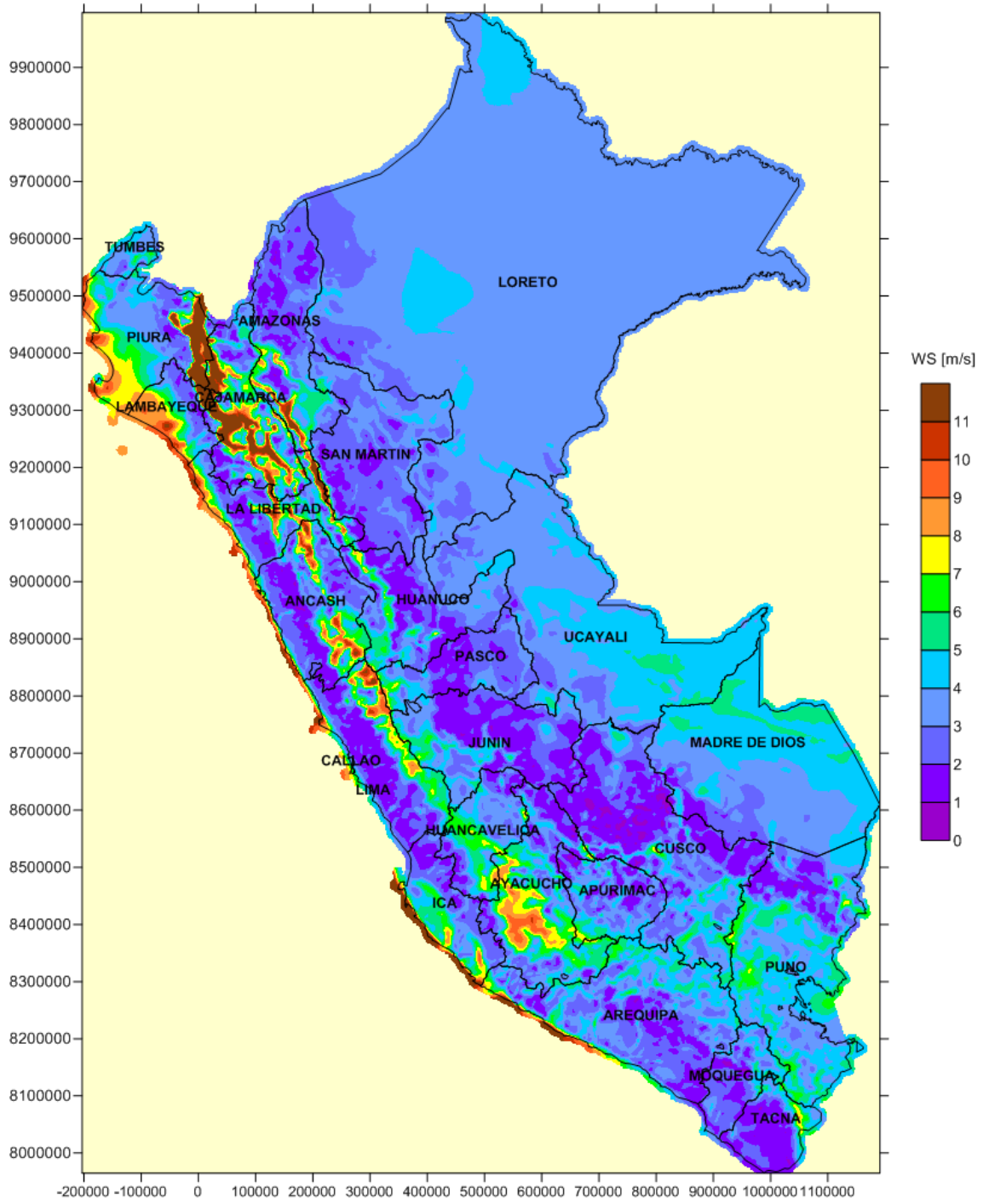
J.5. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN MAYO A 125 m



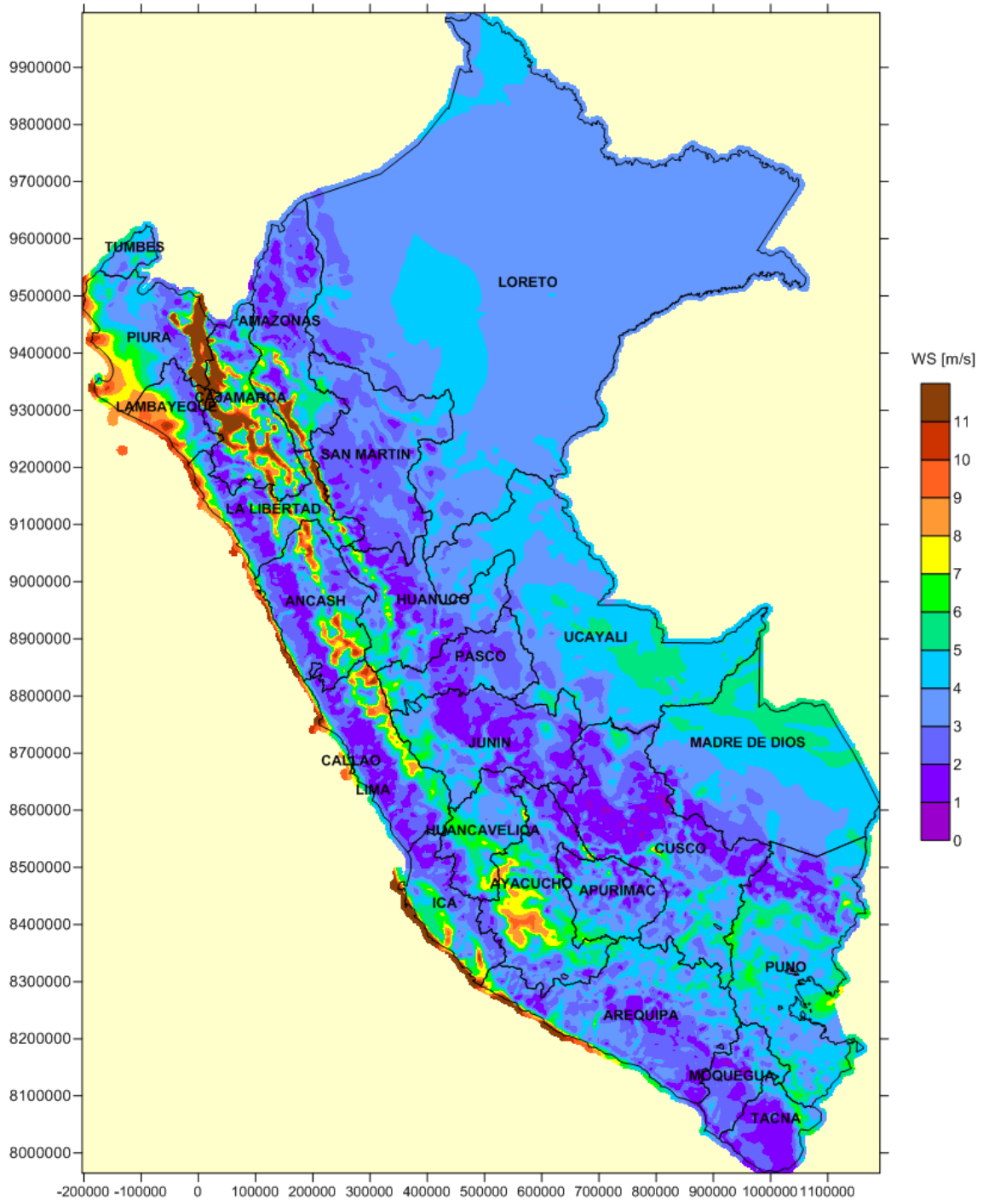
J.6. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN JUNIO A 125 m



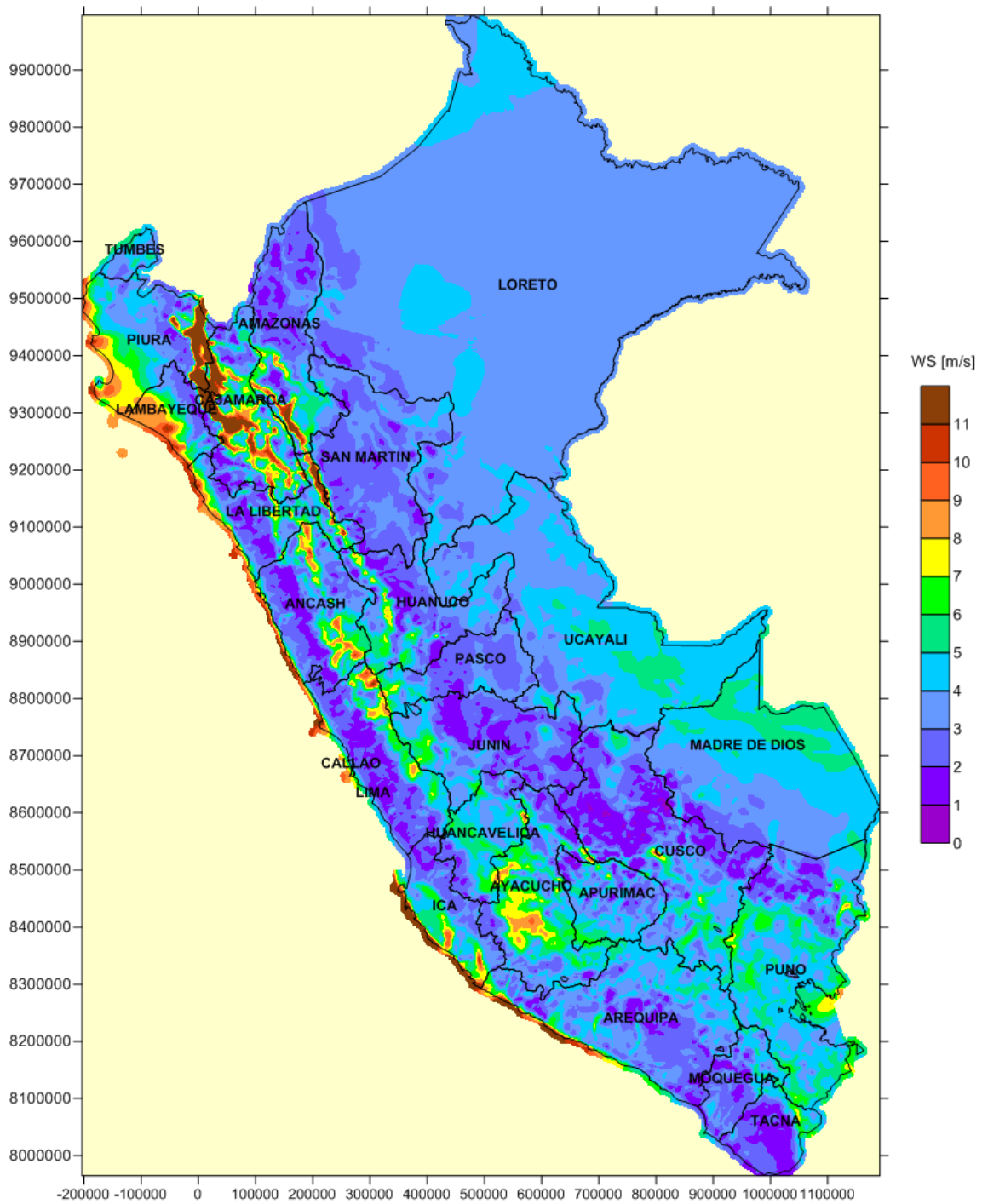
J.7. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN JULIO A 125 m



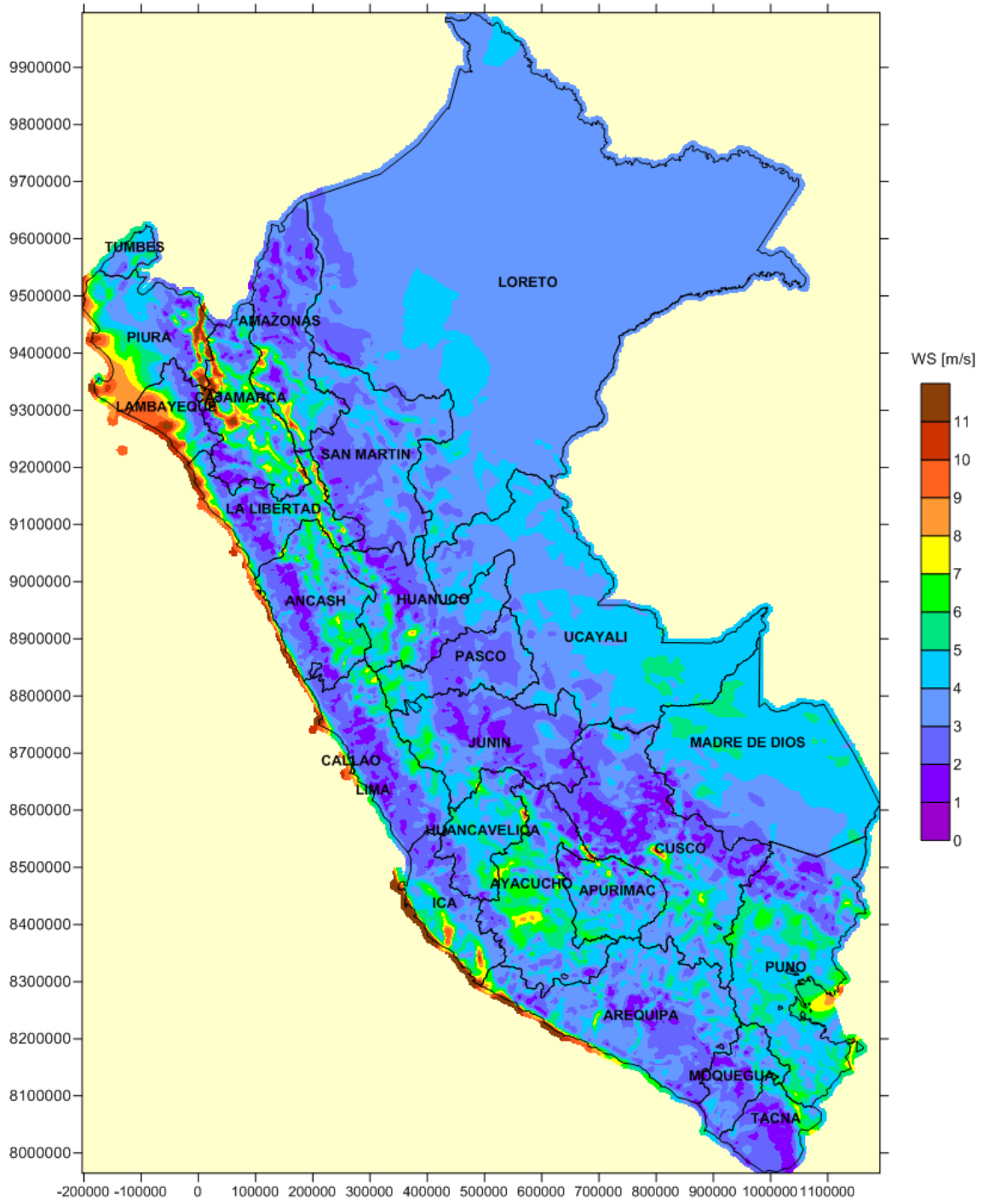
J.8. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN AGOSTO A 125 m



J.9. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN SEPTIEMBRE A 125 m

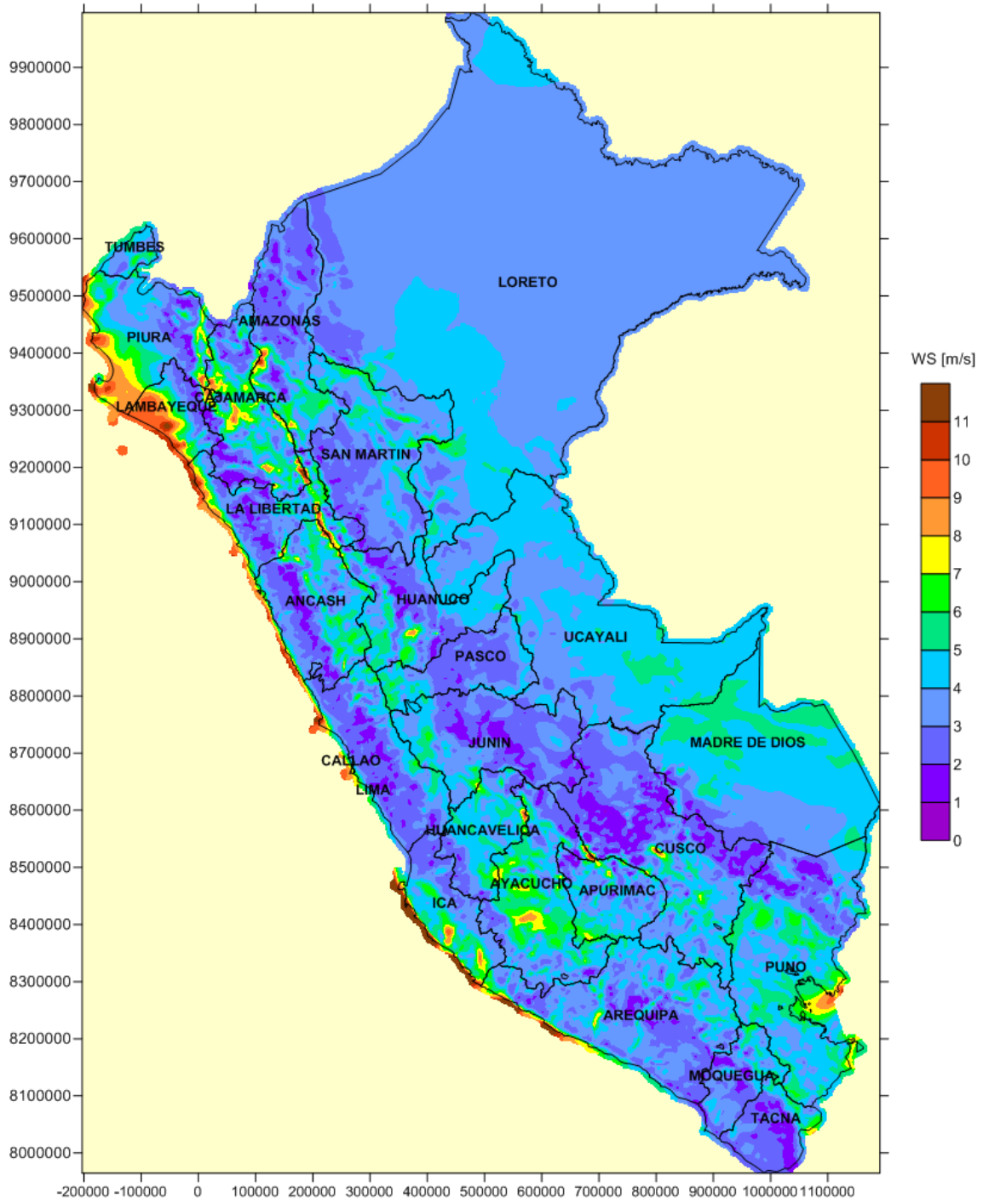


J.10. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN OCTUBRE A 125 m

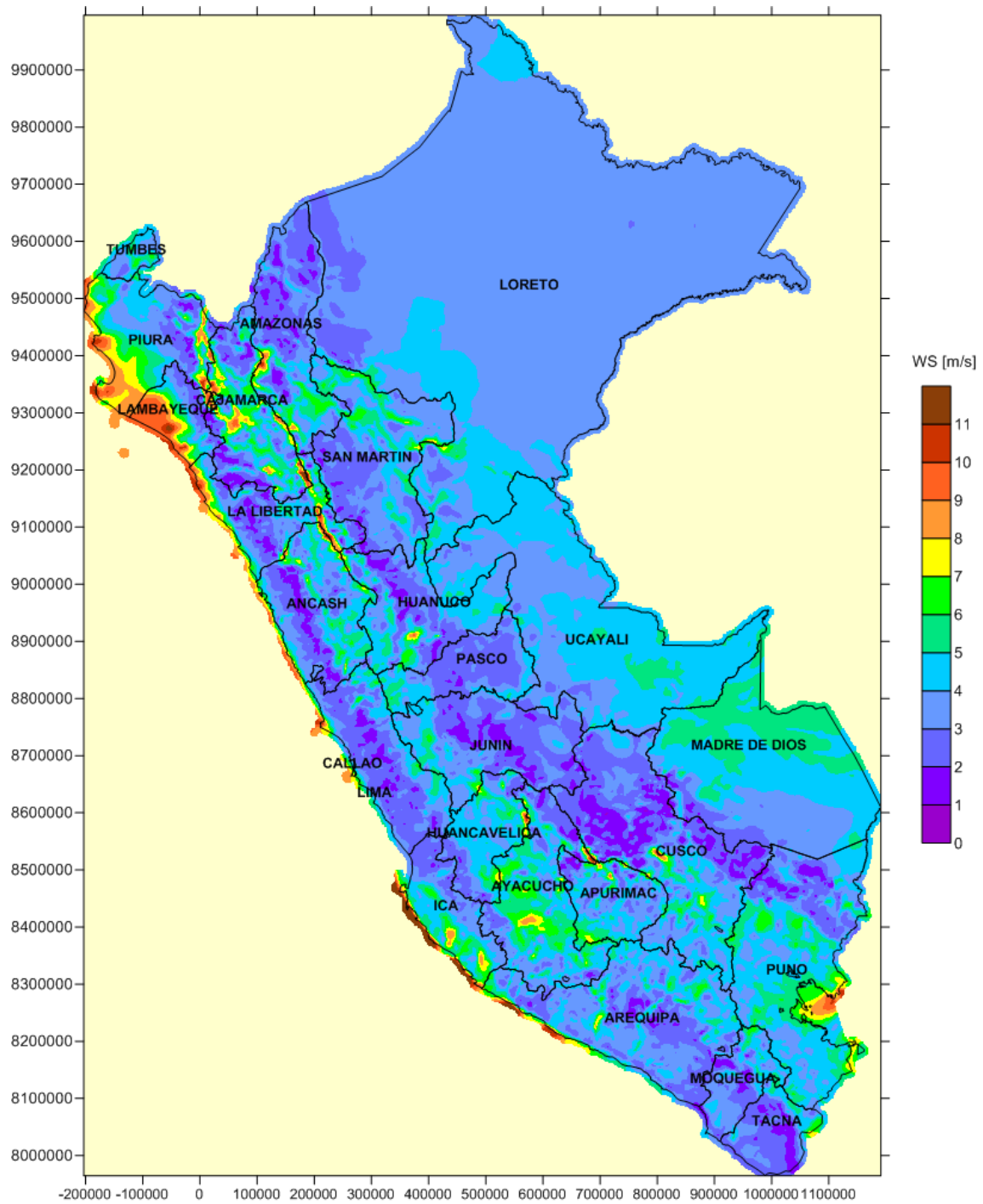




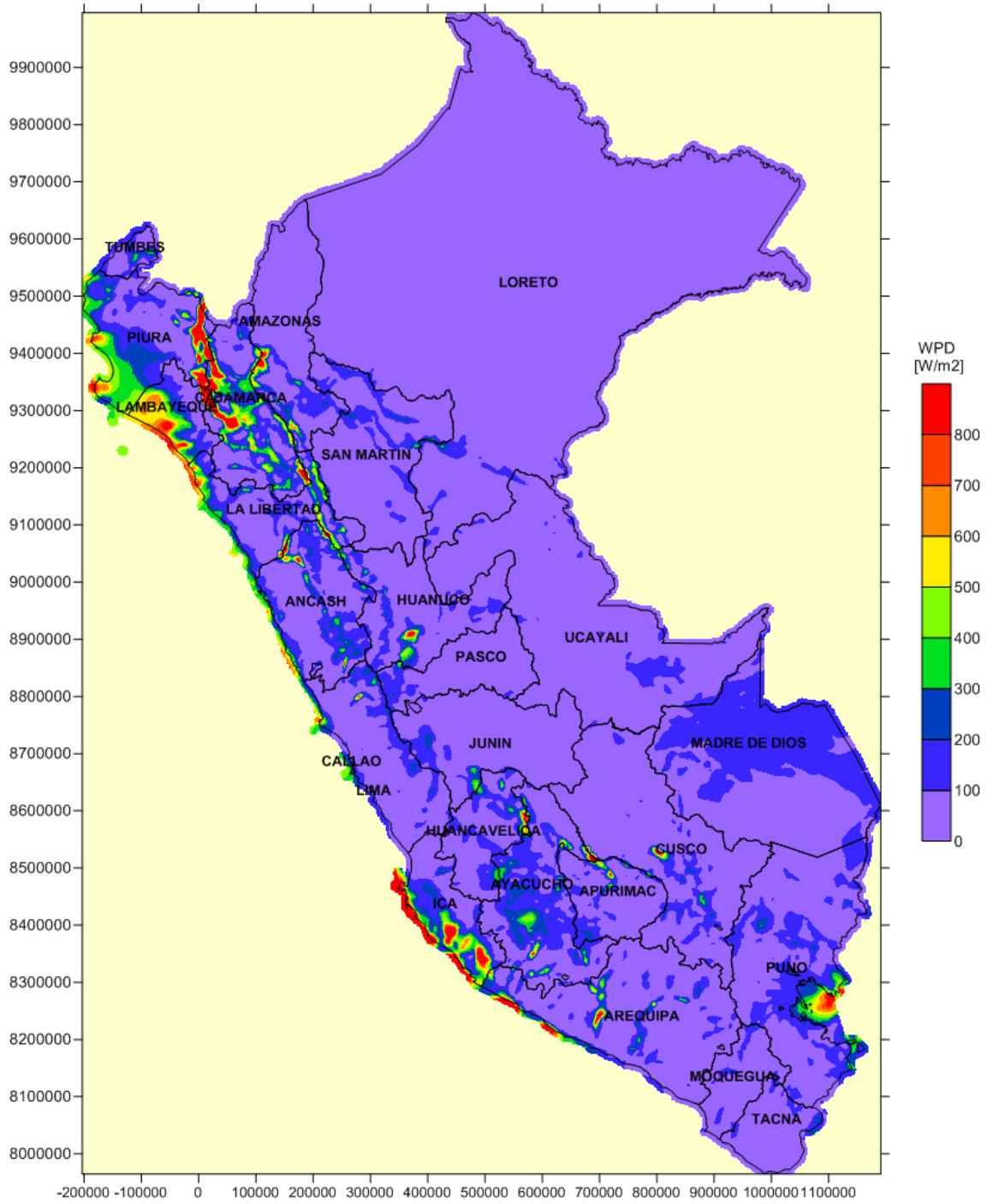
J.11. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN NOVIEMBRE A 125 m



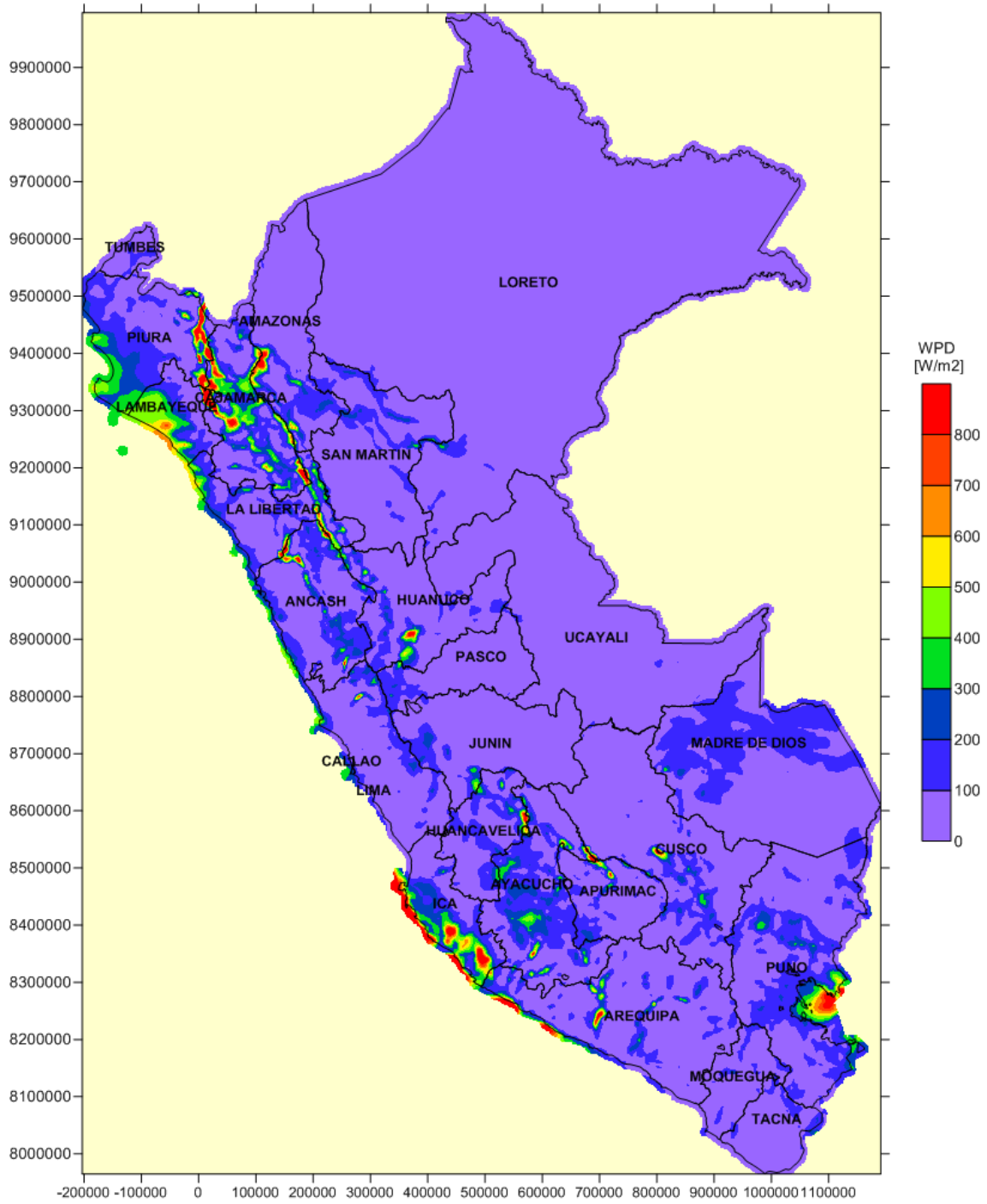
J.12. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN DICIEMBRE A 125 m



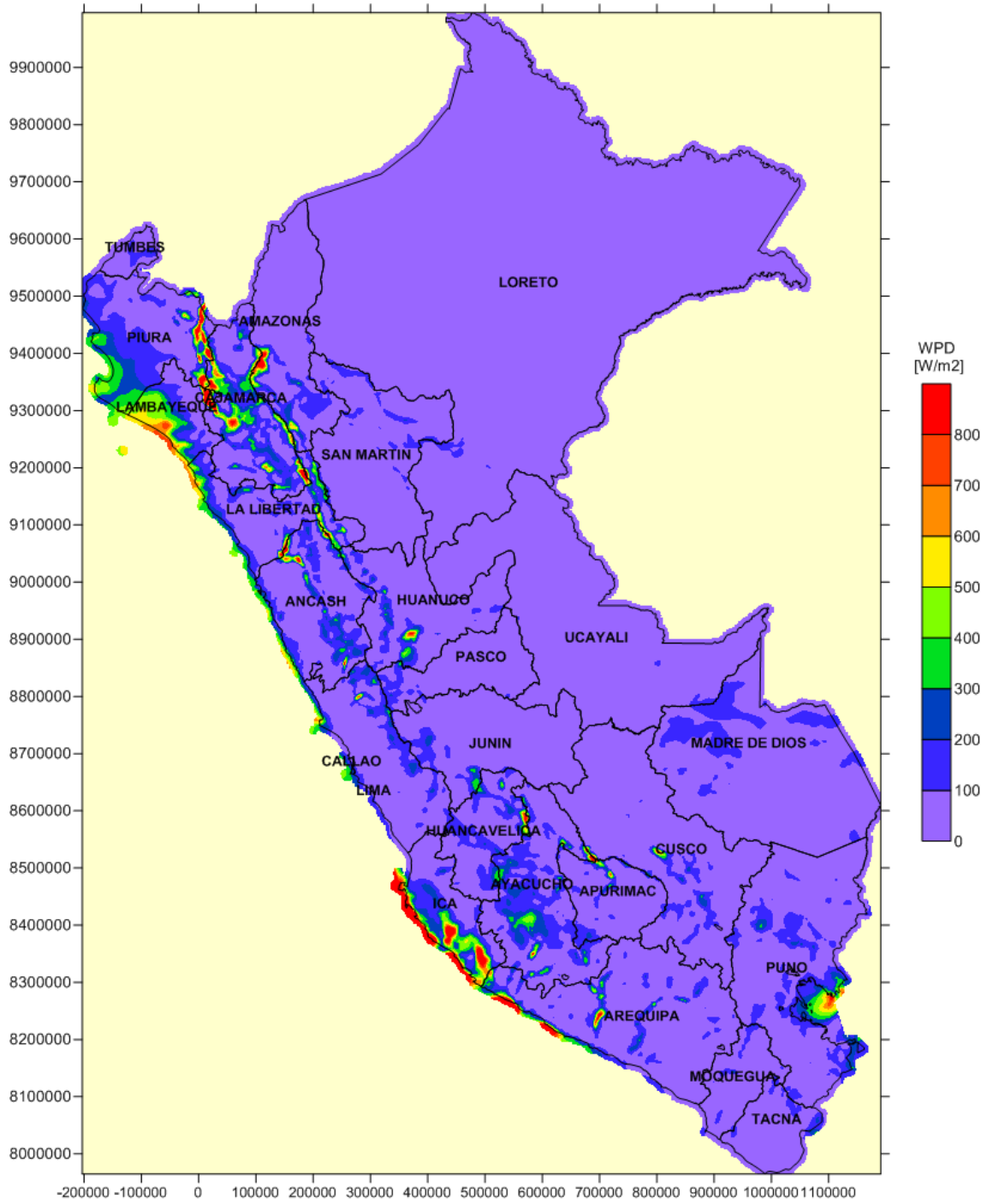
J.13. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN ENERO A 125 m



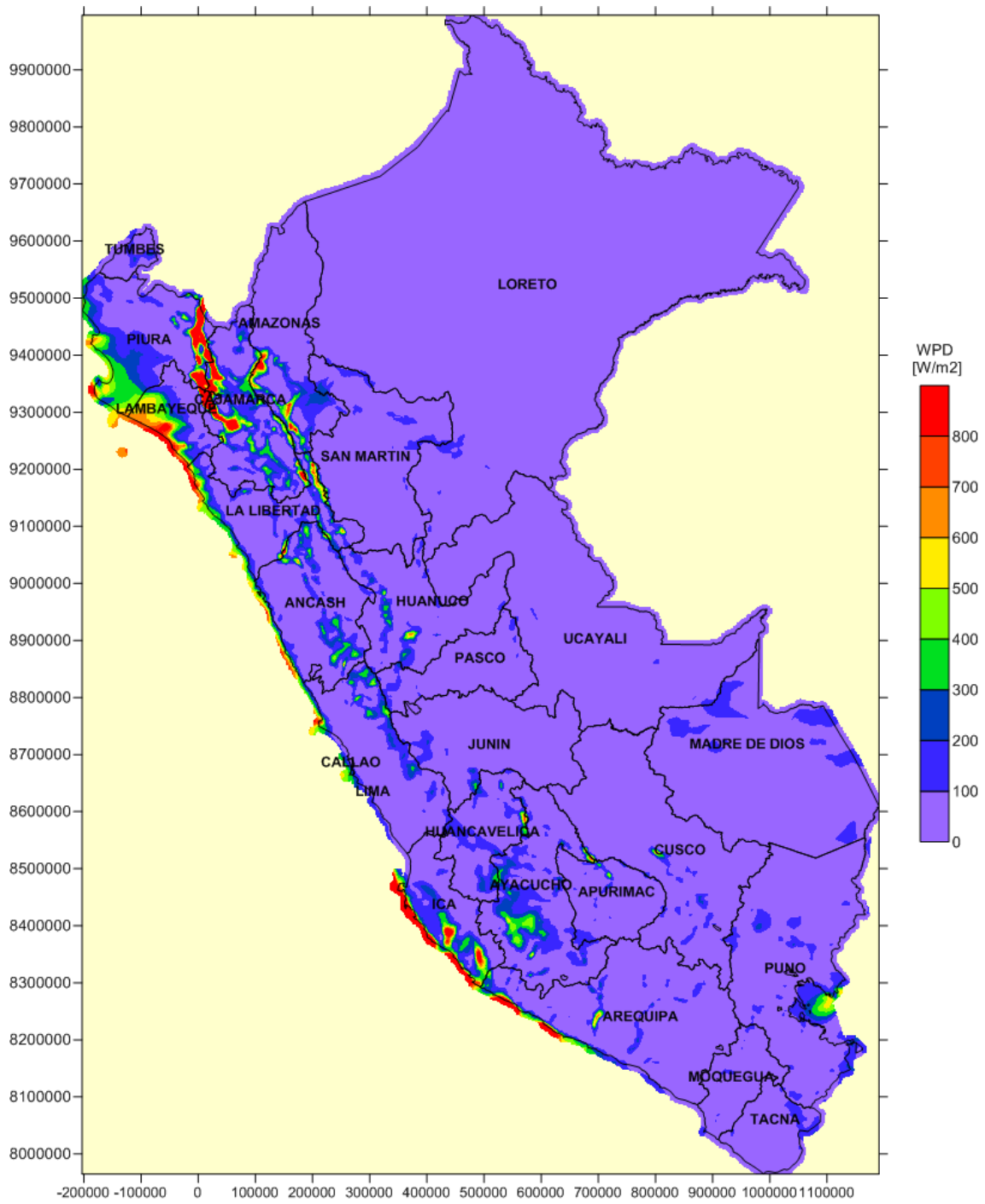
J.14. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN FEBRERO A 125 m



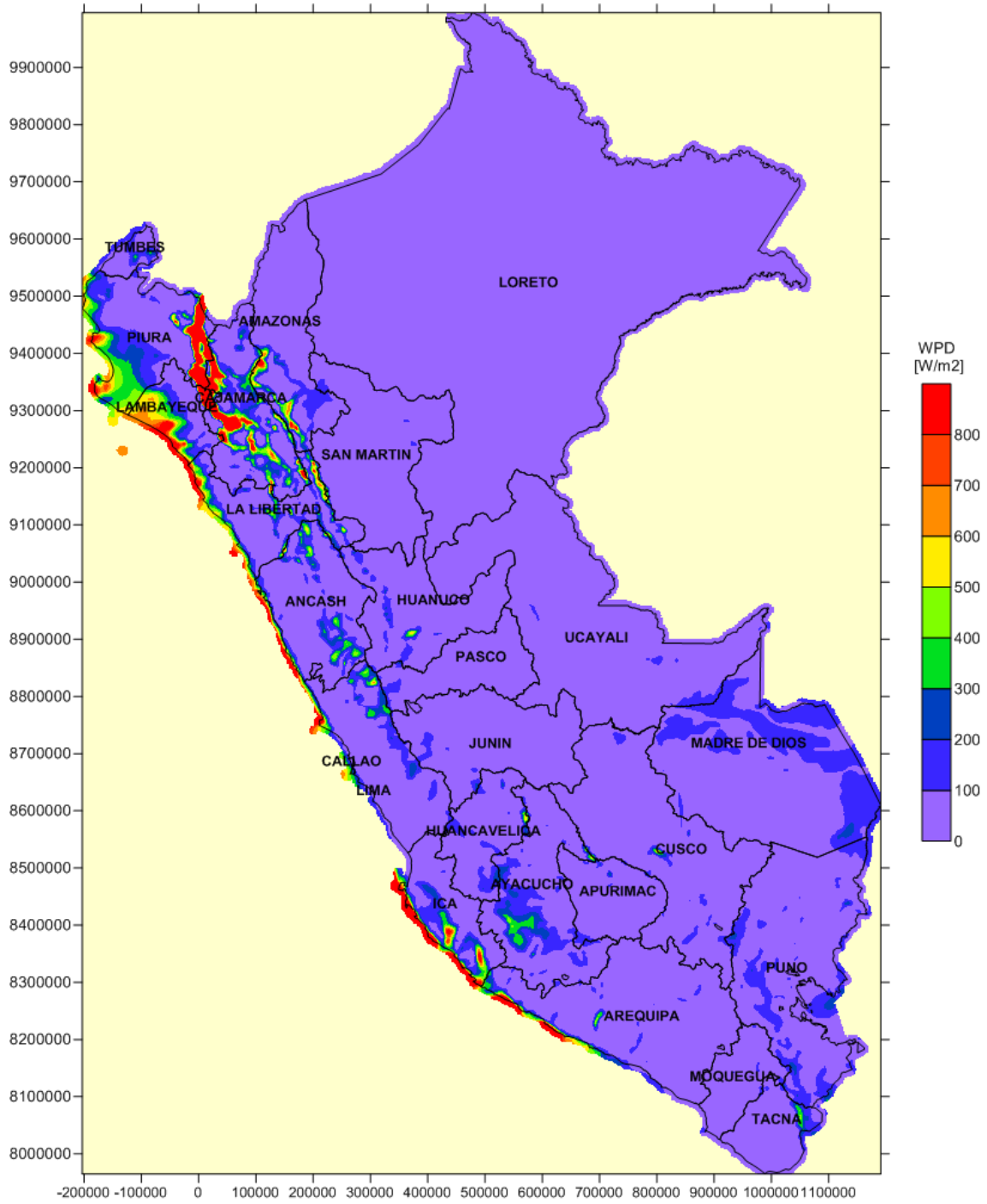
J.15. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN MARZO A 125 m



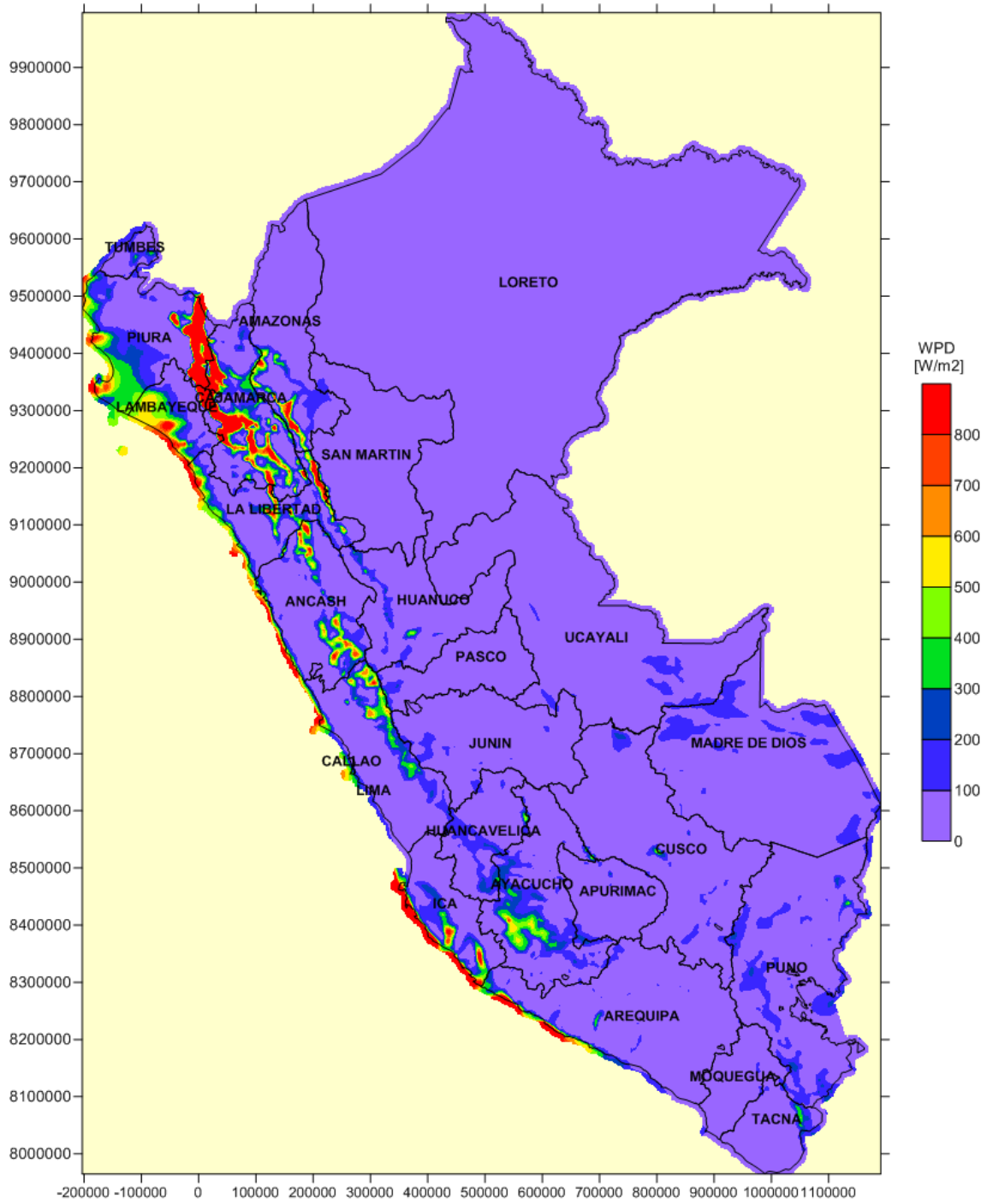
J.16. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN ABRIL A 1 m



J.17. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN MAYO A 125 m

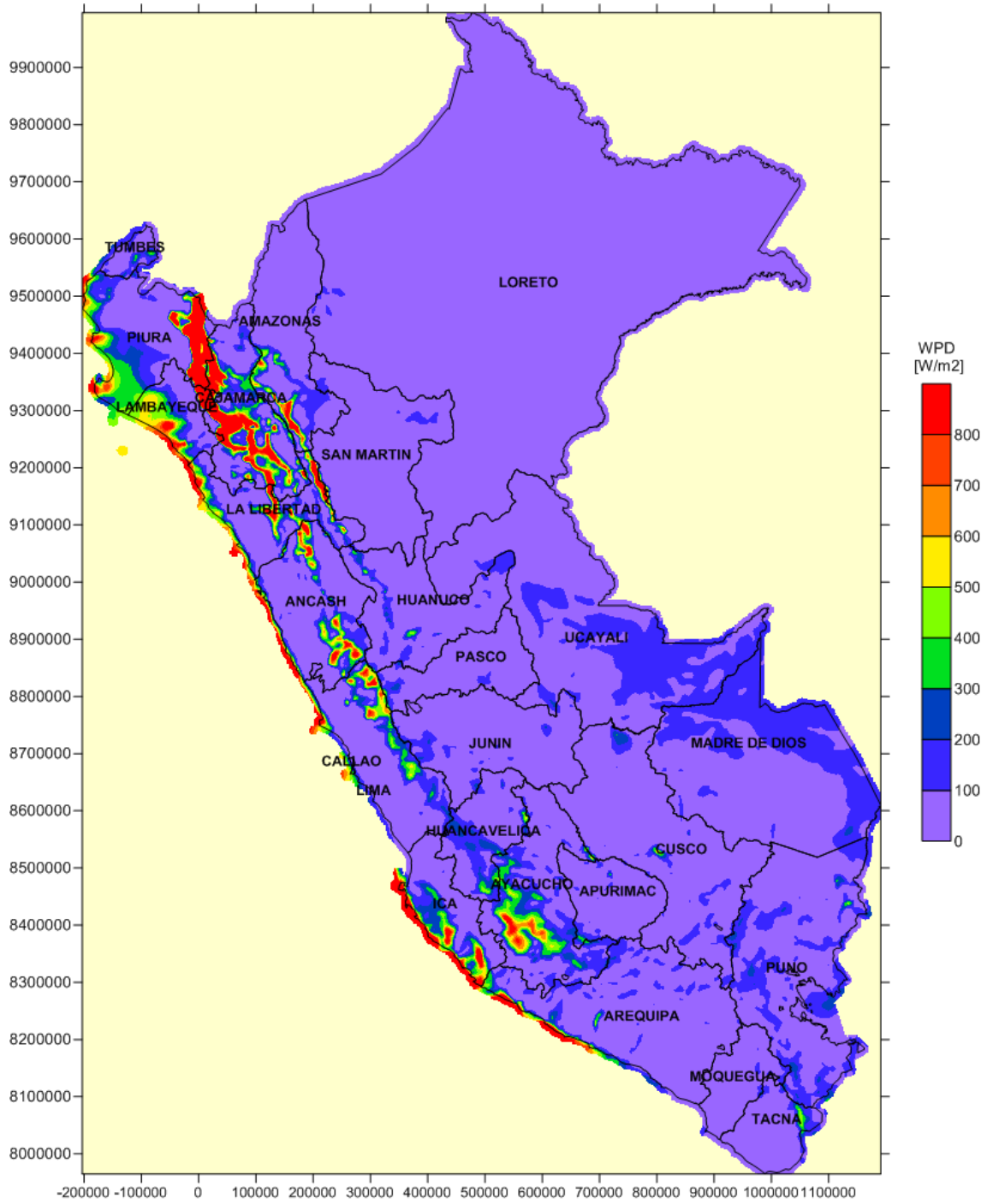


J.18. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN JUNIO A 125 m

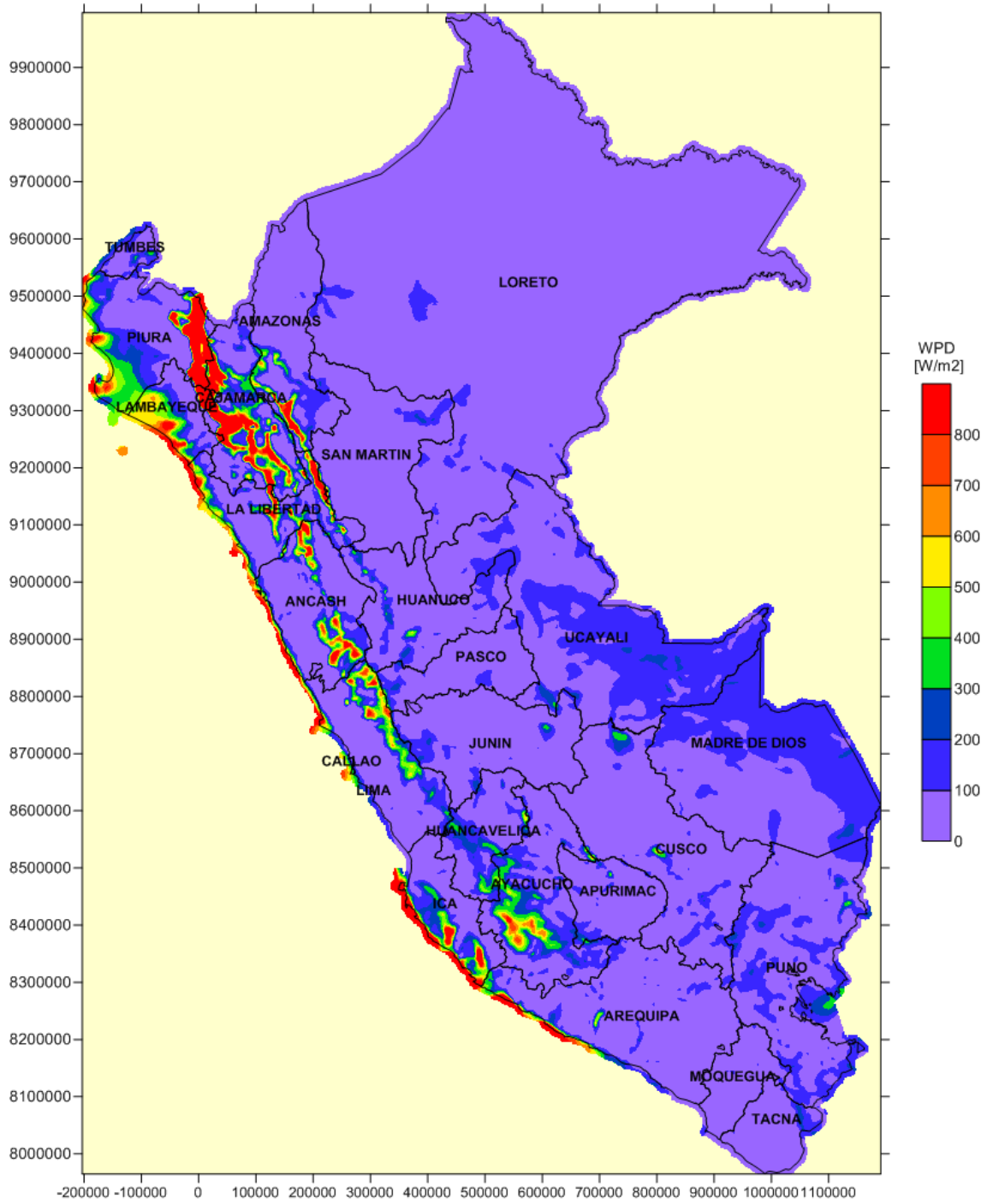




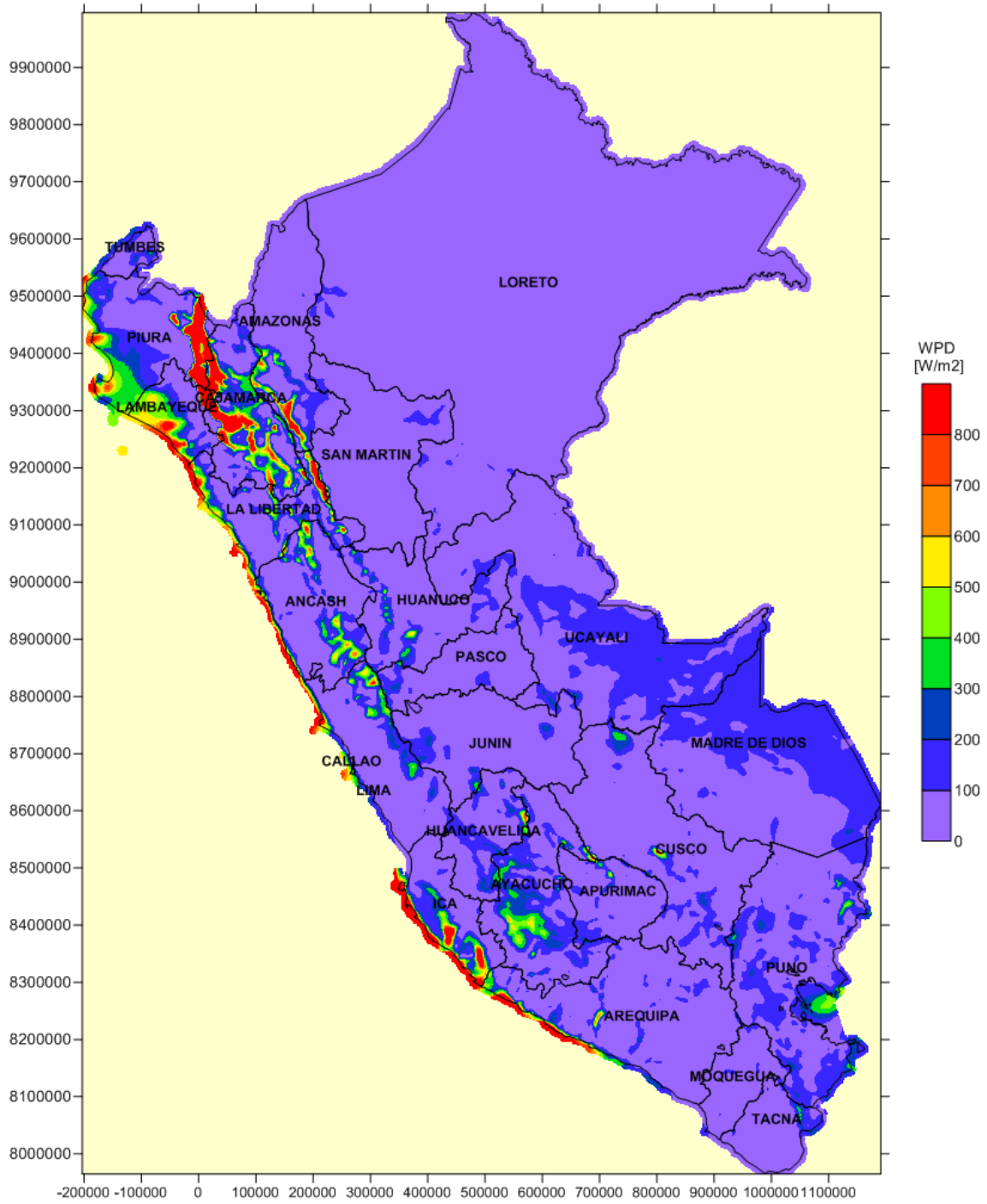
J.19. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN JULIO A 125 m



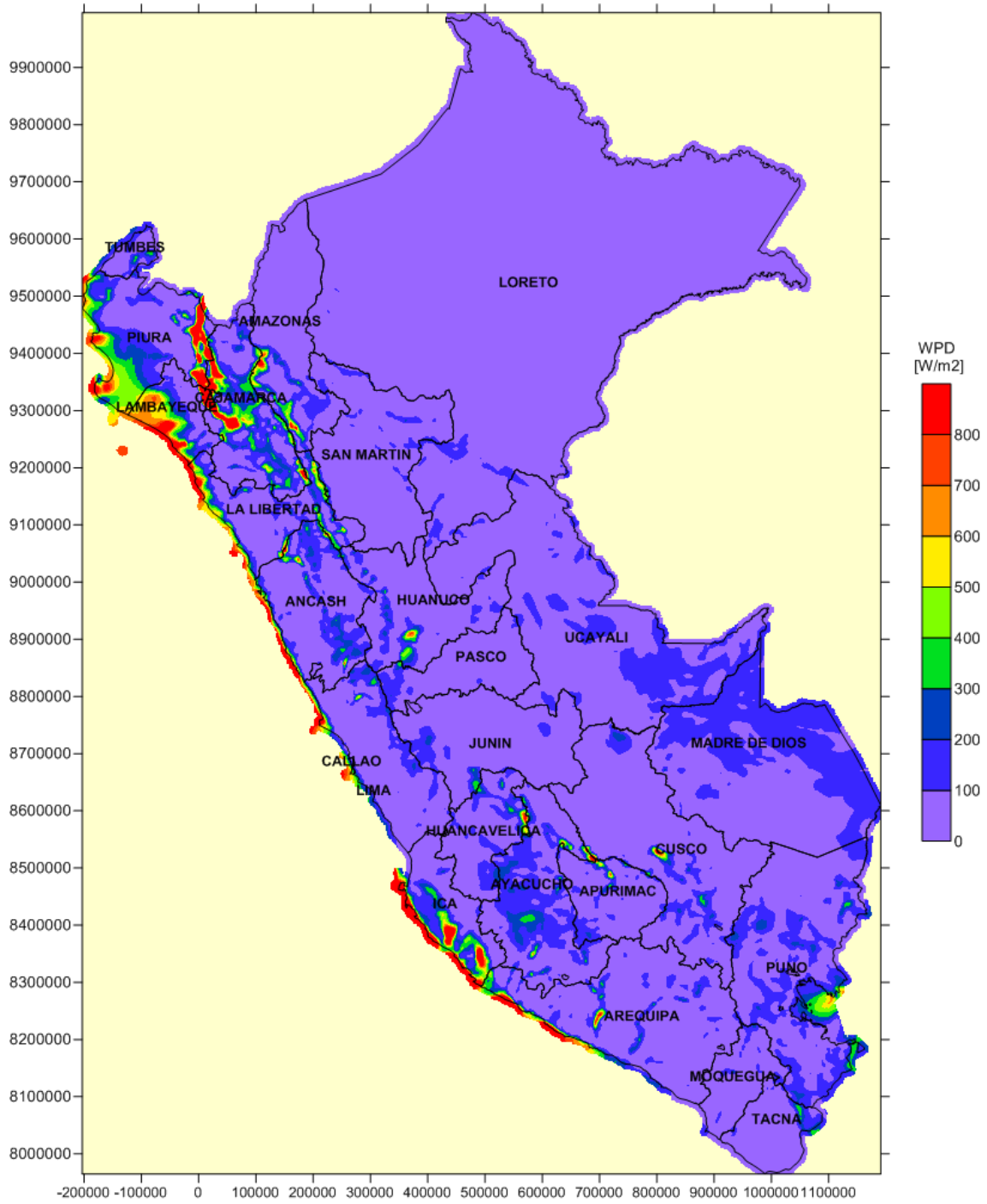
J.20. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN AGOSTO A 125 m



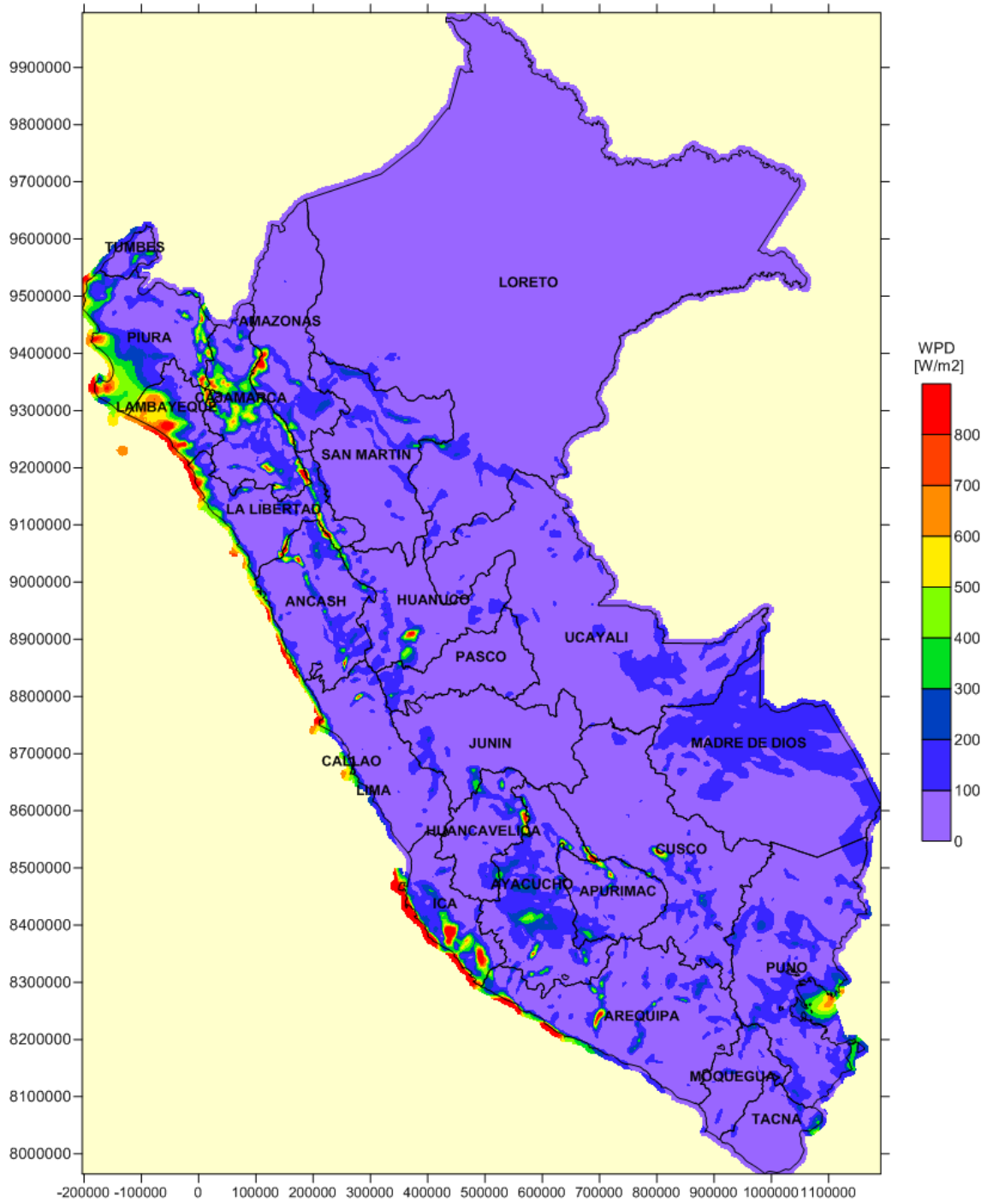
J.21. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN SEPTIEMBRE A 125 m



J.22. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN OCTUBRE A 125 m



J.23. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN NOVIEMBRE A 125 m



J.24. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA DEL VIENTO EN DICIEMBRE A 125 m

