

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS EN  
TOPOGRAFÍA, GEODESIA Y CARTOGRAFÍA  
TITULACIÓN DE INGENIERO TÉCNICO EN TOPOGRAFÍA



PROYECTO FIN DE CARRERA



*“Análisis espaciotemporal de la sismicidad en la Península Ibérica  
y América Central: Aplicaciones a la peligrosidad sísmica”*

Madrid, Febrero 2015

Alumnos:  
Pablo Biénzobas García  
María Dolores Martínez López

Tutores:  
Jorge M. Gaspar Escribano  
Román Hernández Rey

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS EN TOPOGRAFÍA,  
GEODESIA Y CARTOGRAFÍA  
TITULACIÓN DE INGENIERO TÉCNICO EN TOPOGRAFÍA



PROYECTO FIN DE CARRERA



**“Análisis espaciotemporal de la sismicidad en la Península Ibérica  
y América Central: Aplicaciones a la peligrosidad sísmica”**

**Madrid, Febrero 2015**

***Alumnos:***

***Pablo Biénzobas García***

***María Dolores Martínez López***

***Tutores:***

***Jorge M. Gaspar Escribano***

***Román Hernández Rey***

## *Agradecimientos:*

*De Pablo:*

*A mis Padres, por haberme dado la oportunidad de conseguir esto y apoyarme hasta el final. A mi hermana Amaya, por aguantarme. A Marta por su apoyo incondicional, tirar de mí y hacer que pudiese con todo, gracias por estar siempre ahí. A todos mis amigos y compañeros de la universidad por sufrir, reír y aprender juntos durante tantos años, os nombraría uno a uno, pero sois muchos. A mi compañera de proyecto y a mis tutores Jorge Gaspar y Román Hernández.*

*De Lolí:*

*A mis padres y a mi hermano por el apoyo y el ánimo durante todos estos años.*

*A mis compañeros, por todos esos momentos de risas, de alegrías y decepciones, por ayudarme siempre. Esos compañeros que se han convertido en mis amigos.*

*A Yago, que me ha tenido que aguantar tanto, que me ha animado todos los días, por estar siempre a mi lado.*

*A mis amigos de siempre y de no hace tanto. Gracias por darme ánimos para seguir y terminar.*

*A Jorge y Román por habernos ofrecido la oportunidad de hacer un proyecto tan interesante como este.*

## Tabla de contenido.

Índice de Figuras.....	2
Índice de Tablas.....	5
1. RESUMEN.....	5
2. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	8
3. ZONAS DE ESTUDIO.....	12
3.1. Introducción.....	12
3.2. Análisis sismotéctonico.....	13
3.2.1 Península Ibérica.....	13
3.2.2 América Central.....	15
3.2.2.1 Zona de subducción (Fosa Mesoamericana).....	18
3.2.2.2 Arco Volcánico.....	18
3.2.2.3 Límite de placas norteamericana-caribe.....	19
3.2.2.4 Zona de fractura de Panamá.....	19
3.3. Peligrosidad Sísmica.....	20
3.3.1 Península Ibérica.....	21
3.3.2 América Central.....	21
4. MARCO TEÓRICO.....	24
4.1 Fallas y zonas de sismicidad uniforme.....	24
4.2 Modelos de recurrencia.....	25
4.3 Obtención de los valores de $\alpha$ y $\beta$ mediante ajuste a una recta.....	28
5. DATOS.....	31
5.1 Catálogo Península Ibérica.....	31
5.1.1 Obtención de datos.....	31
5.1.2 Homogenización del parámetro tamaño, cálculo de magnitud.....	33
5.1.3 Zonas de completitud. Completitud del catálogo.....	38
5.2 Catálogo de América Central.....	40
5.2.1 Obtención de datos.....	40
5.2.2 Completitud.....	41
5.2.3 Geometría de subducción.....	43
6. MÉTODOS.....	47
6.1 Introducción.....	47
6.2 Ventanas espaciales.....	47
6.3 Periodos de completitud.....	56
6.4 Expel.....	60
7. RESULTADOS.....	66
7.1. Península Ibérica.....	67
7.1.1. Geometría de malla.....	67
7.1.2. Periodos.....	70
7.1.2.1 Beta.....	70
7.1.2.2 Magnitud máxima.....	74

7.1.2.3	Tasa.....	77
7.2.	América Central.....	80
7.2.1.	Geometría de malla.....	80
7.2.2.	Periodo completo malla 0,5° (1522-2011).....	85
7.2.2.1	Beta.....	85
7.2.2.2	Magnitud máxima.....	88
7.2.2.3	Tasa.....	90
7.2.3.	Periodo moderno malla 0,5° (1985-2011). ....	92
7.2.3.1	Beta.....	92
7.2.3.2	Magnitud máxima.....	94
7.2.3.3	Tasa.....	96
7.2.4.	Periodo completo malla 0,2° (1522-2011).....	98
7.2.4.1	Beta.....	98
7.2.4.2	Magnitud máxima.....	101
7.2.4.3	Tasa.....	103
8.	CONCLUSIONES.....	106
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	109
10.	ANEXO.....	113

### **Índice de Figuras.**

Figura 1.-	Marco geográfico de la Península Ibérica y de América Central.....	12
Figura 2.-	Sismotectónica entre Placa Africana y Placa Euroasiática. (IGN – UPM, 2012).....	14
Figura 3.-	Tectónica de América Central.....	16
Figura 4.-	Mecanismos focales de eventos con Mw > 6,0 ocurridos en América Central septentrional durante el periodo 1976 - 2007 (Global CMT, 2008).....	17
Figura 5.-	Mecanismos focales de eventos con Mw > 6,0 ocurridos en América Central meridional durante el periodo 1976 - 2007 (Global CMT, 2008).....	17
Figura 6.-	Mapa de aceleración pico del terreno (PGA) para un periodo de retorno de 475 años (IGN-UPM, 2012). ....	21
Figura 7.-	Mapa de amenaza sísmica en América Central en términos de PGA (gal) para PR = 500 años (Benito y Torres, 2011).....	22
Figura 8.-	QAFI v2.0, versión online: <a href="http://mapas.igme.es/Servicios/default.aspx">http://mapas.igme.es/Servicios/default.aspx</a> . (Mapa de fondo de Google maps). Actualizado Octubre 2012. ....	24
Figura 9.-	Modelo de Gutenberg-Richter.....	27
Figura 10.-	Modelo de Gutenberg-Richter, Zona 259 para Península Ibérica malla de un grado.....	28
Figura 11.-	Todos los seísmos del catálogo del IGN de la Península Ibérica hasta 2013. ....	32
Figura 12.-	Cantidad según tipo de magnitud IGN.....	33
Figura 13.-	Todos los epicentros de contenidos en el catálogo sísmico del IGN hasta junio de 2013 representados con su tamaño.....	35
Figura 14.-	Esquema de las relaciones entre las tablas.....	37
Figura 15.-	Vista de la tabla "catalogs" con PI_todoSOM desplegado.....	37
Figura 16.-	Zonas de completitud para Península Ibérica.....	38
Figura 17.-	Años de referencia considerados para las diferentes zonas de la Península Ibérica y los intervalos de magnitud.....	39

Figura 18.- Localización de los epicentros de los seísmos del catálogo de América Central hasta 2011. ....	41
Figura 19.- Modelo empleado en la división de seísmos en América Central. ....	44
Figura 20.- Red irregular de triángulos (TIN) de América Central con curvas de nivel. ....	45
Figura 21.- Malla espacial de un grado de lado para la Península Ibérica. ....	48
Figura 22.- Centroides y vértices de la malla base para 1° de lado, respectivamente. ...	49
Figura 23.- Todos los centroides para la Península Ibérica. ....	50
Figura 24.- Malla base de América Central de 0,5° de lado. ....	52
Figura 25.- Todos los centroides de la malla de 0,5° de América Central. ....	52
Figura 26.- Esquema de la base de datos de las mallas. ....	54
Figura 27.- Base de datos con la malla de 0.5° grados de la Península Ibérica. ....	55
Figura 28.- Base de datos para América central con la malla de 0.5°. ....	55
Figura 29.- Ventana de inicio de Expel. ....	60
Figura 30.- Ventana de cálculo de parámetro de sismicidad de EXPEL. ....	61
Figura 31.- Ejemplo de fichero con el cálculo realizado mediante Expel de la celda 131 de CAM05X00Y00. ....	62
Figura 32.- Ejemplo fichero resumen de la malla CAM05X00Y00 realizado con Expel. ....	62
Figura 33.- Ejemplo de hoja de cálculo de Excel con el cálculo de tasa. ....	63
Figura 34.- Base de datos Access de centroides para la malla de 0.5° Superficial periodo 1522 a 2011. ....	64
Figura 35.- Comparación geometría de la malla en la Península Ibérica. ....	69
Figura 36.-Península Ibérica, parámetro Beta, periodo 2002-2013 (Arriba) y Península Ibérica, parámetro Beta, periodo 1985-2013 (Abajo). ....	72
Figura 37.-Península Ibérica, parámetro Beta, periodo 1962-2013 (Arriba) y Península Ibérica, parámetro Beta, periodo 1048-2013 (Abajo). ....	73
Figura 38.- Península Ibérica, parámetro magnitud máxima, periodo 2002-2013 (Arriba) y Península Ibérica, parámetro magnitud máxima, periodo 1985-2013 (Abajo). ....	75
Figura 39.-Península Ibérica, parámetro magnitud máxima, periodo 1962-2013 (Arriba) y Península Ibérica, parámetro magnitud máxima, periodo 1048-2013 (Abajo). ....	76
Figura 40.-Península Ibérica, parámetro tasa, periodo 2002-2013 (Arriba) y Península Ibérica, parámetro tasa, periodo 1985-2013 (Abajo). ....	78
Figura 41.-Península Ibérica, parámetro tasa, periodo 1962-2013 (Arriba) y Península Ibérica, parámetro tasa, periodo 1048-2013 (Abajo). ....	79
Figura 42.- Comparación geométrica para América Central de malla 0,5° (arriba) con malla 0,2° (abajo) en la capa superficial. ....	82
Figura 43.-Comparación geométrica para América Central de malla 0,5° (arriba) con malla 0,2° (abajo) en la capa de subducción intermedia. ....	82
Figura 44.-Comparación geométrica para América Central de malla 0,5° (arriba) con malla 0,2° (abajo) en la capa de subducción profunda. ....	83
Figura 45.- América Central periodo completo (1522-2011), parámetro beta, malla de 0,5° capa superficial (arriba), capa subducción intermedia (centro) y capa de subducción profunda (abajo). ....	87
Figura 46.- América Central periodo completo (1522-2011), parámetro magnitud máxima, malla de 0,5° capa superficial (arriba), capa subducción intermedia (centro) y capa de subducción profunda (abajo). ....	89
Figura 47.-América Central periodo completo (1522-2011), parámetro tasa, malla de 0,5° capa superficial (arriba), capa subducción intermedia (centro) y capa de subducción profunda (abajo). ....	91
Figura 48.- América Central periodo completo (1985-2011), parámetro beta, malla de 0,5° capa superficial (arriba), capa subducción intermedia (centro) y capa de subducción profunda (abajo). ....	93
Figura 49.- América Central periodo completo (1985-2011), parámetro magnitud máxima, malla de 0,5° capa superficial (arriba), capa subducción intermedia (centro) y capa de subducción profunda (abajo). ....	95

Figura 50.- América Central periodo completo (1985-2011), parámetro tasa, malla de 0,5° capa superficial (arriba), capa subducción intermedia (centro) y capa de subducción profunda (abajo).	97
Figura 51.- América Central periodo completo (1522-2011), parámetro beta, malla de 0,2° capa superficial (arriba), capa subducción intermedia (centro) y capa de subducción profunda (abajo).	100
Figura 52.- América Central periodo completo (1522-2011), parámetro magnitud máxima, malla de 0,2° capa superficial (arriba), capa subducción intermedia (centro) y capa de subducción profunda (abajo).	102
Figura 53.- América Central periodo completo (1522-2011), parámetro tasa, malla de 0,2° capa superficial (arriba), capa subducción intermedia (centro) y capa de subducción profunda (abajo).	104
Figura 54.- Península Ibérica, parámetro beta, malla 1°, periodo 2002-2013.	114
Figura 55.- Península Ibérica, parámetro magnitud máxima, malla 1°, periodo 2002-2013.	115
Figura 56.- Península Ibérica, parámetro tasa, malla 1° periodo 2002-2013.	116
Figura 57.- Península Ibérica, parámetro beta, malla 0,5° periodo 2002-2013.	117
Figura 58.- Península Ibérica, parámetro beta, malla 0,5° periodo 1985-2013.	118
Figura 59.- Península Ibérica, parámetro beta, malla 0,5° periodo 1962-2013.	119
Figura 60.- Península Ibérica, parámetro beta, malla 0,5° periodo 1048-2013.	120
Figura 61.- Península Ibérica, parámetro magnitud máxima, malla 0,5° periodo 2002-2013.	121
Figura 62.- Península Ibérica, parámetro magnitud máxima, malla 0,5° periodo 1985-2013.	122
Figura 63.- Península Ibérica, parámetro magnitud máxima, malla 0,5° periodo 1962-2013.	123
Figura 64.- Península Ibérica, parámetro magnitud máxima, malla 0,5° periodo 1048-2013.	124
Figura 65.- Península Ibérica, parámetro tasa, malla 0,5° periodo 2002-2013.	125
Figura 66.- Península Ibérica, parámetro tasa, malla 0,5° periodo 1985-2013.	126
Figura 67.- Península Ibérica, parámetro tasa, malla 0,5° periodo 1962-2013.	127
Figura 68.- Península Ibérica, parámetro tasa, malla 0,5° periodo 1048-2013.	128
Figura 69.- Península Ibérica, parámetro beta, malla 0,2° periodo 2002-2013.	129
Figura 70.- Península Ibérica, parámetro magnitud máxima, malla 0,2° periodo 2002-2013.	130
Figura 71.- Península Ibérica, parámetro tasa, malla 0,2° periodo 2002-2013.	131
Figura 72.- América Central, periodo completo (1522-2011), parámetro beta, malla de 0,2° capa superficial.	132
Figura 73.- América Central, periodo completo (1522-2011), parámetro beta, malla de 0,2° capa de subducción intermedia.	133
Figura 74.- América Central, periodo completo (1522-2011), parámetro beta, malla de 0,2° capa de subducción profunda.	134
Figura 75.- América Central, periodo completo (1522-2011), parámetro magnitud máxima, malla de 0,2° capa superficial.	135
Figura 76.- América Central, periodo completo (1522-2011), parámetro magnitud máxima, malla de 0,2° capa de subducción intermedia.	136
Figura 77.- América Central, periodo completo (1522-2011), parámetro magnitud máxima, malla de 0,2° capa de subducción profunda.	137
Figura 78.- América Central, periodo completo (1522-2011), parámetro tasa, malla de 0,2° capa superficial.	138
Figura 79.- América Central, periodo completo (1522-2011), parámetro tasa, malla de 0,2° capa de subducción intermedia.	139
Figura 80.- América Central, periodo completo (1522-2011), parámetro tasa, malla de 0,2° capa de subducción profunda.	140

Figura 81.- América Central, periodo 1985-2011, parámetro beta, malla de 0,5° capa superficial.....	141
Figura 82.- América Central, periodo 1985-2011, parámetro beta, malla de 0,5° capa de subducción intermedia.....	142
Figura 83.- América Central, periodo 1985-2011, parámetro beta, malla de 0,5° capa de subducción profunda.....	143
Figura 84.- América Central, periodo completo 1985-2011, parámetro magnitud máxima, malla de 0,5° capa superficial.....	144
Figura 85.- América Central, periodo completo 1985-2011, parámetro magnitud máxima, malla de 0,5° capa de subducción intermedia.....	145
Figura 86.- América Central, periodo completo 1985-2011, parámetro magnitud máxima, malla de 0,5° capa de subducción profunda.....	146
Figura 87.- América Central, periodo completo 1985-2011, parámetro tasa, malla de 0,5° capa superficial.....	147
Figura 88.- América Central, periodo completo 1985-2011, parámetro tasa, malla de 0,5° capa de subducción intermedia.....	148
Figura 89.- América Central, periodo completo 1985-2011, parámetro tasa malla de 0,5° capa de subducción profunda.....	149
Figura 90.- América Central, periodo completo (1522-2011), parámetro beta, malla de 0,5° capa superficial.....	150
Figura 91.- América Central, periodo completo (1522-2011), parámetro beta, malla de 0,5° capa de subducción intermedia.....	151
Figura 92.- América Central, periodo completo (1522-2011), parámetro beta, malla de 0,5° capa de subducción profunda.....	152
Figura 93.- América Central, periodo completo (1522-2011), parámetro magnitud máxima, malla de 0,5° capa superficial.....	153
Figura 94.- América Central, periodo completo (1522-2011), parámetro magnitud máxima, malla de 0,5° capa de subducción intermedia.....	154
Figura 95.- América Central, periodo completo (1522-2011), parámetro magnitud máxima, malla de 0,5° capa de subducción profunda.....	155
Figura 96.- América Central, periodo completo (1522-2011), parámetro tasa, malla de 0,5° capa superficial.....	156
Figura 97.- América Central, periodo completo (1522-2011), parámetro tasa, malla de 0,5° capa de subducción intermedia.....	157
Figura 98.- América Central, periodo completo (1522-2011), parámetro tasa, malla de 0,5° capa de subducción profunda.....	158

## Índice de Tablas.

<i>Tabla 1.- Correlaciones obtenidas (regresiones RMA).</i> .....	34
<i>Tabla 2.- Años de referencia a partir de los cuales se considera completo el catálogo sísmico de América Central para cada intervalo de magnitud, derivado de un análisis independiente por profundidades. (Benito y Torres, 2011)</i> .....	42
<i>Tabla 3.- Años de referencia para Península Ibérica. Periodo 1048-2013. (IGN-UPM, 2012)</i> .....	56
<i>Tabla 4.- Años de referencia para Península Ibérica. Periodo 2002-2013.</i> .....	57
<i>Tabla 5.- Años de referencia para Península Ibérica. Periodo 1985-2013.</i> .....	58
<i>Tabla 6.- Años de referencia para Península Ibérica. Periodo 1962-2013.</i> .....	58
<i>Tabla 7.- Años de referencia para América Central. Periodo 1522-2013.</i> .....	59
<i>Tabla 8.- Años de referencia para América Central. Periodo 1985-2013.</i> .....	59





# *Resumen.*



## **1. RESUMEN.**

El presente proyecto fin de carrera trata del estudio de los parámetros de sismicidad en la Península Ibérica y América Central, realizando un análisis de su variación en el espacio y en el tiempo. Con estos análisis se podrá determinar la continuidad temporal y la homogeneidad espacial de los parámetros sísmicas de los territorios de estudio, de acuerdo con la información contenida en los catálogos sísmicos.

En este proyecto se parte del estudio de los catálogos sísmicos disponibles (catálogo del Instituto Geográfico Nacional de España y catálogo del proyecto RESIS II) y se realizan los análisis de completitud pertinentes, a fin de eliminar información de los catálogos que pueda desvirtuar los resultados obtenidos.

Se considera que la sismicidad sigue modelo de Gutenberg-Richter, que establece que la distribución de frecuencias de terremotos con la magnitud responde a una relación lineal entre el (logaritmo del) número acumulado de eventos y la magnitud. De este modelo se obtienen tres parámetros que caracterizan la sismicidad de una zona: el parámetro beta, la tasa acumulada de ocurrencia de terremotos y la magnitud máxima.

Se diseña un método para calcular el valor de estos parámetros sísmicos en los territorios considerados, y se implementan diferentes filtros espaciales y temporales para poder determinar la variabilidad espacial y temporal de los valores de los parámetros de sismicidad.

Se aplica el método de estimación de parámetros de sismicidad en dos zonas de diferentes características sísmicas: una como la Península Ibérica, donde hay menos actividad sísmica pero hay datos de un periodo de tiempo mayor; y América Central, donde el catálogo no es tan extenso temporalmente, y sin embargo, hay una mayor actividad sísmica.



Los resultados del estudio serán de utilidad para la caracterización de fuentes sísmicas en estudios de peligrosidad sísmica, bien sea siguiendo modelos zonificados que consideran que la sismicidad es un proceso de Poisson (para lo cual se necesita un catálogo depurado, como el que se usa en este proyecto para América Central), bien sea para modelos no zonificados, que se nutren de un catálogo sin depurar de réplicas y premonitores (como el que se usa en este proyecto para España).



# *Introducción y objetivos.*



## 2. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

Un país ubicado en un área de actividad sísmica de cierta importancia necesita disponer de un estudio completo de peligrosidad sísmica con el cual determinar de forma fehaciente la posibilidad y probabilidad de ocurrencia de movimientos sísmicos con una cierta capacidad de generar daños, tanto personales como materiales, para así poder desarrollar medidas de prevención y mitigación como los planes protección civil ante emergencia sísmica o las normativas de construcción sismorresistente. Para ello se necesita saber dónde ocurren los terremotos, con qué frecuencia y cuál es su tamaño. Para responder a estas cuestiones es preciso calcular, analizar y estudiar los parámetros sísmicos de la zona.

La caracterización de fuentes sísmicas en cálculos de peligrosidad sísmica se realiza a través de modelos de recurrencia que establecen la tasa de ocurrencia de terremotos (o simplemente tasa), la proporción entre los terremotos grandes frente a los pequeños (parámetro beta) y la magnitud máxima esperada en cada fuente.

En cualquier estudio de peligrosidad sísmica existen unas incertidumbres en relación a la definición y caracterización de las fuentes que no se pueden evitar, pues no se conocen todas las fallas existentes en las zonas de estudio, y las conocidas son muy difíciles de caracterizar, de definir su extensión y área de influencia. A su vez, el registro sísmico del que se dispone es incompleto debido a la heterogeneidad geográfica, a la desigual implantación de la red de detección sísmica y a la dificultad que presenta registrar los sismos en determinadas zonas, como por ejemplo las marinas. Existen a su vez carencias en la caracterización temporal de la sismicidad, ya que cuanto más se mira atrás en el tiempo, más difícil resulta detectar seísmos de menor magnitud debido a la ausencia de las estaciones suficientes para cubrir el territorio y a que las estaciones más antiguas son menos precisas que las más actuales, influyendo también en el registro la ubicación de las mismas.



Debido a todo ello, en el método tradicional de cálculo de los parámetros sísmicos, se recurre a zonas sismogénicas de sismicidad uniforme, que se definen como áreas de terreno en las cuales se considera que la probabilidad de ocurrencia de un seísmo de cierta magnitud es la misma en cualquier punto de la zona y en cualquier instante. Para ello, se hace necesario establecer unos límites iniciales para las zonas con un criterio razonable y a su vez comprobar dicha homogeneidad, haciéndose necesario parametrizar dichas zonas para los estudios de peligrosidad.

En el presente proyecto se estiman los parámetros de sismicidad abandonando las suposiciones a priori sobre límites de zonas y prescindiendo del modelo de sismicidad uniforme, marcando como objetivo general determinar la variación espacial y temporal de los parámetros de sismicidad (tasa, beta y magnitud máxima) en dos ambientes tectónicos diferentes. Cada uno de ellos será parametrizado sobre puntos que cubrirán toda la extensión de ambos entornos, haciendo variaciones de tamaño de áreas y de ventanas temporales.

A su vez, se tendrán que ir superando diferentes objetivos de carácter más específico, que han ido marcando el desarrollo del proyecto en diferentes fases las cuales se han ido desglosando en los sucesivos apartados:

3. Zonas de estudio: En este apartado se describe la delimitación geográfica, el marco sismotectónico y la peligrosidad sísmica de cada zona.

4. Marco teórico: Aquí se establecen los fundamentos teóricos y se presenta el modelo de recurrencia de Gutenberg-Richter, del que se obtienen los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  mediante ajuste a una recta.

5. Datos: En este apartado se expone la información existente sobre sismicidad histórica e instrumental para la obtención de los catálogos necesarios para el estudio de ambas zonas y adecuarlos para su uso, como homogenizando la medida del tamaño de todos los registros a la denominada escala de magnitud momento  $M_w$ .



6. Métodos: En este capítulo se describe la metodología seguida en el estudio realizado, así como el diseño e implementación del estudio espacial y temporal con la creación de mallas para el cálculo de los parámetros de sismicidad haciendo una discretización del territorio.

Finalmente, en los epígrafes 7. Resultados y 8. Conclusiones, se investigarán las similitudes y diferencias en los patrones de variación de los parámetros tanto en la Península Ibérica como en América Central, aplicando en ambas áreas los mismos métodos y estableciendo unas conclusiones generales y particulares. El proyecto queda completo con un último apartado 9. Referencias, en el cual se incorpora la Bibliografía consultada.



## *Zonas de estudio.*





### 3. ZONAS DE ESTUDIO.

#### 3.1. Introducción.

El estudio se compone de dos zonas muy diferenciadas, una con menos actividad como es la Península Ibérica, y otra con mayor actividad como es América Central. La zona de la Península Ibérica abarca una extensión de unos 583.000 km<sup>2</sup> y la de América Central unos 546.000 km<sup>2</sup>. Para este estudio, se considera que ambas zonas están delimitadas por rectángulos, cuyos límites son los siguientes meridianos y paralelos:

- Península Ibérica: 13° W, 6° E, 34° N y 45° N.
- América Central: 92° W, 76° W, 20° N y 3° N.

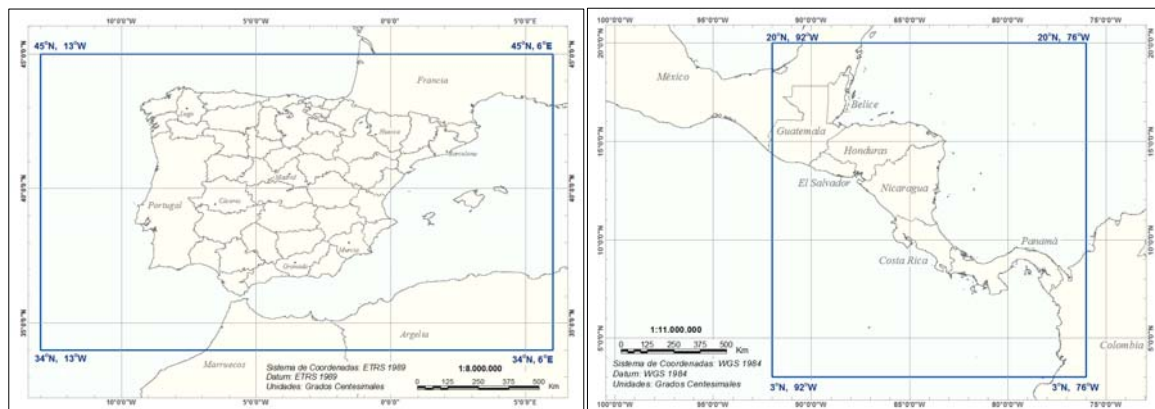


Figura 1.- Marco geográfico de la Península Ibérica y de América Central.

Como puede verse en la Figura 1, los rectángulos considerados incluyen otras zonas cuya sismicidad afecta a las regiones de estudio. Así, para la Península Ibérica, el recuadro abarca también zonas como el sur de Francia, las Islas Baleares, parte del Norte de África y una gran extensión cubierta por el mar. El recuadro de América Central abarca los países de Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Costa Rica y Panamá, así como parte del sur de México, y Belice y parte del oeste de Colombia.

Los resultados se calculan tanto para las zonas terrestres como para las marítimas. Es frecuente que los mapas de peligrosidad omitan los resultados para las



zonas cubiertas por mar porque no es habitual la construcción de estructuras en el mar (offshore). Esta situación está cambiando, y resulta cada vez más necesario disponer de información sísmica en zona marítima, ya que hay un número creciente de construcciones y actividades que se apoyan en el fondo del mar.

Todo estudio de peligrosidad sísmica en un cierto emplazamiento debe comenzar con un detallado análisis de la sismicidad y tectónica del área de influencia alrededor del mismo, a fin de determinar qué fuentes sísmicas pueden suponer peligro potencial. A continuación se analizan estos dos aspectos para ambas zonas del estudio.

### **3.2. Análisis sismotéctónico.**

#### **3.2.1 Península Ibérica.**

La Península Ibérica se encuentra en una zona de convergencia entre las placas tectónicas de África y Eurasia. Esta convergencia, con tasas de movimiento de entre 2 y 9 mm/año y con direcciones predominantes desde NW-SE a WNW-ESE, condiciona la sismotectónica general de la zona (figura 2). La zona de fractura Azores-Gibraltar representa el límite más occidental entre esas dos grandes placas. La sismicidad define en esta zona de contacto, desde el punto triple de Azores hasta la Península Ibérica, cuatro sectores geodinámicos diferentes (De Vicente et al 2004). En el primero, cerca de Azores en la dorsal de Terceira, se localiza una zona de divergencia oceánica o extensional. Desde el extremo sur de la dorsal de Terceira hasta aproximadamente la longitud 10°W, existe una zona transformante intraoceánica (falla transformante de Gloria). Más hacia el este, se tiene una zona de convergencia oceánica, en la que existen estructuras tectónicas activas con orientaciones similares y con esfuerzos de tipo desgarre. Por último, en las proximidades del contacto entre el margen meridional ibérico y el continente africano (Gibraltar-N de Argelia) se localiza una zona de convergencia continental, junto con una zona de extensión E-W en el mar de Alborán (Stich et al 2010). Esta zona de contacto continental presenta por ello una mayor complejidad.



Una parte importante de la convergencia entre Eurasia, Iberia y África se produce en el interior peninsular, dando lugar a una sismicidad que se distribuye de manera difusa, alrededor del contacto y en la que los terremotos ocurren a distancias significativas de las zonas del límite de placas.

De este modo, la sismicidad presenta características muy diferentes a lo largo de toda la región, poniendo de manifiesto la complejidad sismotectónica mencionada. Estas diferencias se manifiestan en la profundidad, en la magnitud, en las tasas de sismicidad y en los mecanismos focales de los correspondientes terremotos. Los grandes terremotos ocurren en las zonas del Golfo de Cádiz- SW de cabo S. Vicente, y NW de Argelia. Terremotos de menor magnitud tienen lugar en las zonas de Pirineos, S y SE de Iberia y N de Marruecos. La gran mayoría tienen focos superficiales ( $h < 50$  km), aunque también se generan un número importante de terremotos a profundidad intermedia (50-200 km) y algunos terremotos muy profundos (600-670 km). La sismicidad intermedia se localiza principalmente en las áreas del Golfo de Cádiz, Banco de Gorringe, Alto Atlas y en la zona Granada-Málaga-W. de Alborán. Los terremotos profundos se sitúan en la provincia de Granada-Mar de Alborán (Molina 1998, 2008).

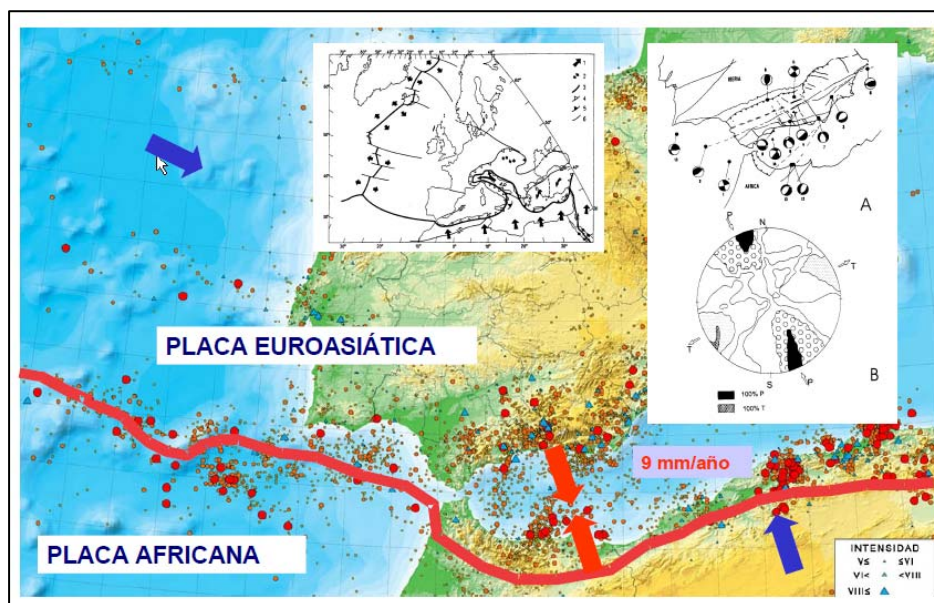


Figura 2.- Sismotectónica entre Placa Africana y Placa Euroasiática. (IGN - UPM, 2012).



Desde el punto de vista de la peligrosidad sísmica de la Península Ibérica y zonas próximas, tiene una gran trascendencia la sismicidad del periodo histórico, en el cual han sucedido los terremotos más destructivos (Martínez Solares 2003). Cabe citar entre otros: Queralbs 1428, Carmona 1504, Málaga 1680, SW de cabo S. Vicente 1755, Torrevieja 1829, Arenas del Rey 1884, etc. Desde el comienzo de la época instrumental, se ha ido mejorando sucesivamente el nivel de detectabilidad y la precisión de la localización de los terremotos debido a los avances en instrumentación y al incremento de cobertura de las redes sísmicas. A pesar de los errores de localización asociados a la época histórica, la sismicidad instrumental se superpone bien con aquella, mostrando en general (salvo alguna excepción) que en los lugares donde ocurrieron los grandes terremotos pasados se continúa liberando energía y que el patrón de sismicidad no ha variado (Martínez Solares 2003). Dentro de la época pre-instrumental e instrumental, cabe mencionar entre otros terremotos de importancia, los terremotos de Benavente (Portugal) 1909, Adra 1910, El Asnam (Argelia) de 1954 y 1980, Atarfe 1956, SW de cabo San Vicente 1969, Triacastela 1997 y Lorca 2011, entre otros muchos.

El catálogo del Instituto Geográfico Nacional (IGN) es la principal fuente para el estudio de la sismicidad de la región y por tanto para la evaluación de la peligrosidad sísmica, por lo que ha sido considerado como el más adecuado para constituir la información de partida.

### **3.2.2 América Central**

América Central está localizada en el extremo oeste de la Placa Caribe. Esta placa está rodeada por las placas de Norteamérica y del Coco al Suroeste, Nazca al Sur y Sudamérica al Este. El contacto Coco-Caribe es de subducción y los movimientos relativos de dichas placas, que varían de 2 a 9 cm/año, están acompañados por vulcanismo activo y alta sismicidad superficial e intermedia. Las Placas de Nazca y Caribe están limitadas por el Cinturón Deformado del Sur de Panamá. Las fallas de



rumbo de Polochic-Motagua-Chamelecón y la Zona de Fractura de Panamá forman, respectivamente, los límites de Placas Norteamérica-Caribe y Coco-Nazca.

Otras estructuras de interés sismotectónico son el Escarpe de Hess, la Depresión de Nicaragua y la Zona de Falla del Sur de Panamá. Recientemente se ha propuesto que la mitad sur de Costa Rica, Panamá y el noroccidente de Colombia forman parte de una microplaca a la cual se ha denominado Microplaca de Panamá. Durante los últimos 500 años se han registrado numerosos sismos destructivos con magnitudes moderadas y grandes ( $5,5 \geq M_W \leq 8,0$ ). Un mapa tectónico de América Central se muestra en la figura 3.

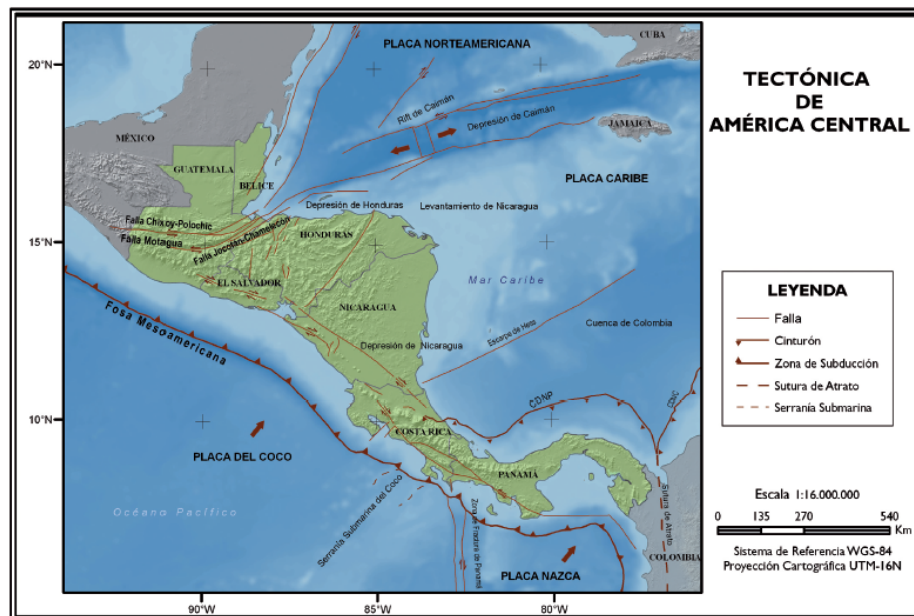


Figura 3.- Tectónica de América Central.

En la figura 4 se muestra un mapa con los mecanismos focales de los eventos con magnitudes mayores a  $M_W > 6,0$  ocurridos en la zona más septentrional de América Central desde 1976 (Global CMT, 2008). En la figura 5 aparecen los mecanismos focales para sismos de la zona meridional de América Central. En ambas figuras se pueden apreciar los mecanismos de generación de sismos en las principales estructuras tectónicas de la región.

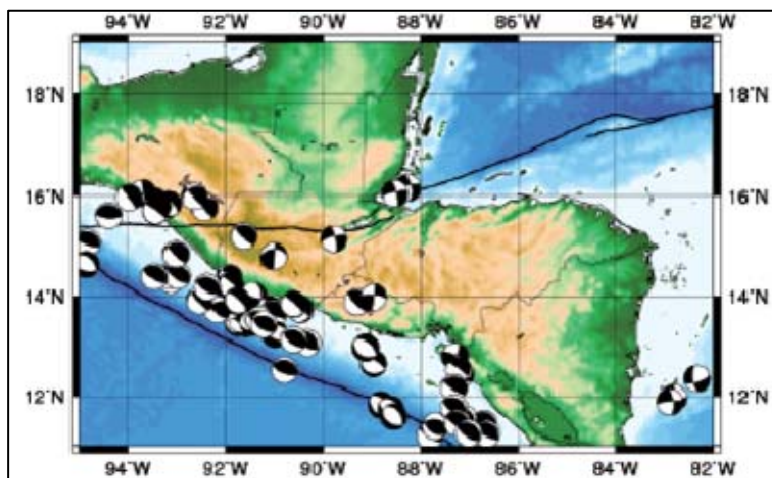


Figura 4.- Mecanismos focales de eventos con  $M_w > 6,0$  ocurridos en América Central septentrional durante el periodo 1976 - 2007 (Global CMT, 2008)

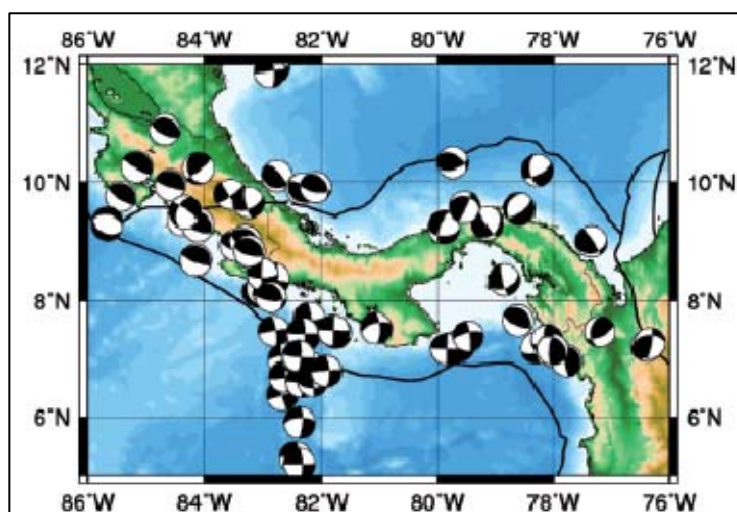


Figura 5.- Mecanismos focales de eventos con  $M_w > 6,0$  ocurridos en América Central meridional durante el periodo 1976 - 2007 (Global CMT, 2008).

Los principales elementos estructurales y sismotectónicos de la región de América Central se describen en los párrafos siguientes.



### **3.2.2.1 Zona de subducción (Fosa Mesoamericana)**

Esta zona de subducción se extiende a lo largo de la costa pacífica de América Central y está sísmicamente bien definida, experimentando ciertas variaciones en su extensión desde Guatemala hasta Panamá.

A partir de la fosa, hasta la proximidad de la costa centroamericana y directamente sobre la placa cabalgante (Placa Caribe), se presenta, desde Guatemala hasta la frontera Costa Rica-Panamá, una importante sismicidad distribuida entre los 5 y 25 km de profundidad, capaz de producir daños, como en el caso del terremoto de 2004 en Damas, Costa Rica, con  $M_w = 6,4$  (Pacheco et al., 2006). La ocurrencia de sismos en la zona de subducción de América Central en tiempos históricos ha sido bien documentada por Peraldo y Montero (1999) y White et al. (2004). Los sismos de subducción más grandes han ocurrido en los segmentos de la trinchera frente a las costas de Guatemala, El Salvador y Nicaragua. El segmento de la trinchera frente a Costa Rica no genera tanta actividad y los sismos no son tan grandes, debido a una subducción a menor ángulo, que presenta un acoplamiento débil, con una corteza continental más frágil. A partir del análisis de la sismicidad histórica se sabe que en la zona de subducción, pueden ocurrir sismos con magnitudes de hasta  $M_w = 8,0$ . Sólo en el periodo abarcado por el siglo XX se originaron 51 sismos grandes en esa zona (Ambraseys y Adams, 1996). Adicionalmente, Pacheco y Sykes (1992) han encontrado que los sismos de subducción superficiales contribuyeron con un 90% al momento sísmico liberado a nivel mundial en el periodo comprendido entre 1900 y 1989.

### **3.2.2.2 Arco Volcánico**

El Arco Volcánico de Centro América se extiende desde Guatemala, a partir del Volcán Tacaná, hasta el Volcán La Yeguada, en el oeste de Panamá, y es interrumpido por la cadena de rocas intrusivas de la Cordillera de Talamanca, ubicada entre los



Volcanes Turrialba, en Costa Rica, y Barú, en Panamá. Desde el año 1900 han ocurrido en esta fuente varios sismos destructivos con magnitudes que oscilan desde  $M_w$  5,7 hasta  $M_w$  6,9, a distancias del eje Arco Volcánico de hasta 10 km (Benito y Torres, 2011).

### **3.2.2.3 Límite de placas norteamericana-caribe**

Este límite, en su parte continental, está formado por tres sistemas de fallas con rumbos aproximadamente de dirección EW, que son: Chixoy-Polochic, Motagua y Jocotán-Chamelecón. La Falla del Motagua se considera la continuación de la Falla de Swan en el Caribe (Mann et al., 1990; Plafker, 1976), configura la cuenca del río Motagua y su traza se pierde en el occidente de Guatemala.

### **3.2.2.4 Zona de fractura de Panamá**

La Zona de Fractura de Panamá es un sistema de fallas transcurrentes oceánicas muy activo, de rumbo N-S y corrimiento lateral derecho, que hace de límite entre las Placas del Coco, al Oeste, y Nazca, al Este. Se extiende entre los  $82^\circ$  W y los  $83^\circ$  W de longitud, y desde una latitud  $0^\circ$  N hasta la Fosa o Trinchera de Panamá, donde subduce con un ángulo menor a  $20^\circ$  y de manera oblicua en dirección NE (Moore et al., 1985; Heil y Silver, 1987; Silver et al., 1990). La sismicidad en esta zona es muy superficial y sus mecanismos focales son del tipo lateral derecho (Pennington, 1981; Wolters, 1986; Adamek et al., 1988; Camacho, 1991).





### **3.3. Peligrosidad Sísmica**

La peligrosidad sísmica se define como la probabilidad de excedencia de un cierto valor de la intensidad del movimiento del suelo producido en un determinado emplazamiento y durante un periodo de tiempo dado por los terremotos del área de influencia de dicho emplazamiento.

Los parámetros de movimiento más usados son la aceleración, y en menor medida, el desplazamiento, la velocidad. Se utilizan diferentes valores: los valores máximos o pico de estos parámetros, denominados habitualmente PGD, PGV y PGA (del inglés, Peak Ground Acceleration), y los valores espectrales, que incorporan el efecto de la respuesta estructural modelizada a través de osciladores de un grado de libertad. En ocasiones, especialmente donde se carece de datos de movimiento fuerte, se usa la Intensidad macrosísmica, relacionada con la destructividad del terremoto, como parámetro de movimiento.

Los resultados de toda evaluación de peligrosidad dependen del parámetro que representa el movimiento, de la extensión del estudio y de la aplicación a la que vaya dirigida. Para fines de diseño antisísmico, la peligrosidad debe ser expresada en términos de parámetros que definan las cargas sísmicas. El más comúnmente usado para ello es la aceleración pico, PGA, y las aceleraciones espectrales de periodo T, SA(T).

A continuación se muestran los mapas de aceleración pico del terreno tanto para la Península Ibérica como América Central, para unos periodos de retorno de 475-500 años.



### 3.3.1 Península Ibérica

Para la Península Ibérica el mapa de periodo de retorno de 475 años muestra valores máximos en la zona SE de España (cuenca de Granada y Bajo Segura, donde se llega a 0,24 g) y a lo largo de la frontera hispano-francesa. Los mínimos valores, por debajo de 0,04 g, se obtienen en puntos de la Meseta Central, así como en puntos de la cuenca del Ebro y de las Islas Baleares. La mayor parte de Andalucía, Murcia, el sur de Comunidad Valenciana, al norte de las provincias de Navarra, Huesca, Lérida, Gerona y Barcelona superan el valor esperado de PGA de 0,08g (Figura 6) (IGN-UPM, 2012).

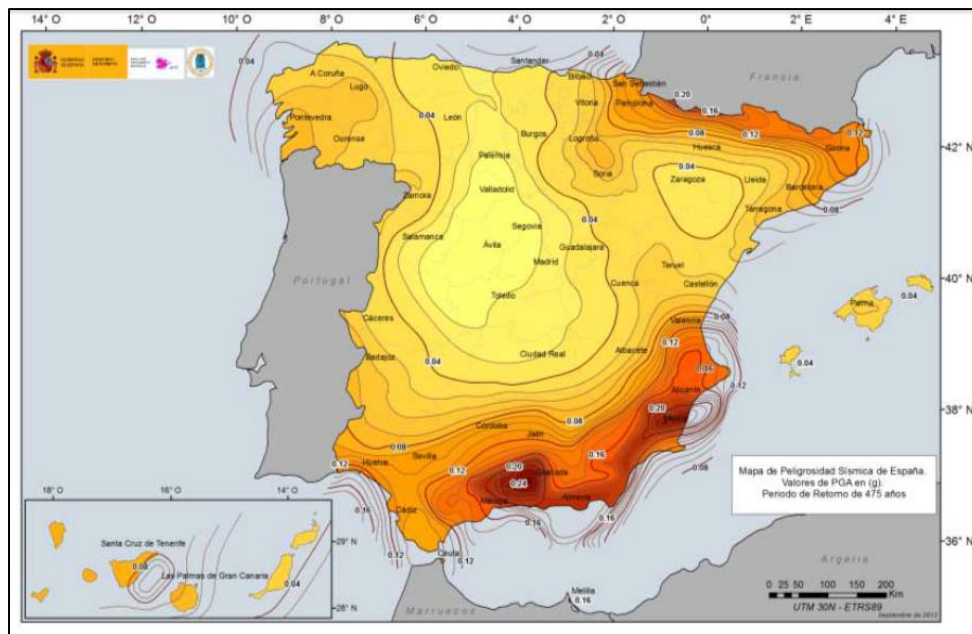


Figura 6.- Mapa de aceleración pico del terreno (PGA) para un periodo de retorno de 475 años (IGN-UPM, 2012).

### 3.3.2 América Central

En América Central para un periodo de retorno de 500 años se alcanzan valores máximos de PGA en torno a 600 gal ( $1 \text{ gal} = 1 \text{ cm/s}^2$ ) para la Zona de Fractura de Panamá y alrededor de 500 gal para las otras zonas de máxima amenaza de la cadena volcánica ubicadas en Guatemala, El Salvador y Nicaragua. Fuera de estas zonas paralelas a la costa, la PGA decae hacia el interior, llegando a valores menores de 300 gal. Una excepción se presenta al sur de Guatemala, donde las isótopas dejan de ser



paralelas a la costa y la PGA decae más lentamente que en otros países, acusando la influencia de la Falla del Motagua. Honduras y el norte de Nicaragua presentan la menor amenaza sísmica de la región centroamericana (Figura 7) (Benito y Torres, 2011).



Figura 7.- Mapa de amenaza sísmica en América Central en términos de PGA (gal) para PR = 500 años (Benito y Torres, 2011).



# *Marco teórico.*



## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1 Fallas y zonas de sismicidad uniforme.

La peligrosidad sísmica consiste en evaluar el nivel esperado de movimiento del suelo que pueden producir terremotos futuros en un emplazamiento dado. Por ello, uno de los aspectos clave en la evaluación de peligrosidad es la definición y caracterización de las fuentes sísmicas generadoras de terremotos que puedan afectar a un emplazamiento.

Los terremotos se producen en fallas, o estructuras tectónicas que separan dos partes de la corteza terrestre que se mueven entre sí, una representación de estas puede verse en la figura 8. La caracterización de las fallas como fuentes sísmicas de cara a un estudio de peligrosidad sísmica se basa en datos geológicos, geodésicos, sismológicos y paleosismológicos, que proporcionan información sobre posible segmentación, tasas de recurrencia, tasas de deslizamiento, magnitudes máximas producidas, profundidades, mecanismos, etc. Estos datos se usan para constreñir el modelo de recurrencia de las fallas, o distribución de frecuencia de terremotos en función de la magnitud.



Figura 8.- QAFI v2.0, versión online: <http://mapas.igme.es/Servicios/default.aspx>. (Mapa de fondo de Google maps). Actualizado Octubre 2012.



En regiones de actividad sísmica moderada o baja la caracterización sísmica de fallas para ser consideradas como unidades independientes en el cálculo de peligrosidad generalmente no es posible, y debe acudirse a la definición de zonas sismogénicas para representar las fuentes sísmicas.

Las zonas sismogénicas son áreas dentro de las cuales se asume que existe un potencial sísmico uniforme, tanto espacial como temporalmente. Esto quiere decir que la probabilidad de ocurrencia de un evento de cierta magnitud es la misma en cualquier punto de la zona y en cualquier instante. La utilización de un modelo independiente del tiempo y uniforme en el espacio trata de representar el conocimiento actual sobre la sismicidad futura y sus características en esa área.

La delimitación de estas zonas se basa en el análisis del entorno sismotectónico, en la sismicidad y sobre todo en las consideraciones sobre su estacionariedad temporal y espacial. Cada zona es caracterizada por una distribución de frecuencia de ocurrencia de sismos en función de la magnitud, representando la ley de recurrencia en la misma. A tal fin es habitual la adopción de una ley de Gutenberg y Richter, que es derivada explotando el catálogo de proyecto y realizando un ajuste lineal de la sismicidad para cada zona.

## **4.2 Modelos de recurrencia**

Los modelos de sismicidad pueden ser zonificados y no zonificados, según si el área de estudio se descompone en zonas sismogénicas (zonas con sismicidad uniforme) o no. Éstas zonas sismogénicas pueden ser: fuentes físicas reconocibles (como son las fallas tectónicas), o grandes zonas de potencial sísmico equiprobable en el espacio y en el tiempo en las que la sismicidad es uniforme en toda la zona considerada.



Cuando se adopta un método zonificado, la sismicidad de la zona se debe caracterizar por una ley de recurrencia particular para la zona, la cual relacionará el tamaño de los sismos que se encuentran en ella con su frecuencia. En el estudio probabilista de peligrosidad, se asume que la ley de recurrencia que se obtiene a partir de la sismicidad pasada es extrapolable para la predicción de la sismicidad en el futuro.

Algunos ejemplos de modelos de recurrencia son el de terremoto característico o los de slip-predictable y time-predictable, que asumen un patrón de acumulación constante de esfuerzos y liberación súbita mediante terremotos del mismo tamaño (caso del terremoto característico), mediante terremotos de tamaño conocido, en función del tiempo transcurrido desde el último evento (slip-predictable) y de tiempo conocido a partir del tamaño del sismo anterior (time-predictable).

Pero quizá el modelo de recurrencia más utilizado, que también se utilizará en este estudio, es el propuesto por Gutenberg-Richter (Gutenberg y Richter 1944). Éste modelo establece una proporción constante entre el número de sismos grandes frente a pequeños para una determinada zona, asumiendo que el logaritmo del número acumulativo de sismos que superan cada grado de magnitud varía linealmente con este parámetro (figura 9). Se define de la siguiente manera:

$$\log N = a - b \cdot M$$

donde  $M$  es la magnitud,  $N(M)$  es el número de sismos que tienen una magnitud igual o mayor que  $M$ , y  $a$  y  $b$  son constantes positivas. El parámetro  $b$  representa la proporción entre sismos grandes y pequeños en la zona, mientras que  $a$  es el logaritmo del número de terremotos con magnitud mayor o igual que cero. Lo más corriente es expresar esta fórmula en términos de logaritmo neperiano, por lo tanto queda de la siguiente manera:

$$\ln N(M) = \alpha - \beta \cdot M$$

de donde  $N(M) = \exp(\alpha - \beta \cdot M)$ , y siendo  $\beta = b \cdot \ln 10$  y  $\alpha = a \cdot \ln 10$ .

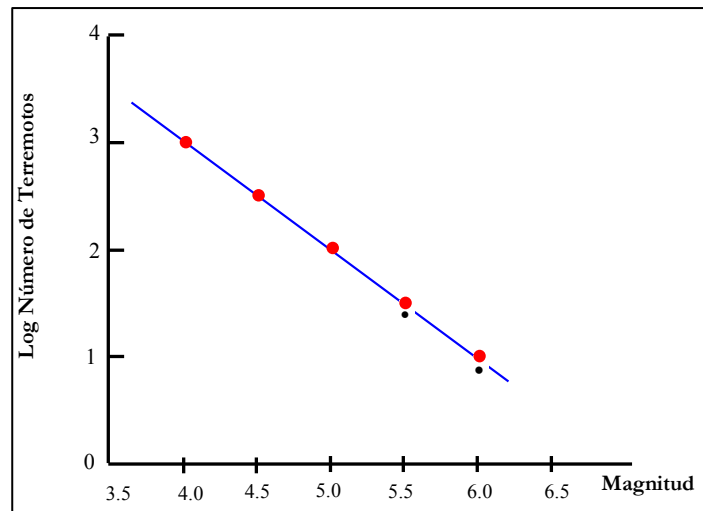


Figura 9.- Modelo de Gutenberg-Richter.

Para obtener la tasa anual de ocurrencia de terremotos  $\tau(M)$  que superan una magnitud dada (que en el presente estudio se fijara en 4.0), se tiene que dividir el número de terremotos  $N$  por el número de años  $TC$  (periodo de tiempo que cubre el catálogo empleado para el ajuste, en este trabajo dependerá del periodo de completitud de la zona en cuestión). Partiendo de la ecuación anterior, queda:

$$\tau(M) = \frac{N(M)}{TC} = \frac{e^{\alpha-\beta \cdot M}}{TC}$$

Esta ecuación precisamente será empleada más adelante para el cálculo de tasa en las diferentes zonas de estudio.

En resumen, los parámetros característicos de la sismicidad de una zona que se necesitan en la estimación de la peligrosidad sísmica son:

- **Beta**: parámetro que representa la cantidad de terremotos de magnitud grande frente a terremotos de magnitud pequeña en un área dada.





- Tasa: Parámetro de sismicidad que representa la cantidad acumulada de terremotos que se producen en un área determinada por unidad de tiempo a partir de una magnitud dada. Cuanto mayor sea este valor, mayor es la probabilidad de que ocurra un seísmo de tamaño superior al del umbral fijado,  $M_{\min}$ .
- Magnitud máxima: la magnitud máxima es el límite superior de la distribución de las magnitudes.

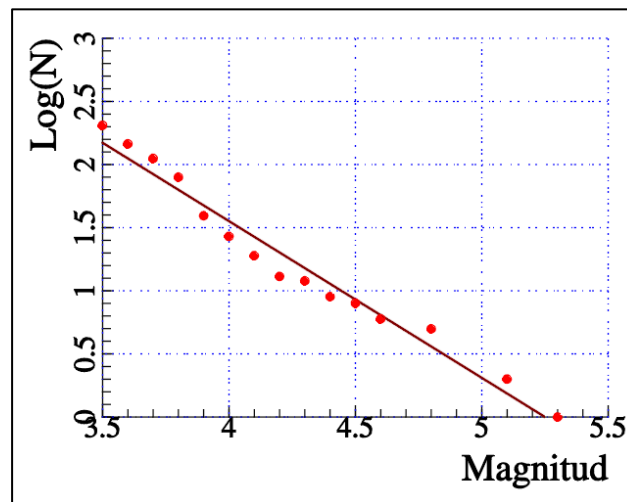


Figura 10.- Modelo de Gutenberg-Richter, Zona 259 para Península Ibérica malla de un grado.

#### 4.3 Obtención de los valores de $\alpha$ y $\beta$ mediante ajuste a una recta

El valor de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  para cada zona sismogénica se ha calculado mediante un ajuste lineal por mínimos cuadrados. Este método trata de minimizar la suma cuadrática de los residuos que se obtienen en el ajuste a la recta del número acumulativo de sismos que superan los diferentes grados de magnitud. Mediante este ajuste se obtendrán los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ , necesarios para el cálculo de la tasa. Es uno de los métodos más empleados y una de las ventajas más destacables es su sencillez y la facilidad de aplicación. Sin embargo, éste método también tiene alguna desventaja cuando se aplica con la ley de Gutenberg-Richter, como es la dependencia que existe



entre los puntos que se están ajustando, debido a que las tasas de magnitudes bajas incluyen los eventos observados de magnitudes más altas.

Como alternativa, existen otros métodos para obtener los valores de  $\alpha$  y  $\beta$ . Uno de los más utilizados es el de máxima verosimilitud (Aki 1965, Bender 1983). Es un método con mayor solidez que el de mínimos cuadrados y se acerca más al valor real de  $\beta$  cuando el número de sismos grandes es variable (Sha y Bolt, 1982). Éste método aumenta la probabilidad de ocurrencia conjunta de una serie de variables aleatorias independientes, evitando caer en el error de ponderar de la misma forma los distintos valores de las cantidades de sismos.

En este proyecto los cálculos se hicieron empleando el método de mínimos cuadrados sin incertidumbre por su sencillez y menor tiempo de cálculo.



# *Datos.*



## **5. DATOS.**

A continuación se explican los pasos para obtención de los diferentes datos necesarios para el estudio: los catálogos sísmicos y las zonas y periodos de completitud para cada uno de los territorios.

Un catálogo sísmico es un listado ordenado de terremotos con unos datos comunes, tales como: fecha, localización, tamaño, etc. Tras realizar una serie de tareas sobre el catálogo se acaba formando con todos los registros del mismo una tabla de una base de datos. Las tareas a realizar son:

- Análisis de los datos descargados.
- Proceso de homogenización: consiste en la conversión de los diferentes parámetros de tamaño del catálogo (intensidad, magnitudes mD, mb, mbLg) a un misma escala, en este proyecto, a la escala de magnitud momento Mw.
- Filtrado del catálogo. Aplicación de filtros, distribución espacial y temporal.
- Creación de subcatálogos para determinadas zonas y ventanas temporales.
- Zonas de completitud.

### **5.1 Catálogo Península Ibérica**

#### **5.1.1 Obtención de datos**

Para la obtención de los terremotos que formarán el catálogo sísmico se acude a la página web del IGN para su descarga, siendo un total de 69.293 registros, desde el año 994 d.C. hasta el día 6 de junio de 2013 (la hora del último registro es de las 03:57:02) ocurridos entre las longitudes 13° Oeste hasta 6° Este, y las latitudes 34° Norte hasta 45° Norte. (Figura 11).

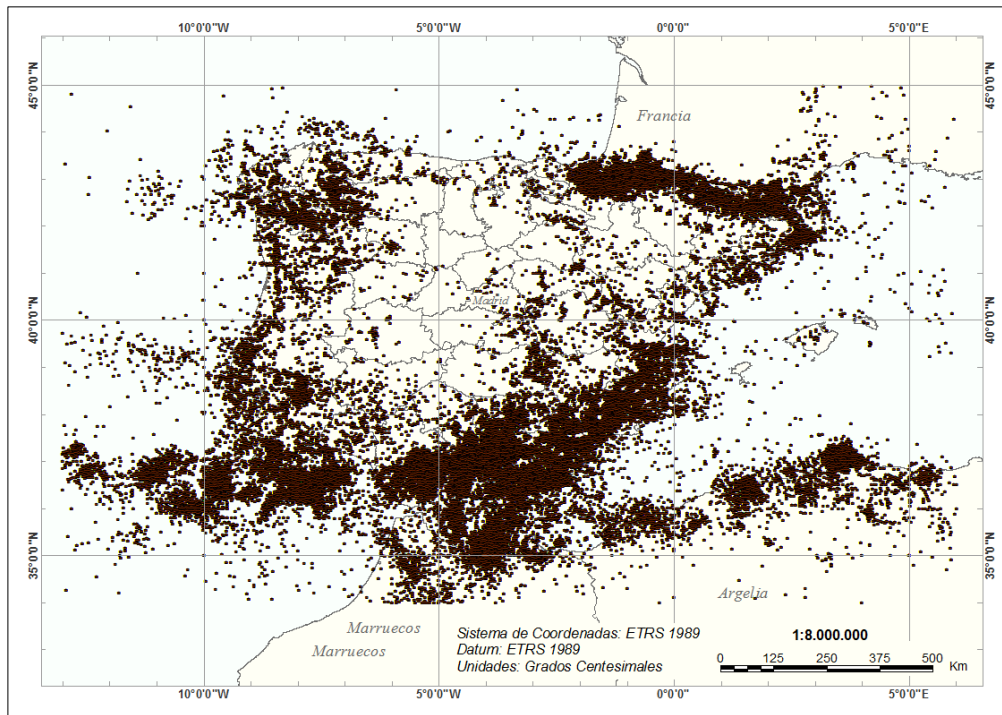


Figura 11.- Todos los seísmos del catálogo del IGN de la Península Ibérica hasta 2013.

Un primer filtrado de este extenso catálogo consiste en hacer un análisis general de posibles errores en los datos descargados, tales como fechas, magnitudes, intensidades... Tras este análisis se tuvieron que eliminar registros antiguos que no poseían datos ni de magnitud ni de intensidad, así como datos de carácter extraño de los años 2011, 2012 y 2013, los cuales tenían intensidades negativas (se contabilizaron 7 de este tipo), o el tipo de magnitud observada es 0 (había 1 registro). En total se suprimieron 1.851 registros por estos motivos.

Además, se eliminan aquellos terremotos en los que la profundidad hipocentral es mayor que 35 km, para limitar el estudio de la Península Ibérica a fuentes situadas en la corteza terrestre. Esto supone eliminar del catálogo la sismicidad intermedia (profundidad focal entre 35 y 200 km) y la sismicidad profunda (hasta 600-670 km). Se descartan así del orden de 1,02% del total de terremotos del catálogo (690 registros en total), de los cuales solo 6 corresponden a terremotos profundos.



Dentro de la selección realizada, el primer terremoto finalmente tenido en cuenta corresponde al terremoto de Orihuela del año 1048, por ser éste el primero en tener una localización epicentral y una intensidad macrosísmica asignadas. Tras esta primera selección, la serie temporal (hasta el 6 de junio de 2013) contiene 66.752 terremotos. Más adelante se explicarán los subcatálogos realizados en base a éste catálogo debido a las ventanas temporales que usamos en el análisis. El proceso posterior del catálogo para su homogenización ha sido realizado partiendo de este conjunto de datos.

### 5.1.2 Homogenización del parámetro tamaño, cálculo de magnitud.

El catálogo de IGN contiene varias definiciones del parámetro de tamaño: intensidad macrosísmica, magnitud basada en la duración del evento, magnitud de ondas mbLg (según varias definiciones) y magnitud de ondas internas, según el enfoque de Veighth y Clawson. En la figura 12 se muestra la cantidad de registros que hay en el catálogo según su tipo de magnitud del IGN.

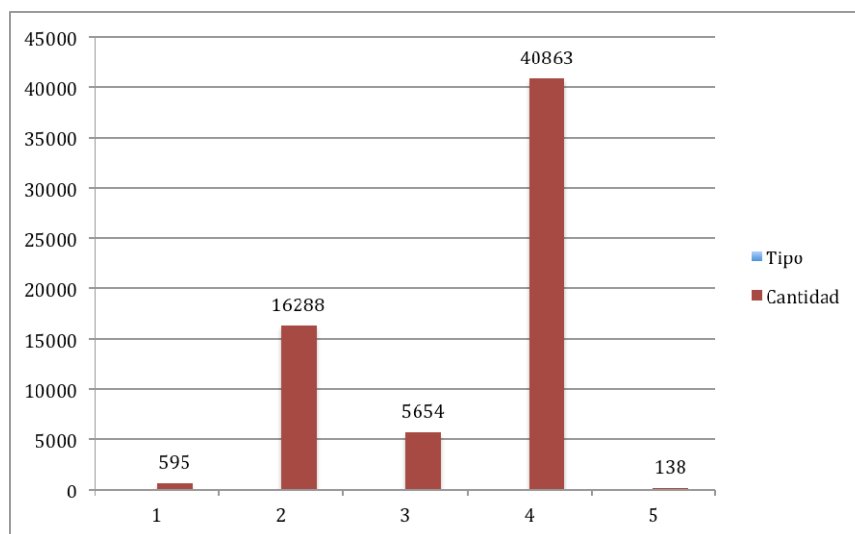


Figura 12.- Cantidad según tipo de magnitud IGN.

Para tener una medida homogénea del tamaño de los terremotos se decide utilizar la magnitud momento  $M_w$ , como parámetro único de tamaño en el catálogo. La ventaja de esta escala de magnitud es que no está saturada para grandes terremotos y además tiene relación directa con la física de la fuente, al derivar del momento sísmico escalar  $M_0$ .



En este estudio se adoptan las ecuaciones de transformación de las distintas escalas de tamaño a magnitud momento desarrolladas en el proyecto del nuevo mapa de peligrosidad de España (IGN-UPM, 2013). Los análisis de regresión realizados han consistido, para cada uno de los subconjuntos de datos,  $I_0$ ;  $m_{bLg}(MMS)$ ;  $m_b(VC)$  y  $m_{bLg}(L)$ , en un ajuste a una recta mediante el método de regresión RMA- ‘eje mayor reducido’. Este método busca ajustar la recta que minimiza la suma de los productos de los residuos vertical y horizontal de cada punto a la línea, es decir, se minimiza la suma de las áreas, de los triángulos rectos formados en cada punto con la recta.

Las ecuaciones de correlación obtenidas en estos ajustes y los errores asociados a sus parámetros se resumen en la siguiente Tabla 1:

**Tabla 1.- Correlaciones obtenidas (regresiones RMA).**

$y = a + bx$	$\sigma_a$	$\sigma_b$	$\sigma_{ab}$	Rango de aplicación
$M_w = 1,656 + 0,545 I_{max}$	0,144	0,030	-0,0001	III – (IX-X)
$M_w = 0,290 + 0,973 m_{bLg}(MMS)$	0,208	0,049	-0,0005	3,1 - 7,3
$M_w = -1,528 + 1,213 m_b(VC)$	0,385	0,077	-0,0001	3,7 - 6,3
$M_w = 0,676 + 0,836 m_{bLg}(L)$	0,202	0,052	-0,0001	3,0 - 5,1

Siguiendo las tablas anteriores se aplicarán las fórmulas de la Tabla 1. En el caso de coexistir los dos parámetros de tamaño (intensidad y magnitud), se ha considerado solamente uno para el cálculo de  $M_w$ . Se decidió utilizar la magnitud frente a la intensidad.

Tras asignarse todas las incertidumbres a los terremotos ya tenemos el catálogo final completo que será usado como base para los subcatálogos de la Península Ibérica (los cuales se verán a continuación), formado por un total de 64.916 registros. (Figura 13).

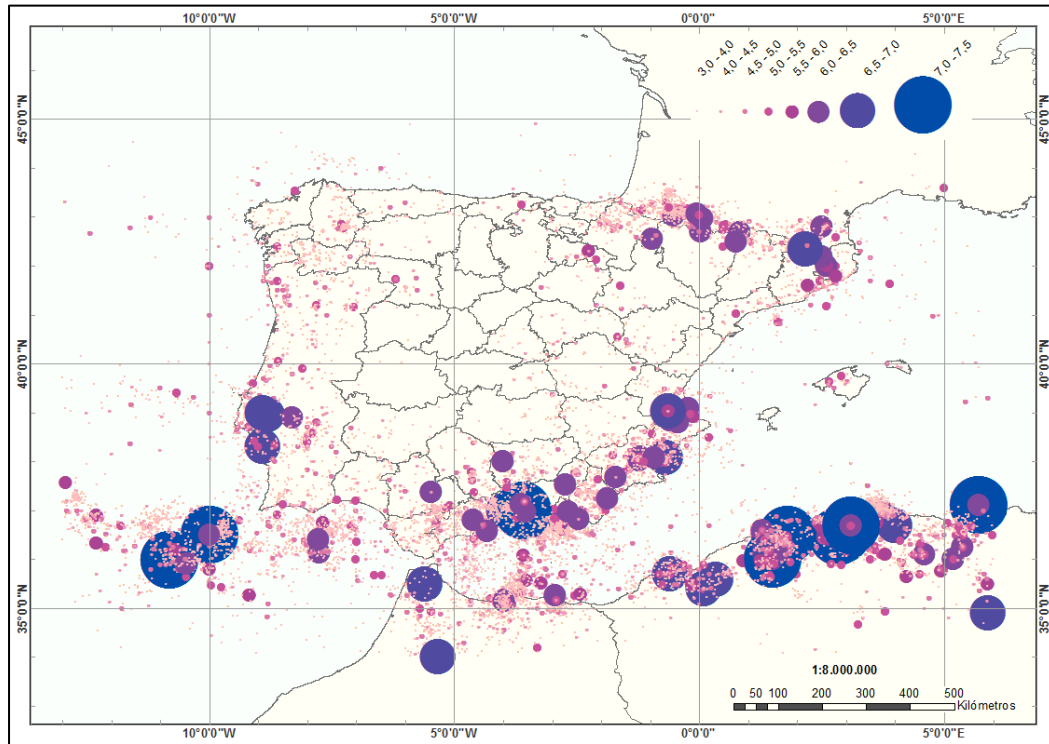


Figura 13.- Todos los epicentros de contenidos en el catálogo sísmico del IGN hasta junio de 2013 representados con su tamaño.

En el estudio de parámetros de sismicidad realizado en este proyecto se usarán varias ventanas temporales, por lo que es necesario hacer un subcatálogo por cada una de dichas ventanas, partiendo del catálogo base creado anteriormente. Finalmente se tendrán los siguientes catálogos:

- PI con todo: catálogo con todos los registros. Es el catálogo descargado del IGN en el que solo se suprimieron los registros que contenían errores, no tiene el filtro por profundidad, no se usará para calcular los parámetros de sismicidad, tiene un total de: 69.293 registros.
- PI 2002: catálogo desde Marzo de 2002 en adelante. Se escogió esta fecha como corte por ser la fecha a partir de la cual se empezó a utilizar la fórmula  $m_{bLg}(L)$  (López, 2008). Este catálogo está compuesto por un total de 44.579 registros.





- PI 1985: catálogo desde Enero de 1985 en adelante. Se escogió esta fecha como representativa de tres hechos importantes: el primer trabajo de homogeneización del catálogo Ibero-Mogrebí (Mezcua y Martínez Solares, 1983), el inicio de la red del Instituto Andaluz de Geofísica (1983) y del Servicio Cartográfico de Cataluña (1985) y primer registro de la red acelerométrica (1984). Está compuesto por 58.174 seísmos.
- PI 1962: catálogo desde Enero de 1962 en adelante. Se escogió esta fecha de corte por ser la fecha en la que se empezó a utilizar la fórmula de  $m_{bLg}(MMS)$ , magnitud a partir de la amplitud de la fase Lg (Mezcua y Martínez Solares, 1983). Este subcatálogo está compuesto por 61.271 seísmos en total.
- PI todoSOM: es el catálogo completo denominado anteriormente como catálogo base, ya que de él parten los tres anteriores, es el obtenido después de todos los análisis de datos y filtros de profundidad. Tiene un total de 64.916 seísmos.

Por último, para poder trabajar con todos estos catálogos y calcular los parámetros sísmicos correspondientes a cada ventana temporal con la aplicación Expel es necesario unificarlos en una base de datos Access. Esta base de datos posee una forma muy característica. Está formada por dos tablas:

- Tabla “catalog”, formada por las columnas: Id, Name y Description;
- Y la tabla “catalogo”, con los campos siguientes: Id, Id\_Catalog, Year, Month, Day, HORA, LONG, LAT, Depth, Place, Size y Desviation.

Se relacionan por Id de catalog e Id\_Catalog, en una relación de uno a muchos (figura 14). En “catalog” se almacena el catálogo propiamente dicho, con un identificador único y un nombre. En cambio, en la tabla “catálogo” se almacenan todos los registros de los sismos de cada uno de los catálogos de la tabla “catalog” relacionados por el identificador correspondiente (figura 15).



# “Análisis espaciotemporal de la sismicidad en la Península Ibérica y América Central: Aplicaciones de la peligrosidad sísmica.”



## Métodos.

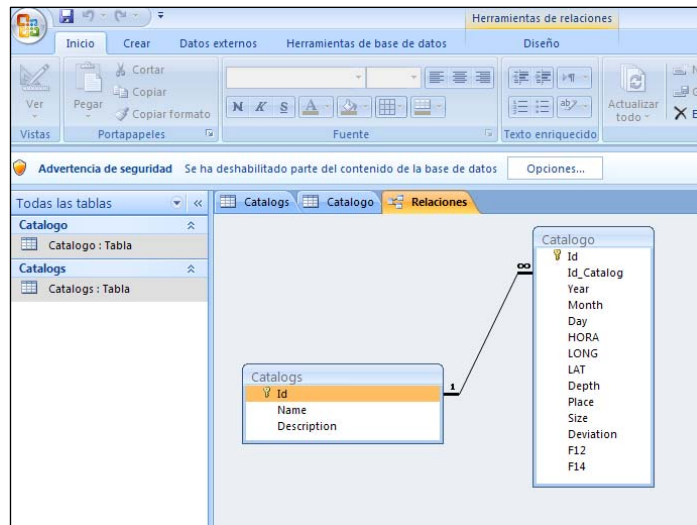


Figura 14.- Esquema de las relaciones entre las tablas.

Id	Year	Month	Day	HORA	LONG	LAT	Depth	Place	Size	Deviation	F12	F14
1381724	1048	1	1	0:00:00	-0,9187	38,0833	0	Orhuela,A	6,058	0,5		
1381730	1189	1	1	0:00:00	-6	38	0	Andujar,J	6,2885	0,5		
1381731	1258	3	1	0:00:00	-0,8	38,8333	0	Ontinyent,V	6,058	0,5		
1381734	1321	12	25	0:00:00	2,9	42,7	0	Perpignan,FRA	4,381	0,5		
1381737	1344	1	1	0:00:00	-8,8	38,9	0	Benavente,POR	5,7435	0,5		
1381741	1356	8	24	0:00:00	-10	36,3	0	SW, Cabo San Vicente	6,058	0,5		
1381742	1375	3	2	0:00:00	0,75	42,5	0	Ribagorça,I	6,2885	0,5		
1381750	1383	4	27	0:00:00	2,9167	42,7	0	Perpignan,FRA	4,381	0,5		
1381751	1395	8	20	13:00:00	-8,5	40,1667	0	Coimbra,POR	4,381	0,5		
1381752	1396	12	18	12:00:00	-0,2167	39,8333	0	Tavernes de la Valldigna,	6,2885	0,5		
1381754	1406	5	2	0:00:00	2,8	42	0	Girona	5,471	0,5		
1381755	1406	1	1	0:00:00	-1,8667	37,25	0	Vera,AL	5,7435	0,5		
1381760	1427	3	13	0:00:00	2,6	42	0	Amer,GI	5,7435	0,5		
1381761	1427	3	14	0:00:00	2,6	42	0	Amer,GI	5,7435	0,5		
1381762	1427	3	15	12:00:00	2,6	42	0	Amer,GI	5,471	0,5		
1381763	1427	3	19	21:00:00	2,6	42	0	Amer,GI	6,058	0,5		
1381767	1427	4	22	0:00:00	2,6	42	0	Amer,GI	5,7435	0,5		
1381768	1427	5	15	0:00:00	2,5	42,2	0	Clot,GI	6,2885	0,5		
1381771	1427	6	17	0:00:00	2,8	41,8	0	Caldes de Malavella,GI	5,7435	0,5		
1381773	1428	2	2	8:00:00	2,1667	42,35	0	Queralbs,GI	6,8335	0,5		
1381774	1430	1	11	0:00:00	2,2	42,4167	0	E. Puigcerda,GI	4,6535	0,5		
1381775	1431	4	24	14:00:00	-3,8333	37,1333	0	S, Granada	6,2885	0,5		
1381780	1448	5	24	1:00:00	2,2167	41,6	0	Cardener,B	5,7435	0,5		
1381781	1450	9	16	0:00:00	2,8	42,6	0	Perpignan,FRA	5,471	0,5		
1381786	1482	10	10	0:00:00	-0,9187	38,0833	0	Orhuela,A	6,058	0,5		
1381788	1487	11	1	0:00:00	-2,4667	36,8333	0	Almería	6,058	0,5		
1381790	1494	1	26	20:00:00	-4,3333	36,5833	0	S, Málaga	6,058	0,5		
1381791	1504	4	5	9:00:00	-5,4667	37,3833	0	Carmona,SE	6,3885	0,5		
1381792	1504	6	21	23:00:00	-5,4667	37,3833	0	Carmona,SE	4,381	0,5		
1381794	1511	12	23	7:00:00	2,2	41,9667	0	Barcelona	3,836	0,5		
1381795	1511	12	25	3:00:00	2,2	41,9667	0	Barcelona	3,291	0,5		

Figura 15.- Vista de la tabla "catalogs" con PI\_todoSOM desplegado.



### 5.1.3 Zonas de completitud. Completitud del catálogo.

El siguiente paso en la elaboración del catálogo del proyecto ha sido el análisis de completitud. Un catálogo sísmico se considera completo en una zona, si contiene todos los sismos que han ocurrido en la misma y no sólo aquellos de los que se tenga registro. El problema frecuentemente encontrado es que al remontarnos hacia atrás en el tiempo, la información sobre terremotos es cada vez menor, en especial para los eventos de menor tamaño, perdiéndose la seguridad de que el catálogo contenga todos los terremotos realmente ocurridos en esa época. En general, cuanto menor sea la intensidad o magnitud, menor será el periodo en el que el catálogo pueda considerarse completo. Por lo tanto, se deben fijar los años de referencia para cada rango de magnitud o de intensidad a partir de los cuales se puede asumir esa completitud.

Estos años de referencia deberían ser obtenidos para cada una de las fuentes sísmicas (en el método zonificado) que van a ser utilizadas en la evaluación de la peligrosidad, ya que estos van a ser en general distintos dependiendo de la zona considerada por el diferente nivel de actividad sísmica y de detectabilidad de las redes sísmicas en diferentes regiones geográficas. No obstante, se suele simplificar esta estimación considerando un número limitado de regiones (o grandes zonas) en las que puede suponerse que ha existido históricamente un nivel de registro de terremotos similar. En la figura 16 se indican a grosso modo las regiones inicialmente empleadas para fijar años de referencia comunes a todas las zonas dentro de la región.



Figura 16.- Zonas de completitud para Península Ibérica.



Dado que el análisis de completitud es bastante complejo y subjetivo, se facilitó una tabla con los años de referencia para intervalo de magnitud, formada por cuatro zonas generales de completitud, en las cuales ya que no se aprecian diferencias significativas entre los años de referencia derivados para las zonas de Pirineos y para la zona del resto de la Península Ibérica se tratan de manera conjunta ambas zonas. Esta parte del proyecto se tomó del trabajo publicado en IGN-UPM (2012)

Estas zonas de completitud servirán más adelante para conocer los años de referencia para diferentes magnitudes en cada zona de las diferentes mallas que se generarán en el proyecto.

Los años de referencia para las zonas empleados se muestran en la siguiente figura 17, en la que se aprecia que los periodos de completitud mayores se presentan en el SE de España y el resto de la Península Ibérica, y los menores en las Azores. A partir de  $M_w$  6.0 los periodos de completitud se igualan con los periodos del catálogo de cada zona, por lo que no podría asegurarse que se trate de periodos completos.

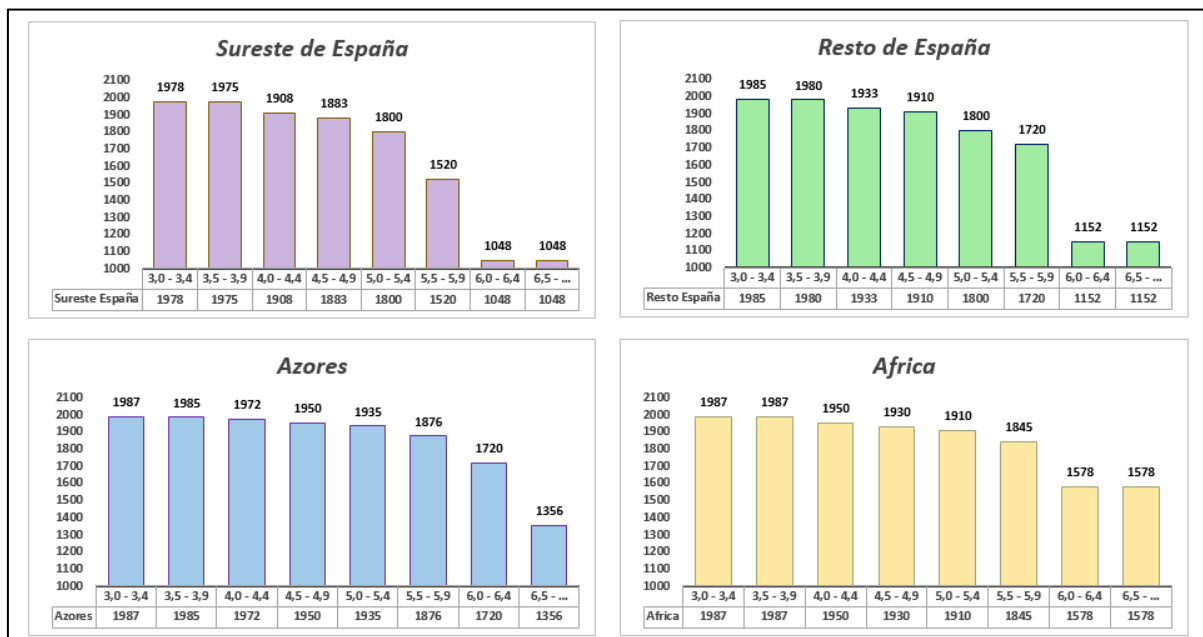


Figura 17.- Años de referencia considerados para las diferentes zonas de la Península Ibérica y los intervalos de magnitud.



## 5.2 Catálogo de América Central

### 5.2.1 Obtención de datos

En este apartado se describirá el catálogo de América Central. A diferencia del catálogo de la Península Ibérica, en este caso no fue necesario descargar los datos, pues el catálogo fue realizado en el contexto de un proyecto (proyecto RESIS II), en el que participó el Grupo de Investigación de Ingeniería Sísmica (GIIS).

El catálogo empleado en el presente proyecto fue elaborado unificando diversos catálogos regionales. Para ello se partió del catálogo de Rojas et al. (1993a), actualizado hasta el año 2011 con los datos del CASC (del inglés, Central America Seismological Center) y de los catálogos nacionales de El Salvador, Nicaragua, Costa Rica y Panamá. Todos ellos fueron revisados para acabar configurado el catálogo regional del proyecto RESIS II, que contiene tanto los datos macrosísmicos reportados desde 1522, como los instrumentales registrados en las últimas décadas. El catálogo cuenta con el respaldo de un sismólogo de cada país centroamericano, que ha trabajado en catálogo de su país, analizando la sismicidad en el cuadrante asignado según una distribución definida para cubrir toda la región y tomando una única solución para cada evento. Se trata de un catálogo sísmico completo y homogeneizado a magnitud momento  $M_w$ .

Una vez que fueron revisados, depurados y homogeneizados los catálogos nacionales, se unieron configurando un único catálogo regional de proyecto, homogeneizado a magnitud  $M_w$ , para lo que se han aplicado correlaciones locales cuando este dato no estuviera originalmente calculado. El catálogo regional está integrado por todos los sismos de magnitud  $M_w \geq 3,5$ , resultando un total de 23.211 eventos (figura 18).

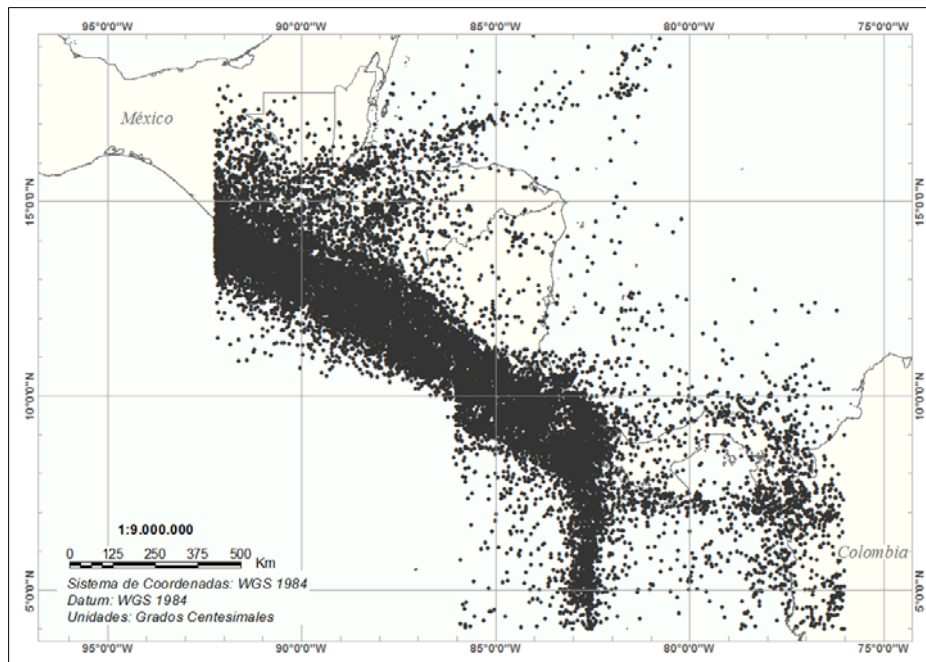


Figura 18.- Localización de los epicentros de los sismos del catálogo de América Central hasta 2011.

Después de que se incluyeran los datos de sismicidad de los diferentes catálogos nacionales en un único catálogo, se sometieron los datos a un proceso de revisión y depuración para asegurar que no existieran sismos repetidos, algo que fue detectado y corregido principalmente en las zonas fronterizas.

### 5.2.2 Completitud

Tras la labor de depuración se procedió al análisis de completitud del catálogo, de manera similar a la explicada para el caso de la Península Ibérica.

Los años de referencia se calculan para un número limitado de regiones (o grandes zonas) en las que puede suponerse que ha existido históricamente un nivel de detección de terremotos similar. Se han diferenciado dos zonas por profundidad: sismos con profundidad menor o igual que 34 km, correspondiente a la zona superficial, y sismos con profundidad mayor que 34 km, correspondientes a la zona de subducción de América Central. Conviene aclarar el motivo por el que se ha elegido esta profundidad de corte a 34 km, cuando tectónicamente las zonas superficiales se consideran hasta profundidad de 25 km, y a partir



de ahí comienza la subducción intermedia. Debido a la dificultad de cálculo de la profundidad en la localización del hipocentro, la mayor parte de los programas fijan una profundidad de 33 km para eventos superficiales, cuando no se dispone de suficiente información para ajustar este dato con mayor precisión. Por ello, en la mayor parte de los casos, los sismos que aparecen en los catálogos con profundidad de 33 km son en realidad eventos superficiales. Teniendo esto en cuenta se ha preferido en este trabajo incluir los sismos de esa profundidad, en realidad ficticia, dentro de las zonas superficiales ( $h \leq 25$  km), en lugar de asignarlos a la subducción. En la tabla 2 se muestran los años de inicio del periodo de completitud (año de referencia) estimados para cada rango de magnitudes a partir de la observaciones.

**Tabla 2.- Años de referencia a partir de los cuales se considera completo el catálogo sísmico de América Central para cada intervalo de magnitud, derivado de un análisis independiente por profundidades. (Benito y Torres, 2011)**

Tamaño	América Central	
	$h \leq 34$ km	$h > 34$ km
3.5 – 3.9	1984	1983
4.0 – 4.4	1976	1980
4.5 – 4.9	1971	1972
5.0 – 5.4	1957	1965
5.5 – 5.9	1932	1959
6.0 – 6.4	1865	1953
6.5 – 6.9	1745	1850
7.0 – 7.4	1732	1825
7.5 – 7.9	1522	1522
8.0 - ...	1522	1522

Nótese la diferencia que mientras en la completitud de la Península Ibérica se separa por zonas definidas por latitud y longitud, en América Central esa diferenciación de zonas se hace según la profundidad.

Todo lo descrito anteriormente corresponde a labores realizadas por el GIIS en la confección del catálogo regional de América Central. A partir de este punto, se describirán las labores realizadas para adaptar dicho catálogo al presente proyecto.



Para poder trabajar con este catálogo en la aplicación Expel es necesario adaptar dicho catálogo para introducirlo en una base de datos Access, la cual tiene unas características peculiares descritas en el apartado anterior “5.1 Datos Península Ibérica”. Durante este proceso se detectó un error en uno de los registros sísmicos, que impedía cualquier tipo de cálculo de peligrosidad sísmica con la aplicación, concretamente en el registro con Id = 113. Dicho seísmo tenía como mes de ocurrencia el número 18, tras la revisión de los datos anteriores y posteriores a este se decidió cambiar el mes al número 8 por tratarse de una errata, ya que el resto de datos guardaban sentido y se encontraban acordes.

### **5.2.3 Geometría de subducción**

Debido a la distribución espacial de la sismicidad, a las principales características sismotectónicas de la zona y atendiendo a la geometría de subducción se decidió clasificar el catálogo anterior en tres subcatálogos: superficial, subducción intermedia y subducción profunda. A priori estas zonas se pueden dividir según la profundidad:

- Superficial: de 0 km a 35 km de profundidad.
- Subducción intermedia: de 35 km a 60 km de profundidad.
- Subducción profunda: profundidad de 65 km en adelante.

En cambio para este proyecto se pensó en ir más allá y separar esas zonas de manera similar pero más acorde a la geometría de subducción. Como se puede observar en la figura 19, la zona de subducción profunda no sufre variación alguna. En cambio, la capa que tiene profundidad de 0 km a 35 km y que se encuentra en la placa que subduce (placa de Cocos), pasa a formar parte de la zona de subducción intermedia.



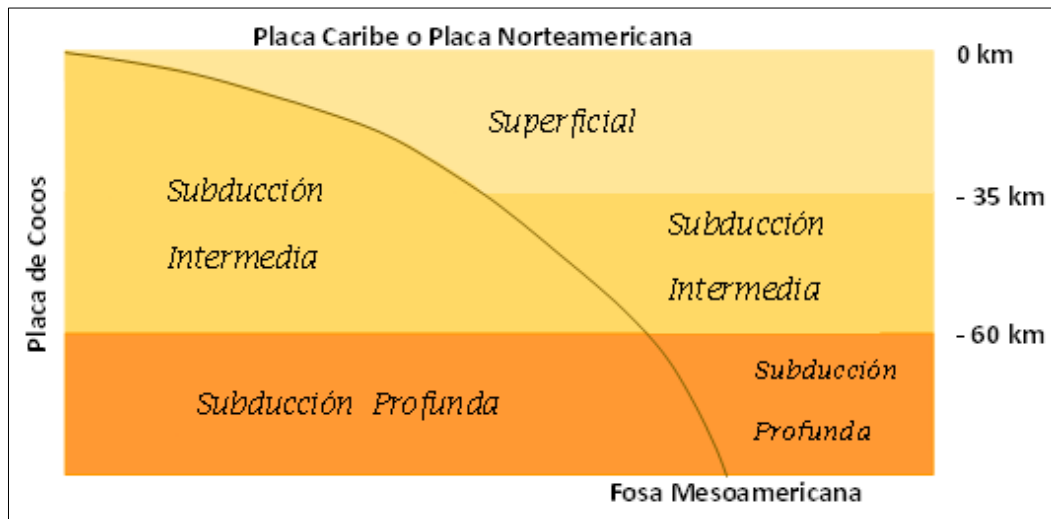
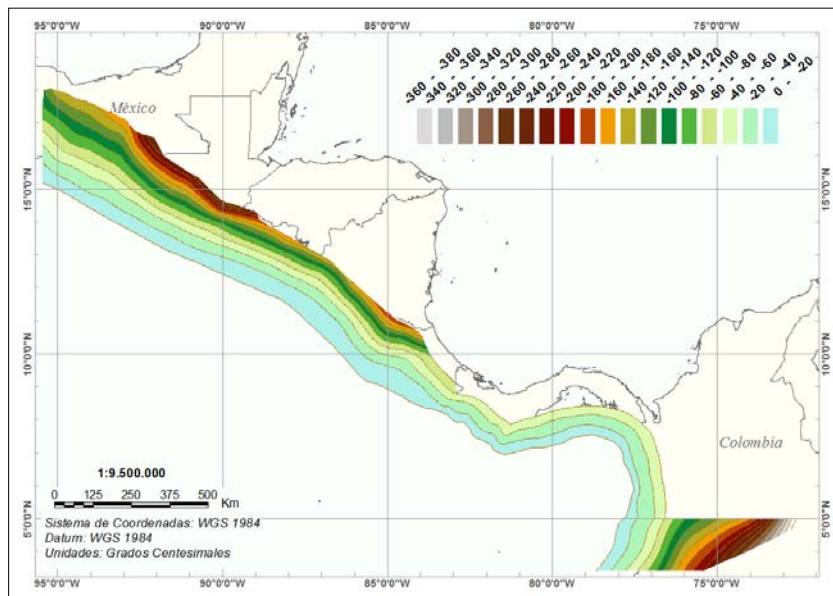


Figura 19.- Modelo empleado en la división de seísmos en América Central.

Para poder realizar esta división del catálogo fue necesaria la elaboración de un modelo tridimensional de la zona de subducción de América Central. Para ello se partió de un fichero que contenía las curvas de nivel de la placa que subduce facilitado por el GIS y producido, en su versión original por el USGS (Hayes et al. 2012). Mediante el uso de la herramienta ArcGis 10.1 se elaboró una Red irregular de triángulos (TIN, del inglés Triangular Irregular Network) de la placa de subducción desde la cota 0 a la -60 km prolongando las curvas de nivel por la zona de Panamá (figura 20), ya que en esa zona existe una tectónica compleja, donde el contacto entre las placas del Coco y Caribe no es una subducción pura, pero era necesario para poder unir todo el TIN con la parte oeste de Colombia. Dicho TIN, sirvió junto con diferentes filtros de profundidad, para la separación de los registros según su ubicación geográfica y crear los diferentes catálogos.



*Métodos.*



**Figura 20.- Red irregular de triángulos (TIN) de América Central con curvas de nivel.**

Tras este proceso se tienen los tres catálogos buscados:

- Superficial: con un total de 10.559 registros sísmicos.
- Subducción intermedia: con un total de 8.573 registros.
- Subducción profunda: con un total de 4.079 seísmos.

Aunque la distribución de la sismicidad América Central está condicionada principalmente por la profundidad, también se busca analizar la variabilidad temporal de los parámetros de sismicidad. Para este fin, se plantea el crear al menos una división temporal que originase dos ventanas temporales. El año elegido para tal división fue 1985, año a partir del cual empiezan a mejorar sustancialmente la cobertura de estación sísmicas en la región. Finalmente se tendrán seis casos de estudio en América Central: a los tres expuestos anteriormente, se suman los tres obtenidos por la nueva ventana temporal, los cuales son:

- Superficial 1985: desde enero de 1985 hasta 2011, se parte del anterior catálogo de superficial. Está compuesto por 9.469 seísmos.
- Subducción intermedia 1985: desde enero de 1985 hasta 2011, se parte del anterior catálogo de subducción intermedia. Está compuesto por 7.198 registros.
- Subducción profunda 1985: desde enero de 1985 hasta 2011, se parte del anterior catálogo de subducción profunda. Está compuesto por 3.119 seísmos.



# *Métodos.*



## 6. MÉTODOS

### 6.1 Introducción

En este apartado se explicará toda la metodología seguida durante los distintos procesos para la realización del proyecto fin de carrera.

El método seguido en este trabajo para el cálculo de los parámetros de sismicidad prescinde de las restricciones espaciales impuestas a la hora de delimitar las zonas de sismicidad uniforme en las que se basa el método zonificado. En el nuevo enfoque, se realizan los cálculos de parámetros de sismicidad sobre puntos repartidos de forma regular sobre todo el territorio de estudio, siendo la distancia entre nodos de  $0,1^\circ$ .

Los parámetros de sismicidad de cada nodo o punto de cálculo se calculan a partir de los terremotos contenidos en un polígono centrado en dicho punto. Por simplicidad, dicho polígono es un cuadrado, cuyo lado, mayor o menor, marcará la resolución espacial del estudio. En este proyecto se investiga el efecto de calcular los parámetros de sismicidad considerando los eventos contenidos en cuadrados de las  $0,2^\circ$ ,  $0,5^\circ$  y  $1^\circ$ . Es de esperar que si se emplea un cuadrado de lado excesivamente pequeño no habrá suficientes registros para poder calcular los parámetros de sismicidad, y a la inversa, si el tamaño es muy grande, se obtendrán resultados demasiado homogéneos, perdiendo definición en el estudio y dando lugar a resultados poco representativos de la sismicidad de la zona considerada.

### 6.2 Ventanas espaciales

Debido a los errores que se cometen en el cálculo de la ubicación de los sismos, que pueden llegar a ser de varios kilómetros, y a que los límites de las zonificaciones que se proponen mediante el método tradicional no tienen una precisión muy elevada, se decide prescindir de la esfericidad terrestre en el proyecto, por lo que todas las mallas se calcularon en coordenadas planas.



Para la Península Ibérica se diseñaron tres mallas espaciales con diferente anchura (0.2°, 0.5° y 1°) utilizando la herramienta Arcgis 9.3 mediante el siguiente procedimiento:

Se parte de las coordenadas geográficas de un punto (vértice noroeste) cuyas de coordenadas (longitud, latitud) = (45°Norte, 13°Oeste), equivalente para las tres mallas espaciales, y se finaliza en el punto sureste con coordenadas (34° Norte, 6° Este). Las tres mallas espaciales propuestas en función de su tamaño son:

- Malla espacial de 0,2° de lado: Es la de menor tamaño de celda. Tiene superficie de unos 400 km<sup>2</sup>. Y un total de 5.225 celdas.
- Malla espacial de 0,5° de lado: Esta malla tiene un tamaño de celda de 3.000 km<sup>2</sup> aproximadamente. Tiene un total de 836 celdas.
- Malla espacial de 1° de lado: Esta malla tiene un tamaño de celda de unos 12.300 km<sup>2</sup> aproximadamente. Tiene un total de 209 celdas. (Figura 21).

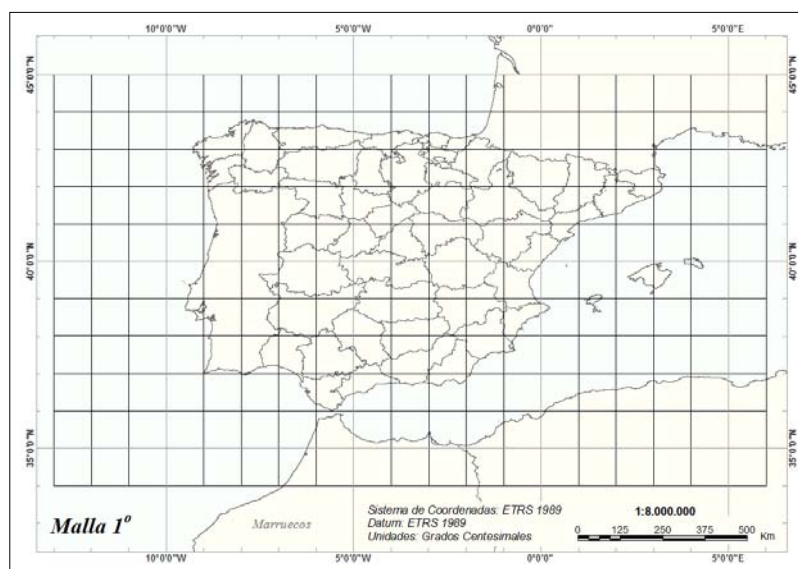


Figura 21.- Malla espacial de un grado de lado para la Península Ibérica.



A estas mallas espaciales se las denomina “mallas base”. A partir de ellas se irán calculando las denominadas “mallas desplazadas”. De dichas mallas base interesa exportar por un lado los datos de los vértices que componen cada celda y sus respectivos centroides como se ve en la figura 22. Los primeros son necesarios para poder calcular los vértices de la malla desplazada, y para seleccionar los eventos que se usarán a la hora de calcular los parámetros de sismicidad, que serán asignados precisamente a los centroides de las respectivas celdas. Las coordenadas de los vértices se exportarán en una hoja de cálculo Excel para su tratamiento y para la obtención de las mallas desplazadas y de centroides.

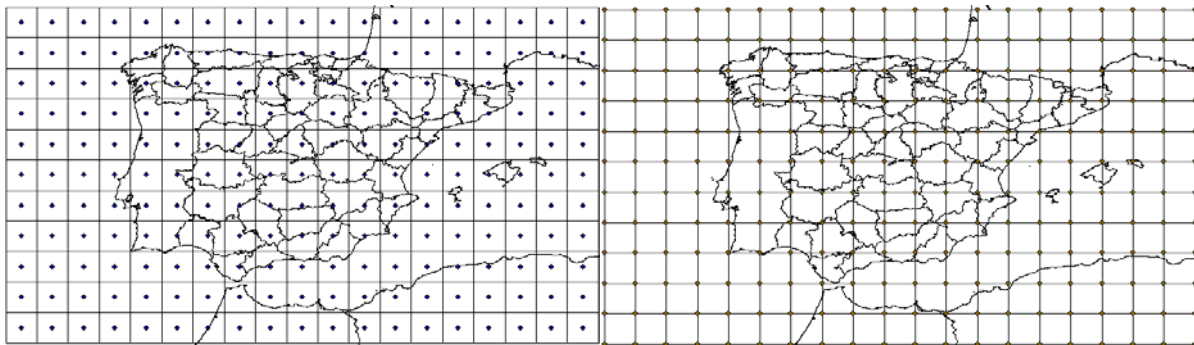


Figura 22.- Centroides y vértices de la malla base para 1º de lado, respectivamente.

Las mallas base se desplazarán una determinada distancia, tanto en longitud, como en latitud, como en ambas al mismo tiempo. Dicho desplazamiento es de  $0,1^\circ$ , ya que es una cantidad con la que se cubre todo el territorio de estudio y se alcanza uniformidad en el cálculo, sin zonas de sombra por la falta de resolución, y a su vez facilitando los cálculos y la interpretación de los resultados. El desplazamiento se hace siguiendo la dirección de meridianos y paralelos, y siempre será en sentido sureste. Para ello se creó una macro en Excel con la que agilizar los cálculos, teniendo en cuenta la estructura de datos que será necesaria tener para su implementación en EXPEL.



Dependiendo del tamaño de la celda, cada malla se desplaza una cantidad concreta de veces, evitando la superposición de celdas:

- Malla de 0,2° de lado: Se desplaza la malla un total de 4 veces. El desplazamiento se hace hasta que la siguiente celda calculada que se obtiene es repetida o lo que es lo mismo, hasta que las coordenadas de los vértices de una celda se superponen con las de otra celda, se tienen un total de 20.900 centroides, uno por celda calculada (figura 23).
- Malla de 0,5° de lado: Se desplaza un total de 25 veces. El desplazamiento se hace hasta que la siguiente celda calculada que se obtiene se superpone a la inicial, se tienen un total de 20.900 centroides, uno por celda calculada.
- Malla de 1° de lado: Se desplaza 100 veces en total. Al igual que las anteriores, se desplaza hasta el punto de llegar a superponerse a la inicial. Al igual que los demás casos se tienen un total de 20.900 centroides, uno por celda calculada.

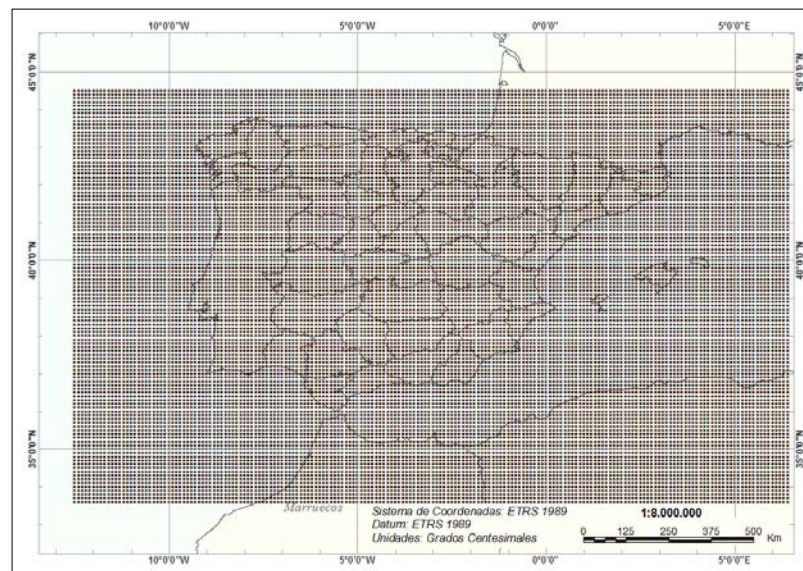


Figura 23.- Todos los centroides para la Península Ibérica.



Debido a que la cantidad de datos que se va a manejar es muy elevada, se hace imprescindible adoptar una numeración que sea lo suficientemente clara como para identificar a que malla pertenece cada cálculo y cada centroide de manera ágil. La numeración que se emplea para las mallas finalmente es:

- Un primer bloque de 3 dígitos, el cual empieza por la letra “M” que indica malla, y seguido de dos números, 02 para la malla de  $0,2^{\circ}$  de lado, 05 para la malla de  $0,5^{\circ}$  de lado y 10 para la malla de  $1^{\circ}$  de lado.
- El segundo bloque está formado también por 3 dígitos, el primero es la letra “X” que indica el desplazamiento hacia el Este en el eje X, y los otros dos son números que indican cuanto se desplazó, es decir, la malla base será X00, en cambio una malla que sufra un desplazamiento de  $0,2^{\circ}$  será X02.
- Y por último otro bloque de dígitos formado también por un conjunto de 3, el primero es la letra “Y” que indica el desplazamiento que sufre la malla hacia el Sur en el eje Y, y los otros dos números que indican cuanto se desplazó.

Por lo tanto, la malla base de  $0,5^{\circ}$  se numerará M05X00Y00. En cambio una malla base de  $0,5^{\circ}$  desplazada  $0,3^{\circ}$  en X y  $0,4^{\circ}$  en Y se numerará M05X03Y04.

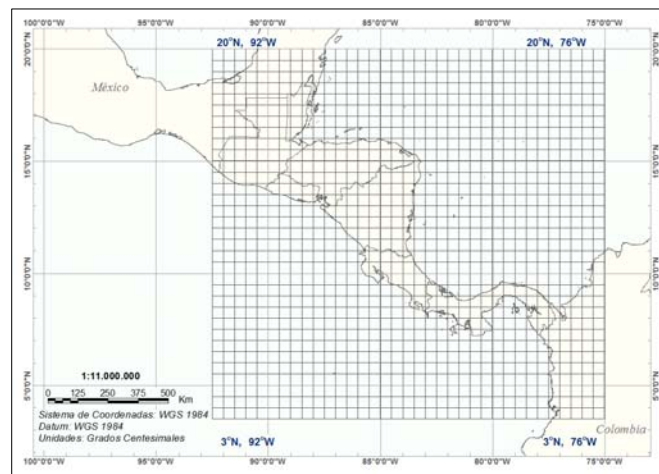
Para la malla de centroides se adopta una numeración similar a las mallas, pero prescindiendo de las letras, puramente numérica. Debido a que una celda se repite, como se ha visto, varias veces según su malla base, y por lo tanto su centroide, se adopta la siguiente solución: tomando la numeración de la malla a la que pertenece la celda del centroide en cuestión, pero prescindiendo de las letras que la componen y añadiendo a continuación cuatro dígitos numéricos, equivalentes al número de celda. Si el número de celda es menor de mil, se pondrán a la izquierda tantos ceros como sean necesarios hasta llegar a los 4 dígitos. Es decir, para el centroide de la zona 367 de la malla numerada como: M05X02Y01, se nombrará 0502010367 (como varias aplicaciones de cálculo eliminan los ceros a la izquierda de la parte entera se podrá encontrar como 502010367).





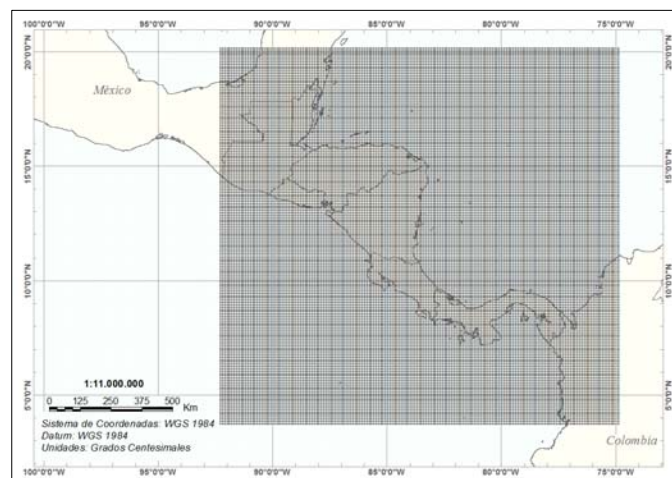
*Métodos.*

La manera de proceder en el caso de América Central es parecida (figura 24). La malla sigue la dirección de meridianos y paralelos, aunque en un primer momento se estudió la posibilidad de orientarla conforme a la línea de subducción de la placa, tras unos primeros análisis esta opción acabo siendo descartada debido a la complejidad del cálculo de las coordenadas de las diferentes mallas desplazadas y, sobre todo, a que los resultado de usar esta orientación según la línea de subducción a usar la dirección de meridianos y paralelos no produce apenas variación.



**Figura 24.- Malla base de América Central de 0,5° de lado.**

Tanto la malla de 0,5° como la de 0,2° de lado, se desplazarán de forma similar a la Península Ibérica. Tendrán un valor de 0,1° y dirección del desplazamiento noreste, por lo que en total se desplazará 25 veces la de 0,5° y 4 veces la de 0,2°, teniendo ambas un total de 28.875 celdas, con sus respectivos centroides para cubrir toda América Central (figura 25).



**Figura 25.- Todos los centroides de la malla de 0,5° de América Central.**



Al igual que para la Península Ibérica, se adoptó una numeración para poder distinguir las diferentes celdas y sus respectivos centroides, según que desplazamiento haya sufrido la malla, es similar a la de la Península Ibérica pero añadiendo al inicio dos letras, “CA”, para poder hacer distinción entre las mallas de los dos territorios de estudio.

Una vez establecidas las mallas necesarias para poder realizar los cálculos con Expel, se deben generar las bases de datos tipo Access siguiendo el criterio necesario para trabajar sobre dicha aplicación. Para ello es necesario exportar los vértices de la malla base correspondiente y, mediante la macro creada en Excel calcular por un lado los diferentes nombres de las mallas, así como sus respectivas celdas y los vértices que las componen. Todo ello se realiza siguiendo una estructura determinada de tablas, con sus campos correspondientes:

- Tabla Zonificación: en ella se almacenan los nombres de las mallas en el campo “Autor”. Un “Id” que hace de clave primaria, en él se almacena un identificador único para cada malla, que consiste en el nombre de la malla con la nomenclatura explicada anteriormente pero prescindiendo de los dígitos de letras. Y un campo de “descripción” con una breve descripción de la malla.
- Tabla Zona: es la tabla principal, formada por un campo identificador de la malla a la que pertenece la zona, y otro Id con el número de celda, ambos juntos forman la clave primaria de la tabla. También está formada por un campo nombre, donde se almacenará el nombre de la zona, en dicho proyecto coincide con el Id de la celda, y un último campo el cual almacena el “completeness” al que pertenece dicha celda en este proyecto.
- Tabla Vértices: en ella se almacenan los vértices de toda la malla. Esta tabla está formada por un “Id” de la malla que pertenece el vértice, un “Id” de la zona a la que pertenece y un último “Id” con el número de vértice. Los tres campos de Id en conjunto forman la clave primaria de dicha tabla. A parte de los campos identificadores se tienen los campos de coordenadas: latitud, longitud y profundidad.



- Tabla Completeness: en esta tabla se guarda la relación que existe entre las zonas, celdas en este caso, con el fichero de completitud correspondiente para cada celda. Está relacionada con la tabla de zona mediante la columna “completeness” y un campo “ID” identificador de cada fichero de completitud. También tiene un campo nombre, y uno de descripción.

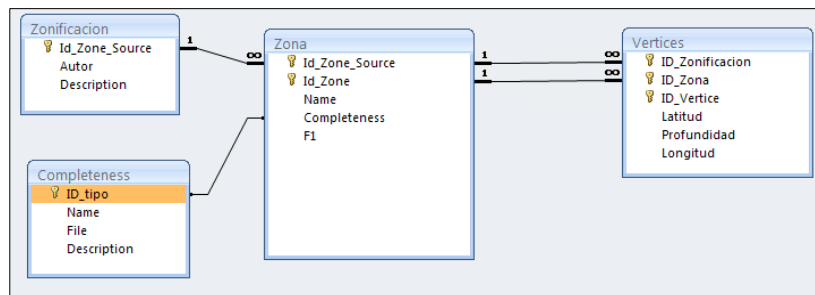


Figura 26.- Esquema de la base de datos de las mallas.

En la figura 26 se puede ver el esquema y las relaciones existentes entre las diferentes tablas de la base de datos, así como las claves primarias que mantienen entre sí. Hay que tener en cuenta que este esquema no está pensado en exclusiva para el presente proyecto, sino que es de carácter obligatorio para los datos de entrada de Expel, teniéndose que adaptar los datos al mismo.

En las figuras 27 y 28 se muestra como se almacenan las celdas una vez introducidas en las bases de datos, para la Península Ibérica malla de 0,5° y para América Central con malla de 0,5°, respectivamente.



# “Análisis espaciotemporal de la sismicidad en la Península Ibérica y América Central: Aplicaciones de la peligrosidad sísmica.”



## Métodos.

Id_Zone_Source	Autor	Description
50000	M0SX00Y00	PI 0,5 Grados y SIN desplazamiento
50001	M0SX00Y01	PI 0,5 Grados con 0 grados Desplz. X y 0,1 grados Desplz Y
50002	M0SX00Y02	PI 0,5 Grados con 0 grados Desplz. X y 0,2 grados Desplz Y
50003	M0SX00Y03	PI 0,5 Grados con 0 grados Desplz. X y 0,3 grados Desplz Y
50004	M0SX00Y04	PI 0,5 Grados con 0 grados Desplz. X y 0,4 grados Desplz Y
50100	M0SX01Y00	PI 0,5 Grados y 0,1 de desplazamiento en X
50101	M0SX01Y01	PI 0,5 Grados con 0,1 grados Desplz. X y 0,1 grados Desplz Y
50102	M0SX01Y02	PI 0,5 Grados con 0,1 grados Desplz. X y 0,2 grados Desplz Y
50103	M0SX01Y03	PI 0,5 Grados con 0,1 grados Desplz. X y 0,3 grados Desplz Y
50104	M0SX01Y04	PI 0,5 Grados con 0,1 grados Desplz. X y 0,4 grados Desplz Y
50200	M0SX02Y00	PI 0,5 Grados y 0,2 de desplazamiento en X
50201	M0SX02Y01	PI 0,5 Grados con 0,2 grados Desplz. X y 0,1 grados Desplz Y
50202	M0SX02Y02	PI 0,5 Grados con 0,2 grados Desplz. X y 0,2 grados Desplz Y
50203	M0SX02Y03	PI 0,5 Grados con 0,2 grados Desplz. X y 0,3 grados Desplz Y
50204	M0SX02Y04	PI 0,5 Grados con 0,2 grados Desplz. X y 0,4 grados Desplz Y
50300	M0SX03Y00	PI 0,5 Grados y 0,3 de desplazamiento en X
50301	M0SX03Y01	PI 0,5 Grados con 0,3 grados Desplz. X y 0,1 grados Desplz Y
50302	M0SX03Y02	PI 0,5 Grados con 0,3 grados Desplz. X y 0,2 grados Desplz Y
50303	M0SX03Y03	PI 0,5 Grados con 0,3 grados Desplz. X y 0,3 grados Desplz Y
50304	M0SX03Y04	PI 0,5 Grados con 0,3 grados Desplz. X y 0,4 grados Desplz Y
50400	M0SX04Y00	PI 0,5 Grados y 0,4 de desplazamiento en X
50401	M0SX04Y01	PI 0,5 Grados con 0,4 grados Desplz. X y 0,1 grados Desplz Y
50402	M0SX04Y02	PI 0,5 Grados con 0,4 grados Desplz. X y 0,2 grados Desplz Y
50403	M0SX04Y03	PI 0,5 Grados con 0,4 grados Desplz. X y 0,3 grados Desplz Y
50404	M0SX04Y04	PI 0,5 Grados con 0,4 grados Desplz. X y 0,4 grados Desplz Y

Id_Zone	Name	Completeness	F1	Agregar nuev
0 0			2	

ID_Vertice	Latitud	Longitud	Profundidad	Agregar nuev
0	34,1	-12,1		
1	33,6	-12,1		
2	33,6	-12,6		
3	34,1	-12,6		
0	0	0	0	
1 1				2
2 2				2
3 3				2
4 4				2
5 5				2
6 6				2

Figura 27.- Base de datos con la malla de 0.5° grados de la Península Ibérica.

Id_Zone_Source	Autor	Description
50000	CAM0SX00Y00	
50001	CAM0SX00Y01	
50002	CAM0SX00Y02	
50003	CAM0SX00Y03	
50004	CAM0SX00Y04	
50100	CAM0SX01Y00	
50101	CAM0SX01Y01	
50102	CAM0SX01Y02	
50103	CAM0SX01Y03	
50104	CAM0SX01Y04	
50200	CAM0SX02Y00	
50201	CAM0SX02Y01	
50202	CAM0SX02Y02	
50203	CAM0SX02Y03	
50204	CAM0SX02Y04	
50300	CAM0SX03Y00	
50301	CAM0SX03Y01	
50302	CAM0SX03Y02	
50303	CAM0SX03Y03	
50304	CAM0SX03Y04	
50400	CAM0SX04Y00	
50401	CAM0SX04Y01	
50402	CAM0SX04Y02	
50403	CAM0SX04Y03	
50404	CAM0SX04Y04	

Id_Zone	Name	Completeness	F1	Agregar nuev
0 0			21	

ID_Vertice	Latitud	Longitud	Profundidad	Agregar nuev
0	4,4	-91,6		
2	3,9	-91,6		
1	3,9	-92,1		
0	4,4	-92,1		
0	0	0	0	
1 1				21
2 2				21
3 3				21
4 4				21

Figura 28.- Base de datos para América central con la malla de 0.5°.



### 6.3 Periodos de completitud

En diferentes partes del proyecto se ha hablado de qué es la completitud (Apartado 5.1 y 5.2 de Datos) y de que forma parte de los datos de entrada de Expel como ficheros ligados a la base de datos en la tabla “completeness” (apartado anterior). En este apartado se van a unificar todos los conceptos descritos dándoles la utilidad buscada en el presente proyecto.

Para la Península Ibérica se tienen cuatro ventanas temporales: 2002-2013, 1985-2013, 1962-2013 y 1048-2013. Y para América Central dos: 1985-2011 y 1522-2011. Cada uno de estos periodos se establece de acuerdo con las características de la red sísmica de detección o con modificaciones sustanciales en la definición de los parámetros del catálogo (normalmente la magnitud). Para poder calcular los parámetros sísmicos, es necesario usar un catálogo completo en los diferentes rangos de magnitud. Las tablas 3, 4, 5 y 6 contienen los años de completitud del catálogo de la Península Ibérica para diferentes zonas epicentrales e intervalos de magnitud.

Se parte de los datos facilitados por el GIIS, cuatro ficheros de completitud para la Península Ibérica, uno por cada una de las zonas (Azores, Norte de África, Sureste de España y Resto de la Península Ibérica), teniendo los siguientes datos de completitud (años de referencia a partir de los cuales el catálogo se puede considerar completo para distintos intervalos de magnitud):

**Tabla 3.- Años de referencia para Península Ibérica. Periodo 1048-2013. (IGN-UPM, 2012)**

Tamaño	Península Ibérica			
	Azores	Norte de África	Sureste España	Resto de España
3.0 – 3.4	1987	1987	1978	1985
3.5 – 3.9	1985	1987	1975	1980
4.0 – 4.4	1972	1950	1908	1933
4.5 – 4.9	1950	1930	1883	1910
5.0 – 5.4	1935	1910	1800	1800
5.5 – 5.9	1876	1845	1520	1720
6.0 – 6.4	1720	1578	1048	1152
6.5 – ...	1356	1578	1048	1152



Los datos de periodos de completitud de la tabla anterior se usarán directamente para la ventana temporal que abarca desde 1048 a 2013. En cambio para el resto de ventanas temporales habrá que hacer modificaciones para evitar usar un año de referencia que sea menor que el año de inicio de la ventana temporal considerada, lo cual llevaría a la estimación de tasas irrealmente bajas. Así, para el periodo que comprende de 2002 a 2013, se deben modificar estos datos poniéndose como nueva fecha de corte para cada intervalo de magnitud 2002. Al ser igual para las cuatro zonas se crea un único fichero de completitud, quedando de la siguiente manera:

**Tabla 4.- Años de referencia para Península Ibérica. Periodo 2002-2013.**

<i>Tamaño</i>	<i>Península Ibérica</i>
	<i>Periodo 2002-2013</i>
3.0 – 3.4	2002
3.5 – 3.9	2002
4.0 – 4.4	2002
4.5 – 4.9	2002
5.0 – 5.4	2002
5.5 – 5.9	2002
6.0 – 6.4	2002
6.5 – ...	2002

Un estudio similar para la ventana temporal de 1985 a 2013 requiere analizar cada zona de completitud y adaptarla al periodo temporal propuesto del subcatálogo. Para las zonas de completitud llamadas “sureste de España” y “Resto de España” se considera el catálogo completo a partir de 1985. En cambio, para las otras dos zonas, “Azores” y “Norte de África” para seísmos de tamaño pequeño el catálogo se considera completo en esas zonas a partir de 1987. Los años de referencia considerados para la ventana temporal de 1985 a 2013 quedan finalmente así:



**Tabla 5.- Años de referencia para Península Ibérica. Periodo 1985-2013.**

Tamaño	Península Ibérica – Periodo 1985 - 2013			
	Azores	Norte de África	Sureste España	Resto de España
3.0 – 3.4	1987	1987	1985	1985
3.5 – 3.9	1985	1987	1985	1985
4.0 – 4.4	1985	1985	1985	1985
4.5 – 4.9	1985	1985	1985	1985
5.0 – 5.4	1985	1985	1985	1985
5.5 – 5.9	1985	1985	1985	1985
6.0 – 6.4	1985	1985	1985	1985
6.5 – ...	1985	1985	1985	1985

Para la ventana temporal de 1962 a 2013 se procede análogamente a la anterior, resultando los periodos de completitud siguientes:

**Tabla 6.- Años de referencia para Península Ibérica. Periodo 1962-2013.**

Tamaño	Península Ibérica – Periodo 1962 - 2013			
	Azores	Norte de África	Sureste España	Resto de España
3.0 – 3.4	1987	1987	1978	1985
3.5 – 3.9	1985	1987	1975	1980
4.0 – 4.4	1972	1962	1962	1962
4.5 – 4.9	1962	1962	1962	1962
5.0 – 5.4	1962	1962	1962	1962
5.5 – 5.9	1962	1962	1962	1962
6.0 – 6.4	1962	1962	1962	1962
6.5 – ...	1962	1962	1962	1962



Para las ventanas temporales de América Central se procede de manera análoga que para la Península Ibérica. Se parte de los datos facilitados por el GHS, en este caso una tabla (tabla 7) con los periodos de completitud diferenciados en dos zonas según la profundidad.

**Tabla 7.- Años de referencia para América Central. Periodo 1522-2013.**

Tamaño	América Central	
	$h \leq 34 \text{ km}$	$h > 34 \text{ km}$
3.5 – 3.9	1984	1983
4.0 – 4.4	1976	1980
4.5 – 4.9	1971	1972
5.0 – 5.4	1957	1965
5.5 – 5.9	1932	1959
6.0 – 6.4	1865	1953
6.5 – 6.9	1745	1850
7.0 – 7.4	1732	1825
7.5 – 7.9	1522	1522
8.0 - ...	1522	1522

Estos periodos de completitud serán los utilizados para la ventana temporal de América Central que va desde 1522 a 2011. En cambio, para la segunda ventana temporal, 1985 a 2011 se procede como en los casos anteriores. Analizando los años de referencia de completitud para todos los intervalos de tamaño en ambas zonas, se puede ver como el subcatálogo es completo en todos ellos, ya que el año más restrictivo es 1984 para  $h \leq 34 \text{ km}$  y 1983 para  $h > 34 \text{ km}$ , y el subcatálogo comienza en 1985, por lo que tan solo hay que generar un fichero, común para ambas profundidades con los siguientes datos de completitud:

**Tabla 8.- Años de referencia para América Central. Periodo 1985-2013.**

Tamaño	América Central
	Periodo 1985 - 2011
3.5 – 3.9	1985
4.0 – 4.4	1985
4.5 – 4.9	1985
5.0 – 5.4	1985
5.5 – 5.9	1985
6.0 – 6.4	1985
6.5 – 6.9	1985
7.0 – 7.4	1985
7.5 – 7.9	1985
8.0 - ...	1985





## 6.4 Expel

Para el cálculo de los parámetros de sismicidad según el planteamiento descrito, se ha utilizado la aplicación EXPEL. Dicha aplicación fue desarrollada en la ETSITGC de la UPM, en el marco del proyecto EXPEL, financiado por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (ENRESA). El objeto de EXPEL es precisamente agilizar los cálculos de peligrosidad sísmica en la línea metodológica PSHA (en inglés, Probabilistic Seismic Hazard Assessment), cuya implementación puede requerir realizar multitud de estimaciones, correspondientes a las diferentes ramas del árbol lógico y a los diferentes parámetros de cálculo. Expel facilita las diversas tareas de cálculo conectando con bases de datos de zonificaciones y atenuaciones y preparando los ficheros para la ejecución secuencial de diferentes programas. Dichas tareas incluyen la explotación del catálogo de proyecto para obtener los epicentros incluidos en cada zona de cada zonificación, el cálculo de los parámetros de sismicidad de cada zona, la aplicación de los modelos de movimiento fuerte elegidos, la adaptación de todos los datos a los formatos de entrada de los programas de cálculo de la peligrosidad sísmica, la ejecución secuencial y ordenada de dichos programas considerando diversas opciones de zonificaciones y modelos del movimiento, la implementación del formalismo del árbol lógico y la representación de los resultados de ramas individuales y del árbol completo y finalmente, la desagregación de la peligrosidad sísmica por distancia, magnitud,  $\epsilon$  o combinaciones de más de una de estas variables (figura 29).

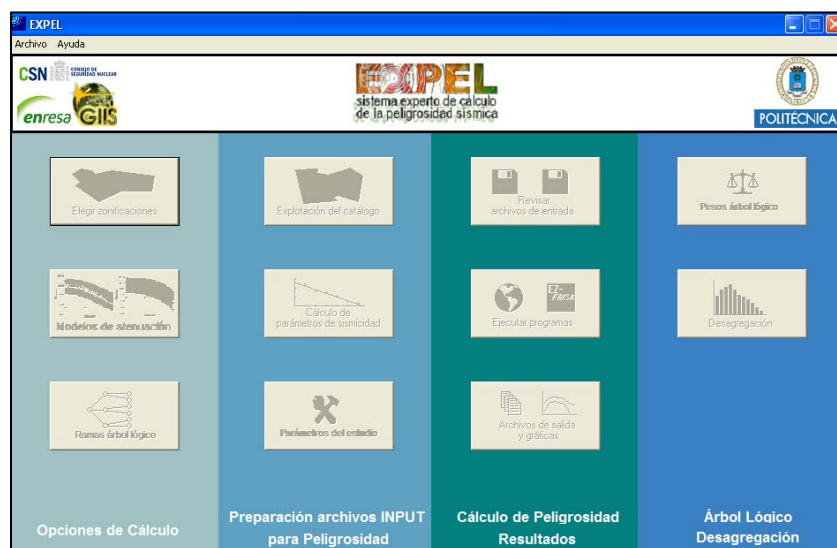


Figura 29.- Ventana de inicio de Expel.



Como se ha visto, Expel es muy extenso y tiene múltiples posibilidades de cálculo. Para el presente proyecto se emplearán solo las funciones necesarias para el cálculo de los parámetros sísmicos: alfa, beta y magnitud máxima, los cuales se exportan a ficheros de texto plano. Aunque también se calcula el parámetro de sismicidad Tasa, no permite su exportación, por lo que se calculará mediante una hoja de cálculo Excel con los parámetros exportados de Expel y los datos de completitud.

Los datos de entrada para poder realizar los cálculos son: por un lado la base de datos del catálogo y la base de datos de zonificaciones, que en este proyecto corresponde con las bases de datos de las mallas espaciales calculadas, tanto la base, como las desplazadas. Se pueden considerar también datos de entrada los ficheros de completitud, ya que según el cálculo correspondiente habrán de ser cambiados. A continuación se muestra una imagen (figura 30) del cálculo de la malla base de  $0,5^\circ$  de lado para América Central superficial (CAM05X00Y00):

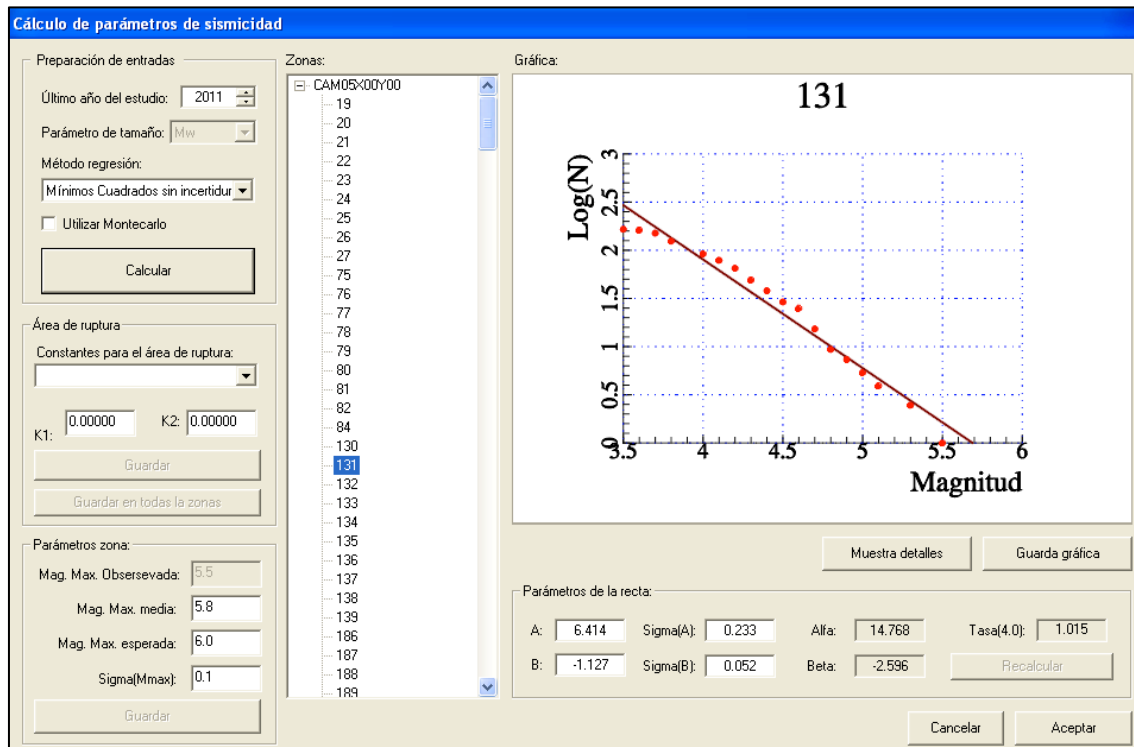


Figura 30.- Ventana de cálculo de parámetro de sismicidad de EXPHEL.



Como se puede observar en la figura 30, antes del cálculo se debe ajustar el año final del estudio, en el caso de la Península Ibérica es 2013 y para América Central es 2011. El método de regresión empleado en el cálculo fue “Mínimos cuadrados sin incertidumbre”. Los ficheros de salida que se generan tras el cálculo son con formato “txt”, ficheros de texto plano, hay de dos tipos, los nombrados con el nombre de la zonificación (malla para este proyecto) seguidos del nombre de la zona y el fichero denominado “resumen”. El primero almacena todos los datos del cálculo de la zona en cuestión (figura 31) y el segundo es un listado de las zonas de la malla que se calculó con los datos de alfa, beta y magnitud máxima correspondiente (figura 32).

Magnitudes:	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	4.0	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	
Número de sismos:	1	4	9	11	0	6	6	7	5	4	2	5	3	1	1	1	0	1	0	1	1	
Año referencial:	1984	1984	1984	1984	1984	1976	1976	1976	1976	1971	1971	1971	1971	1971	1957	1957	1957	1957	1957	1932	1932	
Tasa anual:	0.037	0.148	0.333	0.407	0.000	0.171	0.200	0.143	0.114	0.050	0.125	0.075	0.025	0.025	0.019	0.019	0.000	0.019	0.000	0.013	0.013	
Tasa anual acumulada:	2.094	2.037	1.909	1.576	1.168	1.168	0.997	0.825	0.625	0.482	0.368	0.318	0.193	0.118	0.093	0.068	0.050	0.031	0.031	0.013	0.013	
Número teórico de sismos (N):	165	103	151	124	92	92	70	65	49	38	29	25	15	9	7	5	4	2	2	1	1	
Número de años del estudio:	79 (2011 - 1932)																					
datos del ajuste:																						
Magnitud:	3.5	3.6	3.7	3.8	4.0	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0	5.1	5.3	5.5				
Log(N):	2.219	2.211	2.178	2.095	1.965	1.896	1.814	1.694	1.581	1.464	1.400	1.184	0.970	0.867	0.731	0.594	0.391	0.000				
Log(N)= A + B * M											Ln(N)=Alfa + Beta * M											
A = 0.424											Alfa = 14.768											
B = -1.127											Beta = -2.596											
Sigma(A) = 0.233											Sigma(Alfa) = 0.337											
Sigma(B) = 0.052											Sigma(Beta) = 0.120											

Figura 31.- Ejemplo de fichero con el cálculo realizado mediante Expel de la celda 131 de CAM05X00Y00.

NombreZona	Alfa	Beta	Mag. Max.	Observada
1				
2				
3	Zonificación: CAM05X00Y00			
4	19	6,43247	-1,09025	5,9
5	20	12,7025	-1,90854	6,9
6	21	12,9224	-2,22233	5,6
7	22	11,8814	-2,40503	4,9
8	23	9,43	-1,77332	6,2
9	24	8,92043	-1,36892	6,3
10	25	7,92446	-1,5183	5,2
11	26	13,201	-2,67413	4,6
12	27	15,2517	-3,46632	4,4
13	75	9,65801	-1,80707	4,9
14	76	15,1114	-2,13328	7,5
15	77	13,5852	-1,98842	6,8
16	78	11,0592	-1,66205	6,6
17	79	8,86035	-1,50294	5,9
18	80	8,34191	-1,53099	5
19	81	9,36362	-1,63744	5,5
20	82	6,59667	-1,1189	5,9
21	84	7,62086	-1,51831	5
22	130	17,5782	-3,66212	4,8
23	131	14,7683	-2,59596	5,5
24	132	16,114	-2,56216	6,1
25	133	11,9175	-1,94315	6,4
26	134	10,8856	-1,60491	6,5
27	135	10,4945	-1,50906	7,3
28	136	13,3244	-2,2127	6
29	137	8,67845	-1,39525	5,8
30	138	8,70003	-1,46941	5,8
31	139	12,6351	-2,54086	4,7
32	186	10,3176	-1,9534	5,2
33	187	14,0124	-2,43799	5,1
34	188	13,9219	-2,13787	6,4
35	189	12,2157	-1,97747	6,4
36	190	12,9385	-2,04532	6,3
37	191	12,9448	-2,33987	6,2
38	192	12,3255	-1,92786	6,5
39	193	10,1096	-2,02318	4,9
40	194	11,1688	-2,04764	5,5

Figura 32.- Ejemplo fichero resumen de la malla CAM05X00Y00 realizado con Expel.



“Análisis espaciotemporal de la sismicidad en la Península Ibérica y América Central: Aplicaciones de la peligrosidad sísmica.”



Métodos.

Debido a que Expel no exporta la tasa calculada hubo que calcularla a posteriori mediante hojas de cálculo de Excel, una por cada malla (figura 33). Se aplica la fórmula vista en el apartado “4.2 Modelo de recurrencia”, para la tasa y junto con los datos obtenidos en EXPEL de alfa, beta y magnitud máxima, y los datos de completitud, se procede a su cálculo. Cabe destacar que en el cálculo de la tasa se fija una magnitud de 4.0, es decir, aunque los sismos inferiores a ese tamaño se usen para realizar el ajuste, luego se ignoran a la hora de calcular la tasa.

$$Tasa_{4.0} = (10^{a+\beta \cdot 4})/PC$$

siendo PC el periodo de completitud (año final de estudio menos año de completitud fijado por la magnitud máxima de la celda)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
id Centroide	id Zona		id Centroide	id Zona	Alfa	Beta	Mag Max Obs	Tasa	Xcalc	Ycalc	Año Ref Tasa		id Centroide	id Zona	Xcalc	Ycalc
50000000	0		50000019	19	6.43247	-1.09025	5.9	0.1004618	-92.25	13.25	1932		50000000	0	-92.25	3.75
50000001	1		50000020	20	12.7025	-1.90854	6.9	0.5974072	-92.25	13.75	1745		50000001	1	-92.25	4.25
50000002	2		50000021	21	12.9224	-2.22233	5.6	0.7143603	-92.25	14.25	1932		50000002	2	-92.25	4.75
50000003	3		50000022	22	11.8814	-2.40503	4.9	0.2388841	-92.25	14.75	1971		50000003	3	-92.25	5.25
50000004	4		50000023	23	9.43	-1.77332	6.2	0.0708715	-92.25	15.25	1865		50000004	4	-92.25	5.75
50000005	5		50000024	24	8.92043	-1.36892	6.3	0.2146264	-92.25	15.75	1865		50000005	5	-92.25	6.25
50000006	6		50000025	25	7.92446	-1.5183	5.2	0.1173229	-92.25	16.25	1957		50000006	6	-92.25	6.75
50000007	7		50000026	26	13.201	-2.07413	4.6	0.1374631	-92.25	16.75	1971		50000007	7	-92.25	7.25
50000008	8		50000027	27	15.2517	-3.46632	4.4	0.1143001	-92.25	17.25	1976		50000008	8	-92.25	7.75
50000009	9		50000028	28	9.65801	-1.80707	4.9	0.2838854	-91.75	13.25	1971		50000009	9	-92.25	8.25
50000010	10		50000029	29	15.1114	-2.13328	7.5	1.4709633	-91.75	13.75	1522		50000010	10	-92.25	8.75
50000011	11		50000077	77	13.5852	-1.98842	6.8	1.0491955	-91.75	14.25	1745		50000011	11	-92.25	9.25
50000012	12		50000078	78	11.0592	-1.66205	6.6	0.3095931	-91.75	14.75	1745		50000012	12	-92.25	9.75
50000013	13		50000079	79	8.86035	-1.50294	5.9	0.2185243	-91.75	15.25	1932		50000013	13	-92.25	10.25
50000014	14		50000080	80	8.34191	-1.53099	5	0.1701569	-91.75	15.75	1957		50000014	14	-92.25	10.75
50000015	15		50000081	81	9.36362	-1.63744	5.5	0.2110653	-91.75	16.25	1932		50000015	15	-92.25	11.25
50000016	16		50000082	82	6.59667	-1.1189	5.9	0.1052703	-91.75	16.75	1932		50000016	16	-92.25	11.75
50000017	17		50000084	84	7.60086	-1.51841	5	0.087042	-91.75	17.25	1957		50000017	17	-92.25	12.25
50000018	18		50000110	110	17.5782	-3.66212	4.8	0.4680597	-91.25	12.75	1971		50000018	18	-92.25	12.75
50000019	19		50000131	131	14.7883	-2.95996	5.5	1.0151234	-91.25	13.25	1932		50000019	19	-92.25	13.25
50000020	20		50000132	132	16.114	-2.56216	6.1	2.4151204	-91.25	13.75	1865		50000020	20	-92.25	13.75
50000021	21		50000133	133	11.9175	-1.94315	6.4	0.4322692	-91.25	14.25	1865		50000021	21	-92.25	14.25
50000022	22		50000134	134	10.8856	-1.60491	6.5	0.3270846	-91.25	14.75	1745		50000022	22	-92.25	14.75
50000023	23		50000135	135	10.4945	-1.50906	7.3	0.3094522	-91.25	15.25	1732		50000023	23	-92.25	15.25
50000024	24		50000136	136	13.3244	-2.2127	6	0.6004916	-91.25	15.75	1865		50000024	24	-92.25	15.75
50000025	25		50000137	137	8.67845	-1.39525	5.8	0.2802711	-91.25	16.25	1932		50000025	25	-92.25	16.25
50000026	26		50000138	138	8.70003	-1.46941	5.8	0.2126734	-91.25	16.75	1932		50000026	26	-92.25	16.75
50000027	27		50000139	139	12.6351	-2.54086	4.7	0.2960522	-91.25	17.25	1971		50000027	27	-92.25	17.25
50000028	28		50000186	186	10.3176	-1.2534	5.2	0.226506	-90.75	12.75	1957		50000028	28	-92.25	17.75
50000029	29		50000187	187	14.0124	-2.43799	5.1	1.1118731	-90.75	13.25	1957		50000029	29	-92.25	18.25
50000030	30		50000188	188	13.9219	-2.13787	6.4	1.4722817	-90.75	13.75	1865		50000030	30	-92.25	18.75
50000031	31		50000189	189	12.2157	-1.97747	6.4	0.5077396	-90.75	14.25	1865		50000031	31	-92.25	19.25
50000032	32		50000190	190	12.9385	-2.04532	6.3	0.7974097	-90.75	14.75	1865		50000032	32	-92.25	19.75
50000056	56		50000191	191	12.9448	-2.3987	6.2	0.1952242	-90.75	15.25	1865		50000056	56	-91.75	3.75
50000057	57		50000192	192	12.3255	-1.92786	6.5	0.3792968	-90.75	15.75	1745		50000057	57	-91.75	4.25
50000058	58		50000193	193	10.1096	-2.02318	4.9	0.1878711	-90.75	16.25	1971		50000058	58	-91.75	4.75

Figura 33.- Ejemplo de hoja de cálculo de Excel con el cálculo de tasa.



Una vez que se tiene calculada a la tasa se crean las bases de datos de centroides, mediante una combinación de tablas en las hojas de cálculo de Excel y exportando los datos a Access, se obtienen las tablas de centroides formadas por los campos siguientes:

- Id\_Centroide: Almacena el identificador único del centroide, equivale al número de zona y malla a la que pertenece tal como se explicó anteriormente.
- Id\_zona: Almacena la celda a la que pertenece la tupla.
- Alfa: Almacena el dato de alfa calculado mediante expel.
- Beta: Almacena el dato de beta calculado mediante expel.
- MMax: Almacena el dato de magnitud máxima calculado mediante expel.
- Tasa: Almacena el dato de la tasa calculado mediante excel.
- X\_Calc: Almacena la latitud del centroide.
- Y\_Calc: Almacena la longitud del centroide.
- Año\_comp: Almacena el año de completitud de la celda a la que referencia el centroide.

Se tendrá una base de datos de centroides por cada una de las mallas obtenidas y ventana temporal calculada (figura 34). Es decir, para la Península Ibérica se tienen 6 bases de datos de centroides: las tres correspondiente a la ventana temporal de 2002 a 2013 junto con cada malla de diferente tamaño, y una para cada una de las otras ventanas temporales con tan solo la malla de 0.5°. Para América Central se tienen también 6, 3 por cada ventana temporal, ya que son dos ventana temporales y tres zonas de cálculo (superficial, subducción intermedia, subducción profunda). Una vez que se tienen todas las bases de datos de centroides se pasa a su representación con Arcgis 10.1 para el estudio y análisis de los datos obtenidos.

Id_Centroide	Id_zona	alfa	Beta	MMax	Tasa	X_Calc	Y_Calc	Año_comp
500000015	19	6,43247	-1,09025	5,9	0,100461787017784	-92,25	13,25	1932
500000020	20	12,7025	-1,90854	6,9	0,597407207327046	-92,25	13,75	1745
500000021	21	12,9224	-2,22233	5,6	0,714360278287433	-92,25	14,25	1932
500000022	22	11,8814	-2,40503	4,9	0,239884084367877	-92,25	14,75	1971
500000023	23	9,43	-1,77332	6,2	7,08715197845828E-02	-92,25	15,25	1865
500000024	24	8,92043	-1,36892	6,3	0,214626360309614	-92,25	15,75	1865
500000025	25	7,92446	-1,5183	5,2	0,117922924921223	-92,25	16,25	1957
500000026	26	13,201	-2,87413	4,6	0,137463142258075	-92,25	16,75	1971
500000027	27	15,2517	-3,46632	4,4	0,114300073916915	-92,25	17,25	1976
500000075	75	9,65801	-1,80707	4,9	0,283895389895847	-91,75	13,25	1971

Figura 34.- Base de datos Access de centroides para la malla de 0.5° Superficial periodo 1522 a 2011.



# *Resultados.*



## 7. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en el proyecto se muestran en las siguientes figuras. Estas muestran los mapas de beta, magnitud máxima y tasa de ambos territorios, según la ventana temporal correspondiente y el tamaño de celda de la malla espacial de cálculo.

Para la representación de los parámetros de peligrosidad sísmica citados se decide emplear diferentes gamas de colores para cada uno de ellos, teniendo en cuenta a su vez la cantidad de intervalos que los componen. De esta manera se consigue diferenciar rápidamente cual es el parámetro representado y ayuda a la comprensión de los mapas. Los patrones de color siguen estas pautas:

- Parámetro Beta: De marrón en valores altos a amarillo en valores bajos.
- Parámetro Magnitud Máxima: De granate en valores altos, pasando por naranjas en los centrales y amarillo en los más bajos.
- Parámetro Tasa: De rojo en valores altos a amarillo en valores bajos para la Península Ibérica y de granate en altos a amarillo en bajos para América Central.

La cantidad de intervalos se define según el tipo de parámetro a representar, ya que cada uno tiene unas características propias y cubren valores diferentes. Cabe destacar la representación del parámetro Beta, el cual está formado por cinco intervalos tanto en la Península Ibérica como en América Central. Se parte teniendo en cuenta que los valores habituales de beta están en torno al valor 2.3 (que corresponde a un valor de  $b$  igual a la unidad). Se decide dividir el intervalo [4.14, 1.38] (correspondiente a los valores de  $b$  [1.8, 0.6]) en tres partes iguales para tener más definición en esa franja, así como también se decide incluir un intervalo por encima y otro por debajo para representar los valores extremos cuyos límites serán el valor de beta máximo y mínimo del periodo en cuestión.



## **7.1. Península Ibérica.**

### **7.1.1. Geometría de malla.**

Para América Central se decidió hacer el estudio tan solo con dos mallas, la de  $0,5^\circ$  y la de  $0,2^\circ$ . Ya que tras el primer cálculo, como se ha visto anteriormente para la Península Ibérica, la malla de un grado ( $1^\circ$ ) no iba a ser favorable dada la cantidad de datos que existen en América Central.

La malla de  $0,5^\circ$  de lado está formada por 1.155 celdas, mientras que la malla de  $0,2^\circ$  tiene un total de 7.479 celdas.

En este apartado se analiza el tamaño de celda de la malla de cálculo adecuado para determinar los valores de sismicidad optimizando el tiempo de cálculo y minimizando tanto la pérdida de información como la obtención de resultados irrelevantes o exageradamente extrapolados. La malla de cálculo está compuesta por celdas cuadradas (en grados centesimales). Para el centro de cada celda, se calcula los parámetros de sismicidad a partir de los terremotos contenidos en la celda. Por tanto, a mayor tamaño de celda, mayor es el número de terremotos empleado en los cálculos de los parámetros de sismicidad. Como se vio en apartados anteriores, se parte de tres tamaños de lado, un grado ( $1^\circ$ ), medio grado ( $0,5^\circ$ ) y un quinto de grado ( $0,2^\circ$ ). Para este análisis espacial se ha escogido el parámetro Tasa y los resultados se presentan en la figura 35, en la que se marca con óvalos las zonas con diferencias más significativas.

La malla de  $1^\circ$  presenta la ventaja de que alberga una cantidad relativamente grande de eventos en su interior, lo que a priori mejora el ajuste de regresión que se lleva a cabo para estimar los parámetros de sismicidad. No obstante, también se encuentran varios problemas. Por un lado su cálculo es el más laborioso, ya que para cubrir el territorio hay que hacer más desplazamientos que con el resto, y por tanto, el que más tiempo consume. Y por otro lado, al ser un tamaño de malla bastante grande, el resultado obtenido para un solo punto puede representar la sismicidad de un área muy alejada. Por ejemplo, en una zona sin sismicidad en un radio de 50 km a la redonda, se puede incluir la sismicidad localizada a una distancia





mayor, que no representa la del punto de cálculo. Esto contamina el resultado y genera una extrapolación de resultados ficticia conforme a la realidad, que hay que evitar. Este hecho se observa claramente en la figura 35. Considérese por ejemplo el núcleo de sismicidad en el Océano Atlántico, al noroeste de Galicia. Si se compara el mapa de la malla de un grado con los de 0,5 y 0,2 grados, se constata que dicho núcleo se reduce a unas observaciones locales, que en el mapa de la malla de 0,2° se reduce a dos puntos con resultados. En general, los resultados de la malla de 1° ofrecen mayor continuidad espacial, cubriendo una mayor porción del territorio, pero la calidad y relevancia de esos resultados es poco representativa de la sismicidad real.

Al pasar a la malla de 0,5°, la porción de territorio en la que se obtiene resultados es menor. Esto se aprecia en zonas de sismicidad poco significativa y dispersa, como ocurre al este de Menorca, entre Galicia y Castilla y León, entre Portugal y Extremadura, entre Guadalajara y Cuenca, y la más importante, entre Argelia y Marruecos. Por otro lado se gana en definición, zonas como el norte de África, Azores, Pirineos y sur de España quedan mejor representadas, pudiendo distinguir una variación espacial en los parámetros representados.

La malla de 0,2° es la malla que permite un cálculo más rápido y ofrece los resultados más finos. Sin embargo, se pierde una cantidad de información sísmica importante: toda la zona del sur de Portugal y Azores queda sin casi representación, al igual que Murcia y Granada, Girona y entre Marruecos y Argelia. Otras zonas que no pierden representación quedan muy reducidas.

Se considera el tamaño de lado 0,5° como el más óptimo de los tres analizados, ya que por un lado no se pierde mucha información y a su vez dicha información presenta un grado de detalle y precisión adecuados para el presente estudio. Las zonas con más actividad quedan mejor definidas, véase norte de África, Azores y sur de España, que aparte de mantenerse las zonas principales se puede analizar como varía el parámetro en el entorno próximo.



Resultados.

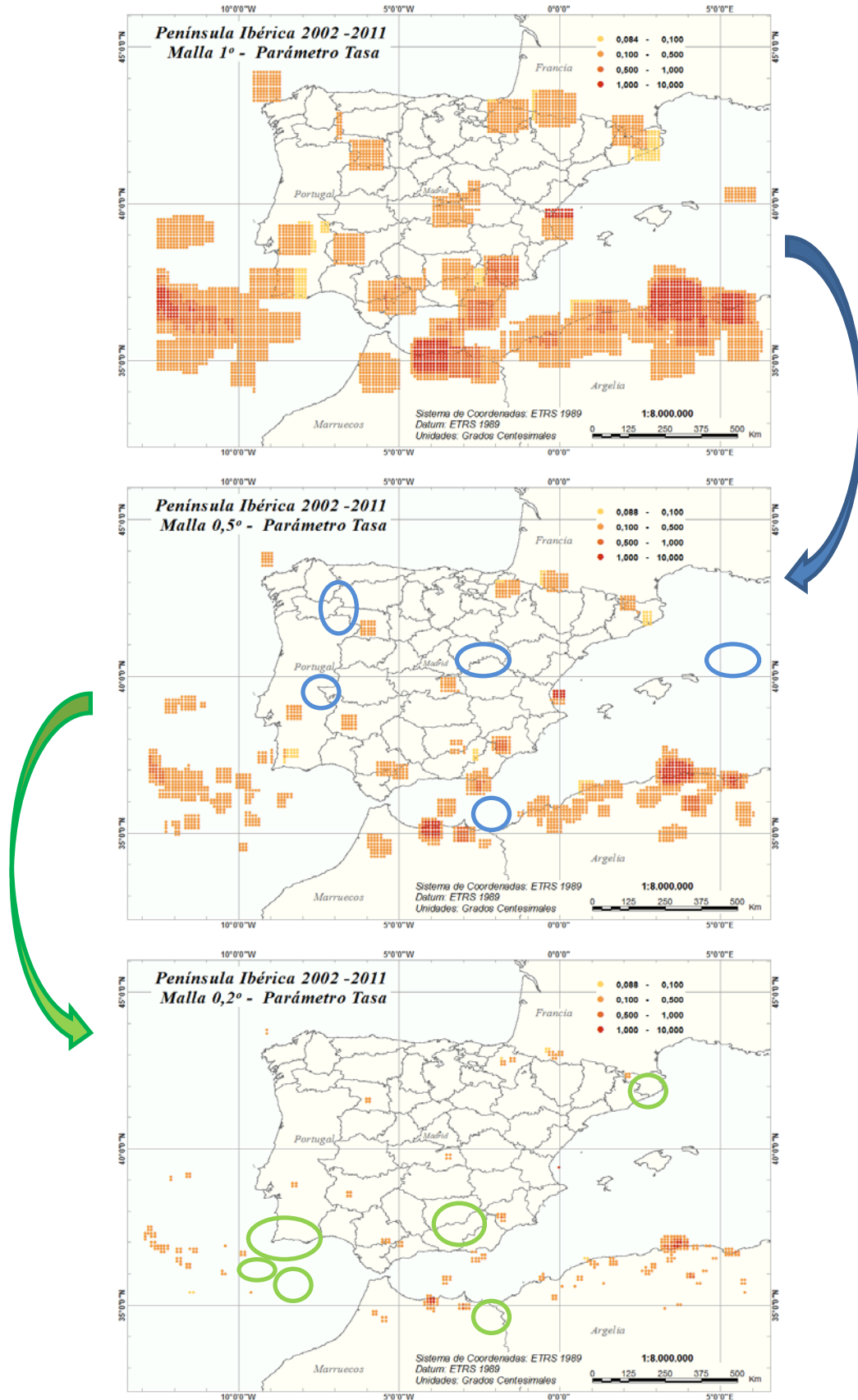


Figura 35.- Comparación geometría de la malla en la Península Ibérica.



### **7.1.2. Periodos.**

En los siguientes apartados se analiza la variable temporal. En concreto, se estudia la variación de la distribución de los parámetros de sismicidad considerando diferentes periodos del catálogo empleado. Como se vio en apartados anteriores para la Península Ibérica, se subdivide el catálogo en cuatro periodos temporales: 2002-2013, 1985-2013, 1962-2013 y 1048-2013. A su vez, para un mejor análisis temporal, se agrupan por el tipo de parámetro y utilizando el tamaño de malla fijado en 0,5° de lado.

#### **7.1.2.1 Beta.**

Si atendemos a la variación de los valores máximos (hablando en términos de valor absoluto) se aprecia cómo no se mantienen en el tiempo, siendo el más alto para el periodo más extenso temporalmente, 1048-2013. En cambio, los valores mínimos apenas sufren variación de un periodo temporal a otro.

Desde prácticamente el primer periodo (2002-2013) se puede distinguir ciertos alineamientos principales en los que se obtienen resultados, como la norte de Argelia y Marruecos y el alineamiento de una gran estructura con dirección NO-SE situada en el sureste de la Península Ibérica y que se adentra en el Mar de Alborán. Se distinguen sobre todo a partir del periodo de 1985-2013.

Al retroceder en el tiempo, hay más registros y por lo tanto más zonas cubiertas por resultados. Los valores de beta se van homogeneizando, mostrando valores menos extremos. Se puede apreciar como el mayor cambio se produce cuando se pasa del periodo de 1985-2013 al periodo 1962-2013.

Se puede observar como en el sureste de España valores extremos del intervalo más pequeño (amarillo) desaparecen para el periodo completo de 1048-2013, quedando la representación de este intervalo tan solo en los límites de algunas zonas y en lugares dispersos de poca importancia sísmica.



A partir del periodo de 1985-2013 a 1048-2013 se aprecia como los valores de beta se empiezan a estabilizar y ocupan mayoritariamente los valores típicos del mismo, alrededor de -2,3. A su vez en los límites de las zonas principales de las alineaciones se muestran valores del intervalo más pequeños, que darían una gráfica más horizontal, esto puede deberse a que entran en los cálculos menos seísmos de pequeño tamaño. Los valores más elevados (zonas oscuras) los encontramos en las zonas más activas y rodeados de más registros.



Resultados.

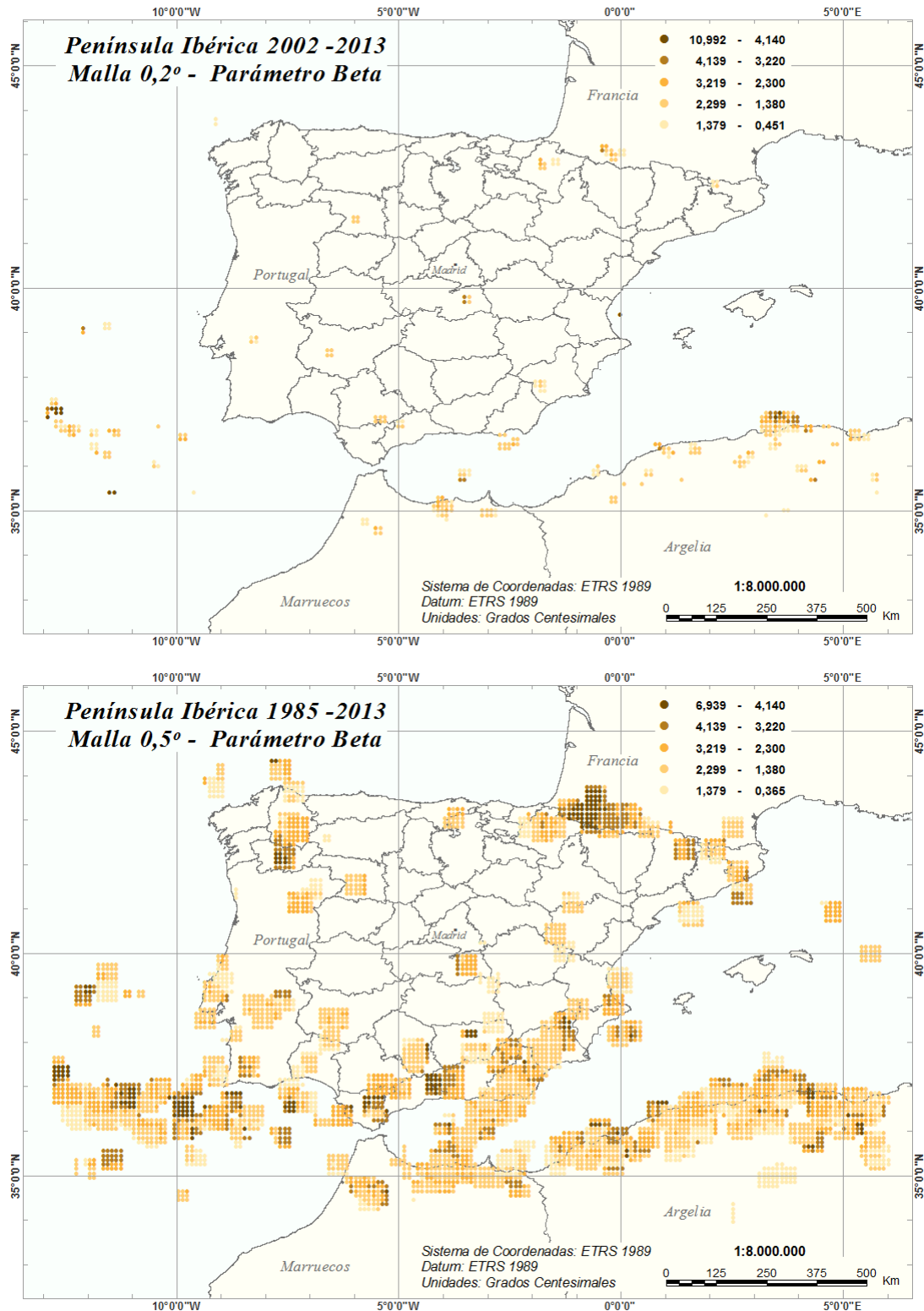


Figura 36.-Península Ibérica, parámetro Beta, periodo 2002-2013 (Arriba) y Península Ibérica, parámetro Beta, periodo 1985-2013 (Abajo).



Resultados.

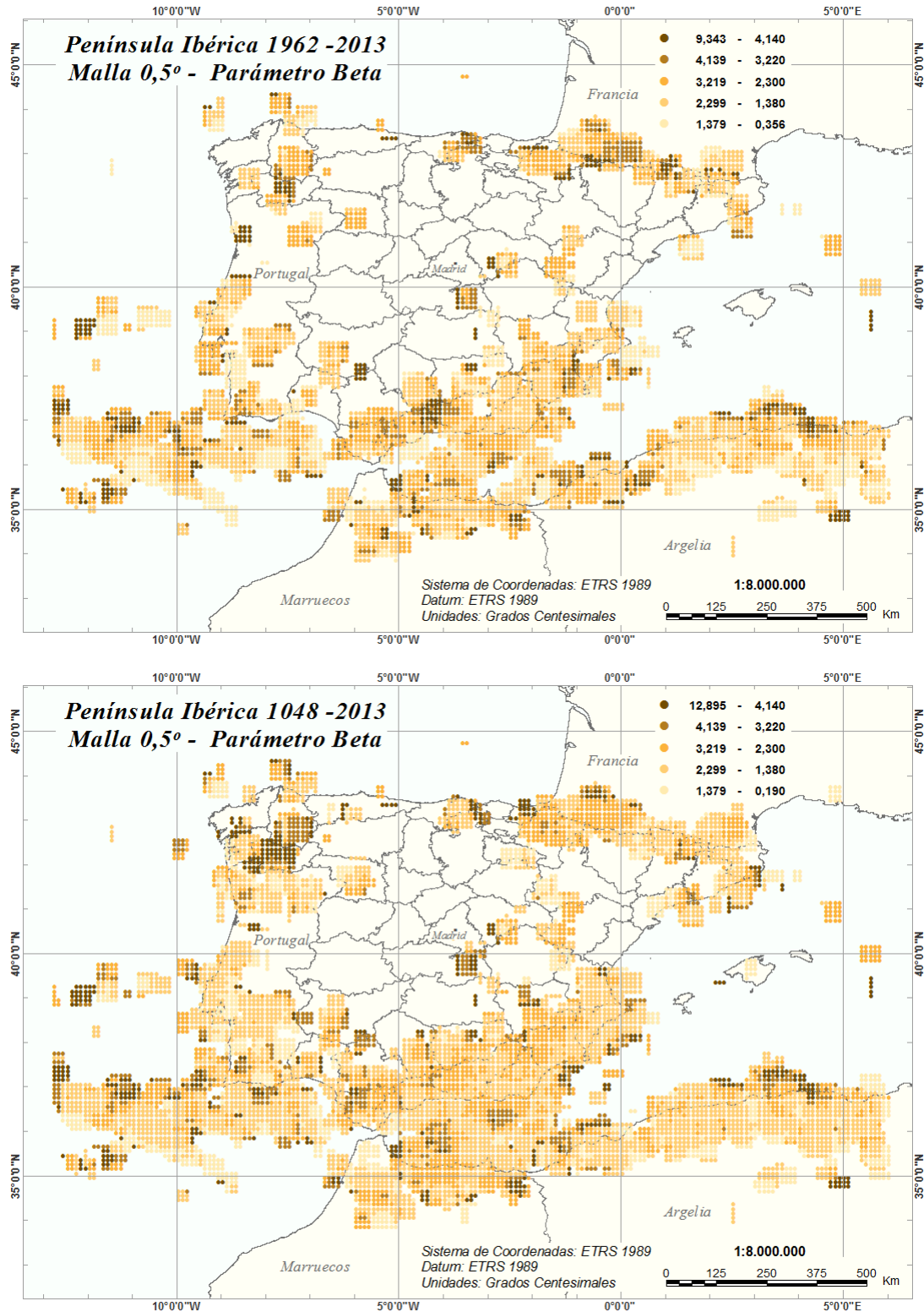


Figura 37.-Península Ibérica, parámetro Beta, periodo 1962-2013 (Arriba) y Península Ibérica, parámetro Beta, periodo 1048-2013 (Abajo).



### **7.1.2.2 Magnitud máxima.**

La Península Ibérica es una zona con una actividad sísmica baja, es por ello que los valores que prevalecen en los cuatro periodos se encuentran en los intervalos más bajos de magnitudes momento.

Se aprecia como cuando en el catálogo entran registros más antiguos, aparecen puntos con mayor valor de magnitud, en especial en las zonas de mayor actividad sísmica. Las variaciones más notables se recogen en las inmediaciones del sur de Portugal, las Azores y norte de África, zonas que en épocas actuales tiene unas magnitudes bajas, pero que antiguamente tuvieron fenómenos de gran tamaño.



Resultados.

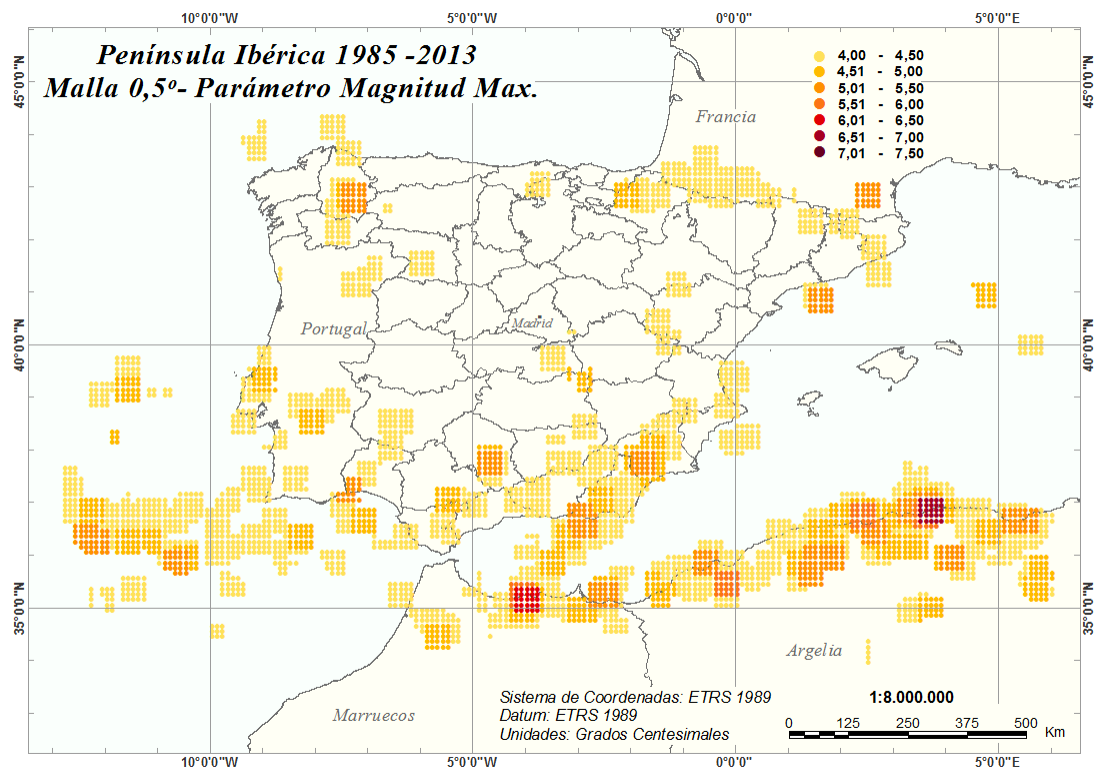
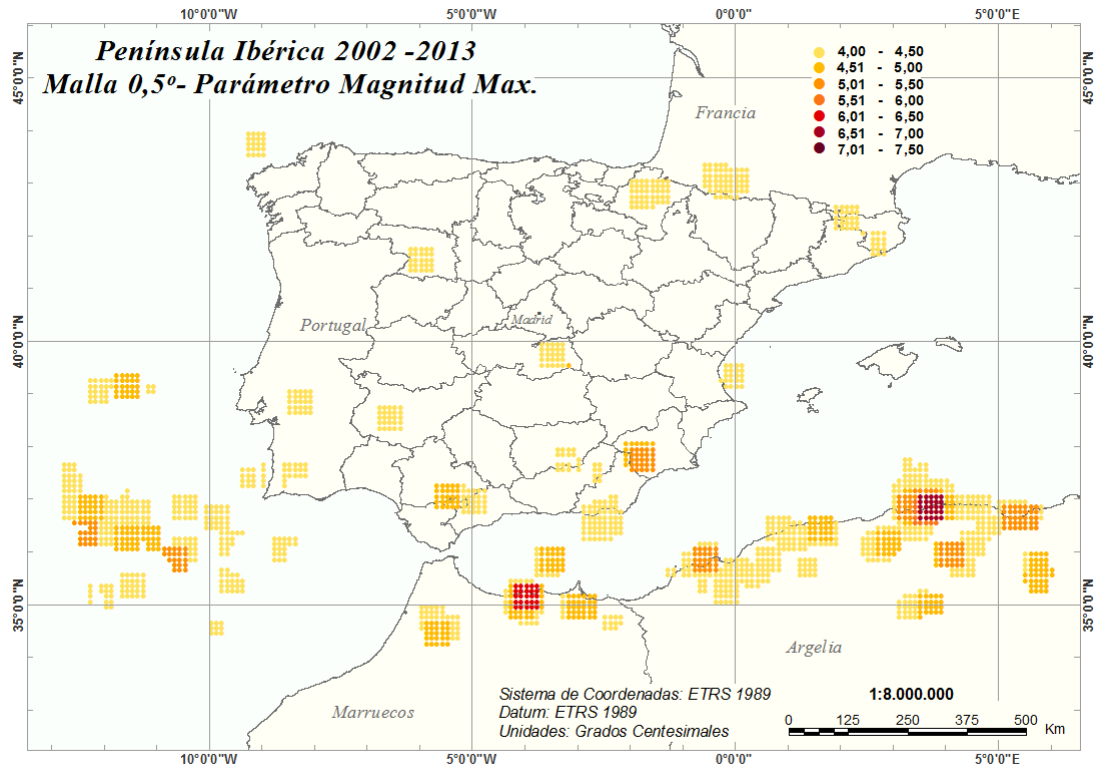


Figura 38.- Península Ibérica, parámetro magnitud máxima, periodo 2002-2013 (Arriba) y Península Ibérica, parámetro magnitud máxima, periodo 1985-2013 (Abajo).





Resultados.

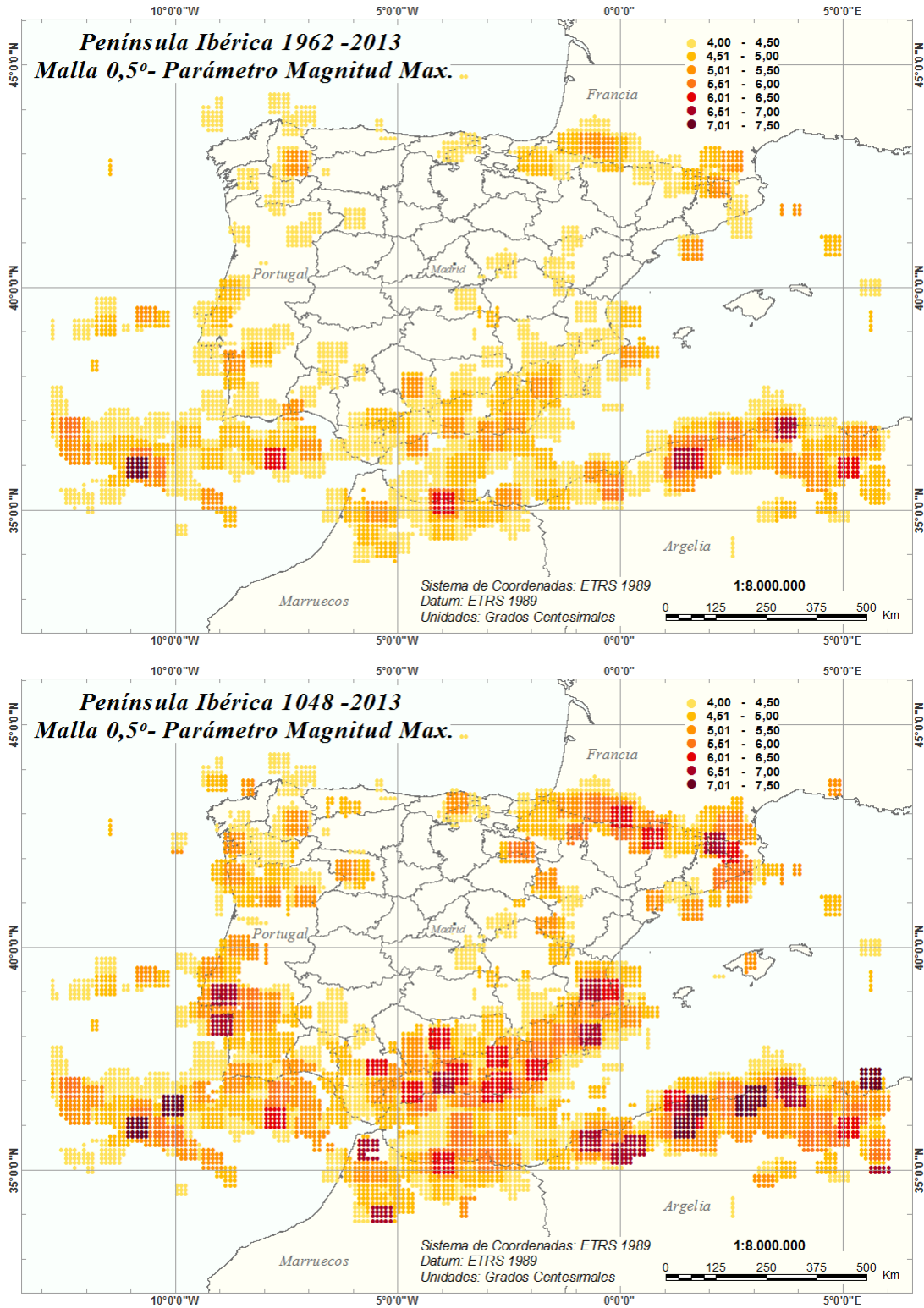


Figura 39.-Península Ibérica, parámetro magnitud máxima, periodo 1962-2013 (Arriba) y Península Ibérica, parámetro magnitud máxima, periodo 1048-2013 (Abajo).



### **7.1.2.3 Tasa.**

En las siguientes figuras se puede observar la variación del parámetro Tasa. Según se extiende el catálogo hacia atrás en el tiempo, la tasa disminuye, de manera general, tanto que para el periodo más amplio, 1048-2013 se debe incluir un intervalo extra para representar datos con valores de tasa muy bajos, prácticamente residuales, pero a su vez se cubre gran parte de la zona de estudio.

En el periodo más moderno (2002-2013) los valores de tasa son los más altos, manifestándose en muy pocas zonas valores bajos. En el siguiente periodo (1985-2013) comienzan a disminuir los valores de tasa, posiblemente por aumentar el periodo de completitud, a partir de este periodo se mantienen los valores de tasa pero apareciendo más cantidad de puntos. Este análisis muestra que si se calculase la tasa atendiendo solo al periodo más moderno, se obtendrían valores por representativos de periodos anteriores, ya que se apreciaría más actividad sísmica que la existente. Si se hubiera depurado el catálogo de réplicas y premonitores, no se detectaría este efecto o bien se observaría pero menos acusado.

Los valores más altos de tasas se manifiestan en las zonas más activas: norte de África, la alineación de la estructura que recorre el sureste de España y en los Pirineos. El mapa del periodo 1048-2013 nos da una visión más amplia de la actividad sísmica de todo el territorio de estudio, ya que quedan muy definidas las zonas sismogénicas con más actividad, y como disminuye dicha actividad en su entorno.



Resultados.

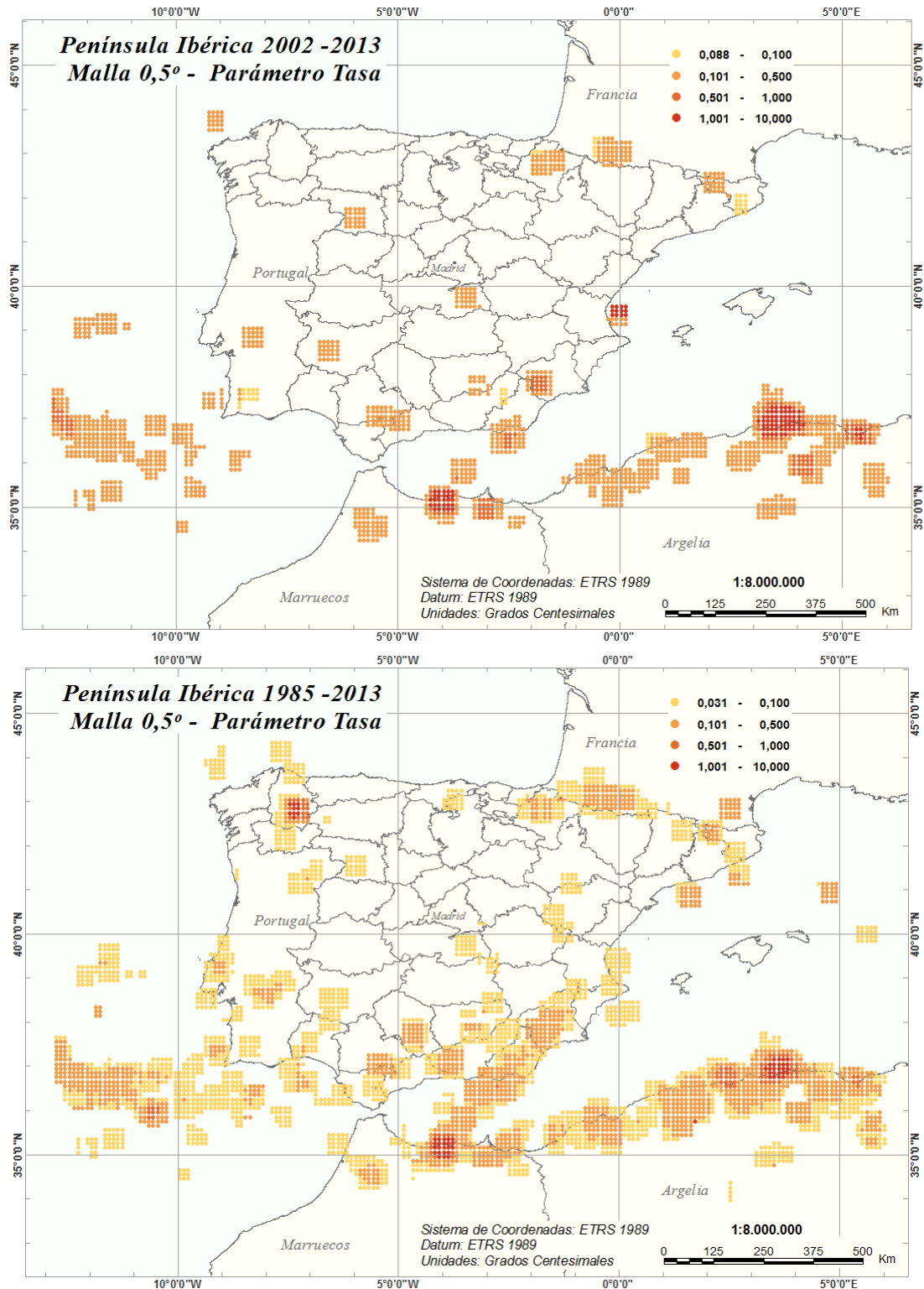


Figura 40.-Península Ibérica, parámetro tasa, periodo 2002-2013 (Arriba) y Península Ibérica, parámetro tasa, periodo 1985-2013 (Abajo).



Resultados.

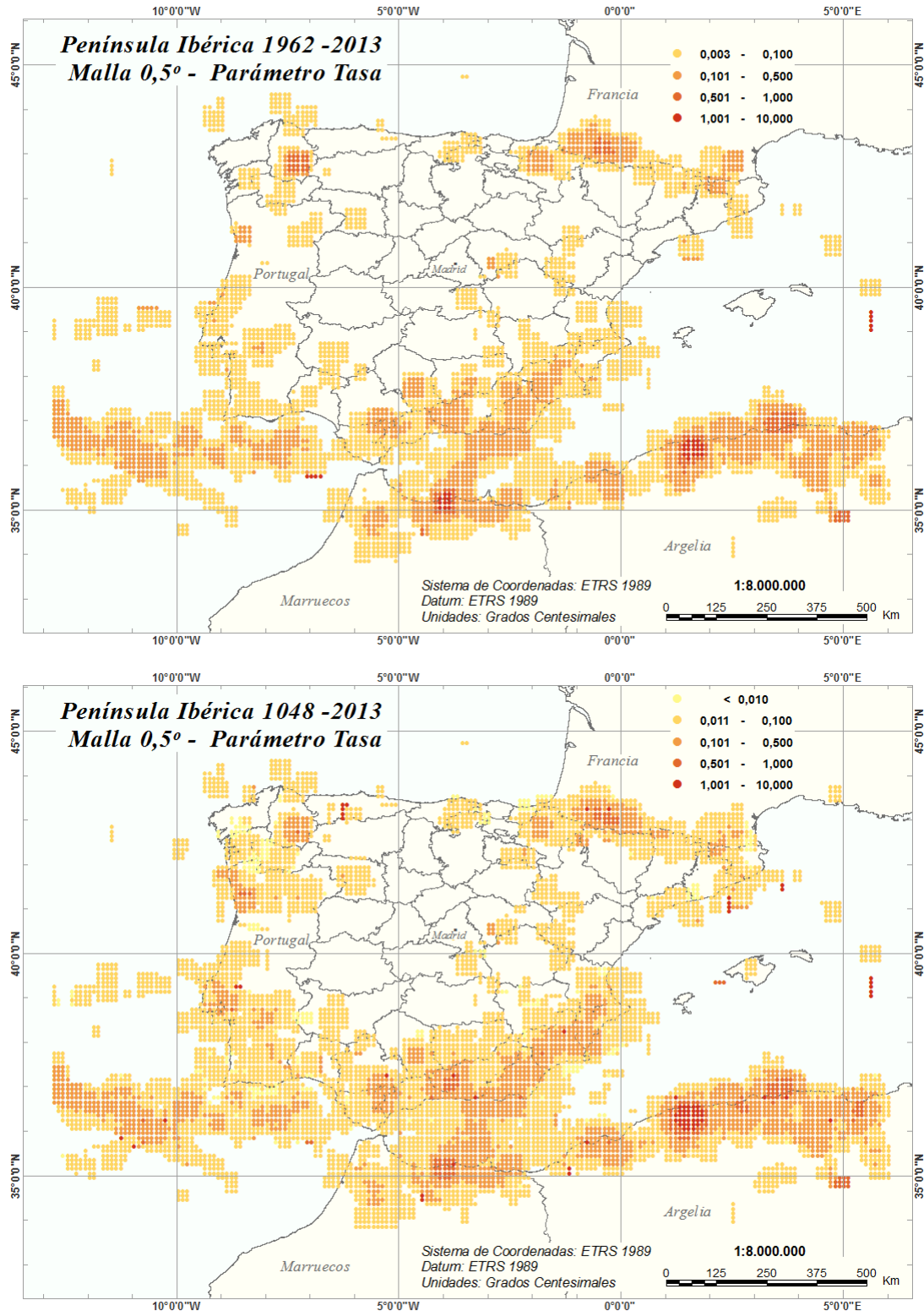


Figura 41.-Península Ibérica, parámetro tasa, periodo 1962-2013 (Arriba) y Península Ibérica, parámetro tasa, periodo 1048-2013 (Abajo).



## **7.2. América Central**

### **7.2.1. Geometría de malla.**

Al igual que se hizo para la Península Ibérica se analiza el tamaño de la malla de cálculo para determinar cuál es el más adecuado para calcular los valores de sismicidad. En este caso se dispone de dos tamaños de celda, medio grado ( $0,5^\circ$ ) y un quinto de grado ( $0,2^\circ$ ). Para este análisis espacial se escogió el parámetro tasa, y los resultados se presentan en las figuras: 42, 43 y 44, sobre las cuales se marcan las zonas con las diferencias más significativas.

El tamaño de un grado ( $1^\circ$ ) queda directamente descartado, debido a que como se pudo comprobar para la Península Ibérica, el resultado obtenido para un solo punto puede representar la sismicidad de un área muy alejada, lo cual contamina el resultado y genera una extrapolación de resultados ficticia conforme a la realidad, que hay que evitar.

Para la malla de  $0,5^\circ$  alberga una cantidad relativamente grande de eventos en su interior, lo que a priori mejora el ajuste de regresión que se lleva a cabo para estimar los parámetros de sismicidad. A pesar de ello, muchas zonas del territorio de estudio quedan sin resultado. Se tiene una definición buena, en la que se pueden apreciar las estructuras tectónicas principales como la fosa mesoamericana, el contacto entre las placas Norteamericana y Caribe, la zona de fractura de Panamá y cinturón deformado del norte de Panamá. En general, los resultados de la malla ofrecen una mayor continuidad espacial, y se cubre una porción del territorio bastante significativa, quedando una representación próxima a la realidad.

Al pasar a la malla de  $0,2^\circ$ , la porción de territorio en la que se obtiene resultados es menor. Esto se aprecia en la capa superficial en la zona de contacto entre las placas de Norteamérica y Caribe, norte de Panamá y en el interior de los países generalmente; en la zona de subducción intermedia se aprecia cómo se pierde representación en las zonas alejadas de la fosa mesoamericana y fractura de Panamá; y en subducción profunda ocurre similar a la



capa intermedia, se pierde en las zonas a alejadas de la subducción y en las inmediaciones de Panamá y Colombia. Por otro lado se gana en definición espacial, quedando zonas como la subducción entre la placa de Cocos y Caribe con mayor detalle, en la capa superficial se puede distinguir con más claridad el alineamiento volcánico que transcurre paralelo a la costa; en la capa de subducción intermedia se aprecia con mayor detalle las zonas más activas fosa mesoamericana, enfrente de El Salvador y Nicaragua, y la sismicidad de la subducción a la altura de Costa Rica es más suave; y en la capa de subducción profunda tan solo se pierde lo que a priori puede ser una sismicidad más residual en vez de sismicidad importante.

Una vez analizados los dos tamaños de celda de las mallas, se consideran los dos como válidos para estudiar el territorio de América Central en la medida en que ambos reflejan con claridad las zonas con más actividad. Por un lado se tiene una representación más fina con la malla de  $0,2^\circ$  y una representación más general con la malla de  $0,5^\circ$ . La malla de  $0,2^\circ$  puede ser empleada en un estudio de peligrosidad local, para analizar zonas reducidas, a escalas urbanas o municipales. La malla de  $0,5^\circ$  estaría más enfocada a estudios de sismicidad o peligrosidad de un país o subcontinente, también sería útil como complemento a la malla de  $0,2^\circ$  pudiendo dar un valor de parámetro de sismicidad aproximado en zonas en las que esta malla no proporcione resultado.

Antes de presentar los resultados, debe hacerse un comentario sobre el valor de la tasa de terremotos obtenido en cada malla. Si calculamos la tasa en un mismo punto utilizando ambas malla espaciales, el número anual de terremotos obtenido al usar la malla de  $0,5^\circ$  será (muy probablemente) mayor que el obtenido empleando la malla de  $0,2^\circ$ , pues en este segundo caso se consideran los terremotos contenidos en un área mucho menor que en para el primer caso. A fin de obtener resultados comparables de tasas mediante el uso de ambas mallas, se decide normalizar ambos valores de tasa a una misma unidad de área,  $0,1^\circ$  por  $0,1^\circ$ . Por tanto, los valores de tasa representados en los mapas de América Central corresponden a número de terremotos por año y por unidad de área.



Resultados.

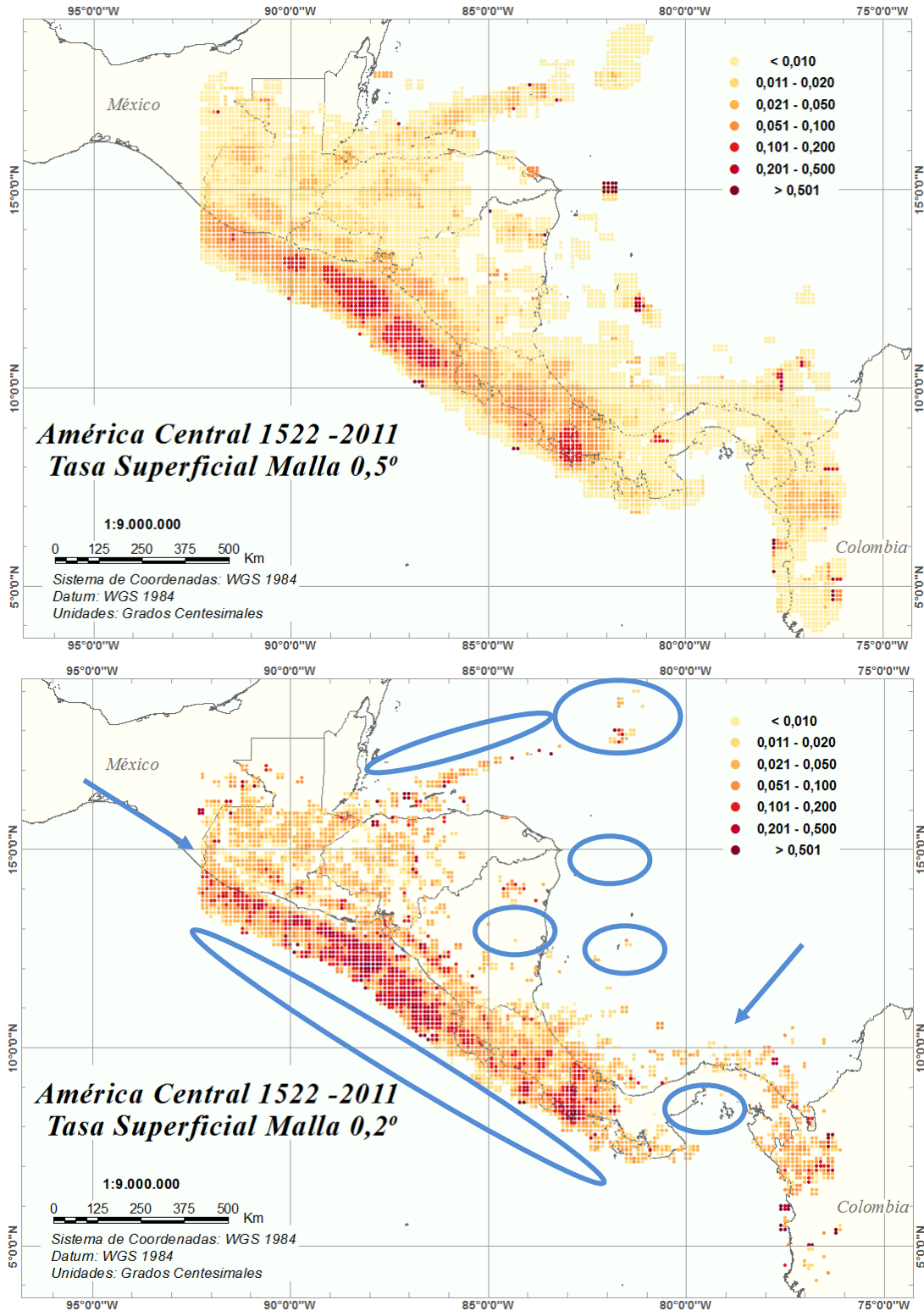


Figura 42.- Comparación geométrica para América Central de malla 0,5° (arriba) con malla 0,2° (abajo) en la capa superficial.



Resultados.

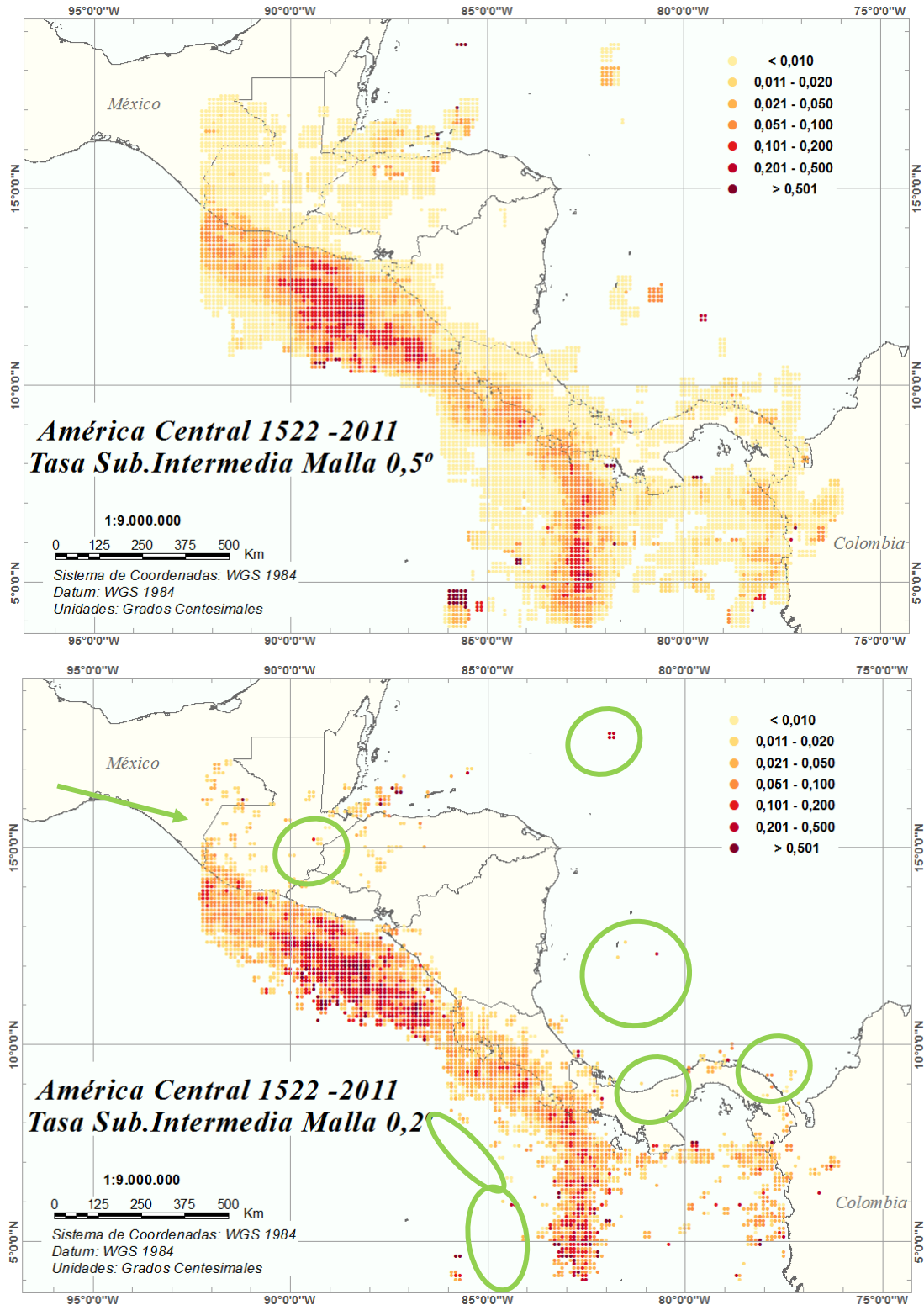


Figura 43.-Comparación geométrica para América Central de malla 0,5° (arriba) con malla 0,2° (abajo) en la capa de subducción intermedia.



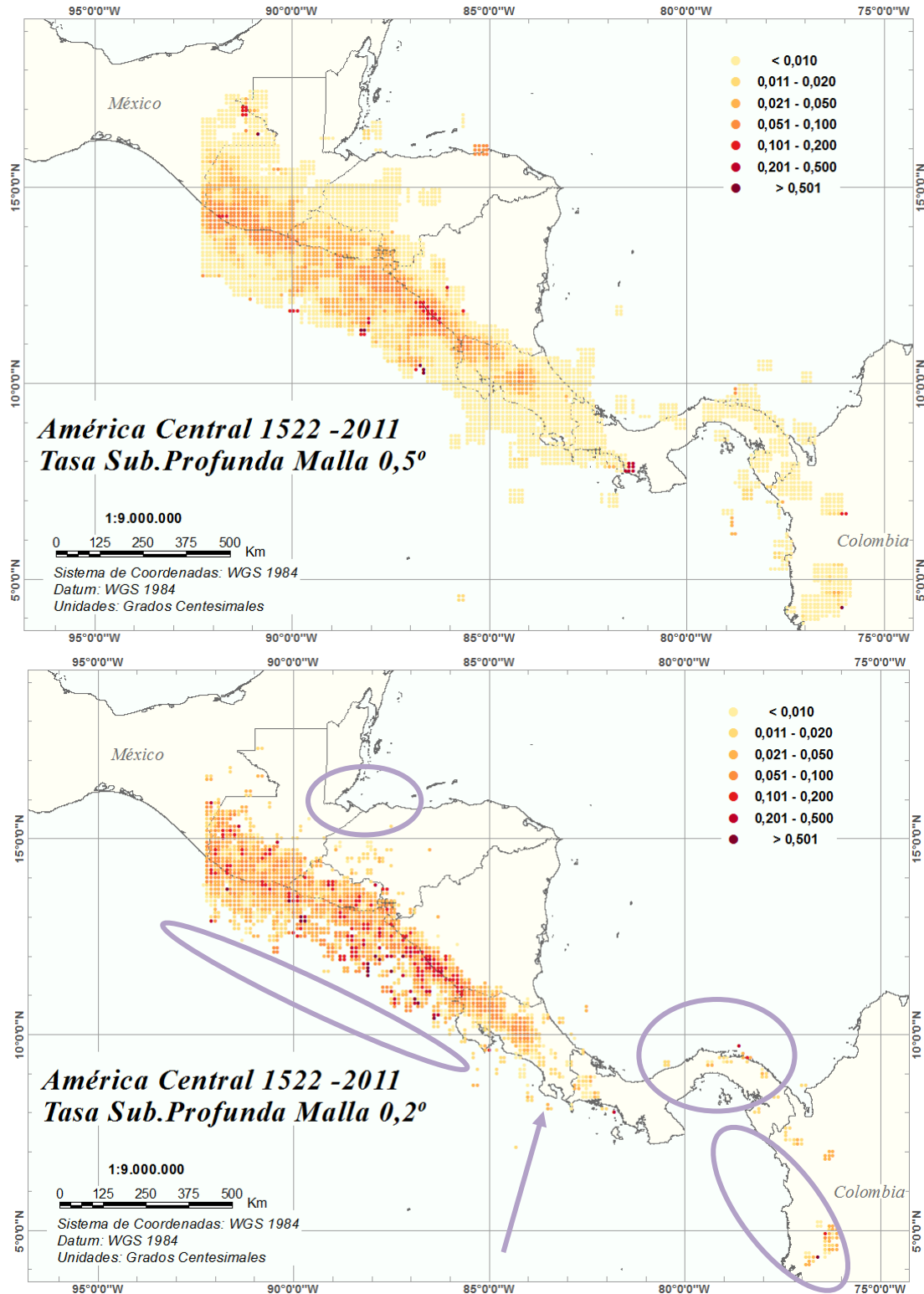


Figura 44.-Comparación geométrica para América Central de malla 0,5° (arriba) con malla 0,2° (abajo) en la capa de subducción profunda.



### **7.2.2. Periodo completo malla 0,5° (1522-2011).**

A continuación se analizará el periodo temporal que abarca el catálogo completo (1522-2011) para la malla de 0,5°, tomando para ello los tres mapas de cada parámetro de sismicidad y haciendo un análisis espacial tanto en coordenadas horizontales, como en profundidad en tres zonas: superficial, subducción intermedia y subducción profunda.

#### **7.2.2.1 Beta**

Atendiendo a los rangos de valores, se puede observar como el límite inferior de variación de beta varía notablemente, siendo el valor más grande (en valor absoluto) el perteneciente al mapa superficial, mientras que en subducción intermedia y subducción profunda apenas cambia. Por el contrario, el límite superior, no sufre prácticamente variación al pasar de una profundidad a otra.

Los valores más frecuentes para los tres cortes en profundidad son los pertenecientes al rango de 2,30 a 1,38; sobre todo en subducción intermedia y subducción profunda. En la capa superficial también se encuentran varias zonas en las cuales el rango predominante es 3,22 a 2,30. De estos dos rangos predominantes los valores más bajos se suelen encontrar al norte de los más altos.

En la capa superficial se obtienen resultados que cubren prácticamente la totalidad de los países de estudio, con valores predominantes del (2,30 a 1,38), el más común de todos. Sin embargo también se aprecia como en la zona de subducción ocurren seísmos de rangos más altos, marcando posiblemente la línea donde comienza la subducción de la placa de Cocos contra las placas de Norteamérica y de Caribe. A su vez se aprecia en el norte otra alineación de seísmos que marca el contacto lateral entra la placa de Norteamérica y de Caribe.



En subducción intermedia se ve como los puntos donde se obtienen resultados ocupan principalmente el mar, precisamente donde se inicia el proceso de subducción de la placa del Coco bajo la placa Caribe. Conforme la línea que marca la subducción se acerca a Panamá se observa como los puntos donde se obtienen resultados se alejan de la línea de costa, y marcan una nueva alineación dirección norte-sur, que corresponde a la zona de fractura de Panamá, todos con el mismo rango de valores (2,30 a 1,38). Al llegar a la zona de Panamá los valores cambian a valores más altos. Ocurren en su mayoría en el mar, sobre la placa de Nazca y de ellos no se pueden extraer muchas conclusiones debido a que no se observa ningún patrón o distribución clara, quizás como producto de la complejidad tectónica de la zona. Por su parte, se sigue apreciando al norte la alineación de puntos que marca el límite entre placa de Norteamérica y la de Caribe.

En subducción profunda tan solo se sigue distinguiendo la zona de subducción pero ocupa una extensión bastante más reducida, y con valores muy parecidos entre ellos. Desaparecen las representaciones de las alineaciones características de la zona de fractura de Panamá y el límite de placas de Norteamérica y Caribe.



Resultados.

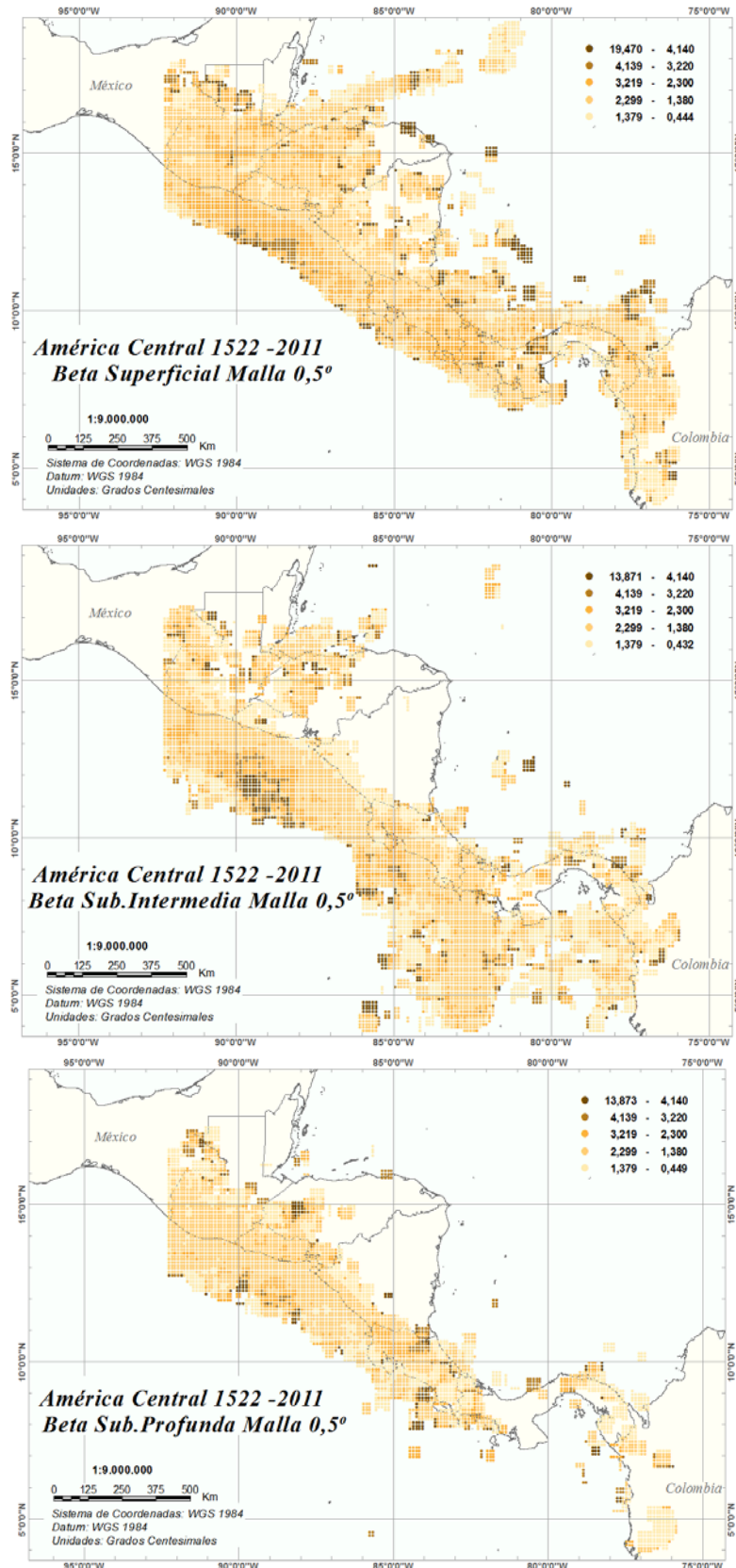


Figura 45.- América Central periodo completo (1522-2011), parámetro beta, malla de 0,5° capa superficial (arriba), capa subducción intermedia (centro) y capa de subducción profunda (abajo).



### **7.2.2.2 Magnitud máxima**

Los valores más altos de magnitud máxima se encuentran sobre todo a lo largo de los bordes de placa, tanto en la línea de costa donde se produce la subducción como en la zona de contacto de las placas de Norteamérica y Caribe. Conforme uno se aleja de estas zonas, las cuales se ven muy definidas, el valor de magnitud máxima disminuye de manera más o menos progresiva. Según se descende en profundidad y se pasa de superficial a subducción intermedia y subducción profunda los seísmos van quedando tan solo en la zona de subducción.

Las zonas, superficial y subducción intermedia, agrupan la mayoría de seísmos. En la primera se aprecia claramente las zonas de límite de placas, y aunque hay terremotos de magnitudes altas también se encuentran repartidos por casi toda la zona terrestre seísmos de menor tamaño. En Panamá nos encontramos una zona con seísmos del rango más alto, lo cual se explicaría por algún terremoto de gran tamaño puntual, ya que rápidamente el resto de valores son más bajos. En la zona de la costa de Colombia también se encuentran valores medios y altos.

En subducción intermedia se empieza a perder representación en la zona de encuentro de placas de Norteamérica y Caribe, pero sigue bien definida la subducción. Precisamente en el encuentro de estas tres placas es donde se registran los valores de magnitud máxima más altos. También se encuentran valores medios-altos en la zona de fractura de Panamá.

En subducción profunda se siguen viendo seísmos de gran tamaño, pero tan solo en la zona de subducción, y alguno de carácter más disperso en Colombia y Panamá. Toda la sismicidad entre las placas de Cocos y Nazca desaparece.



Resultados.

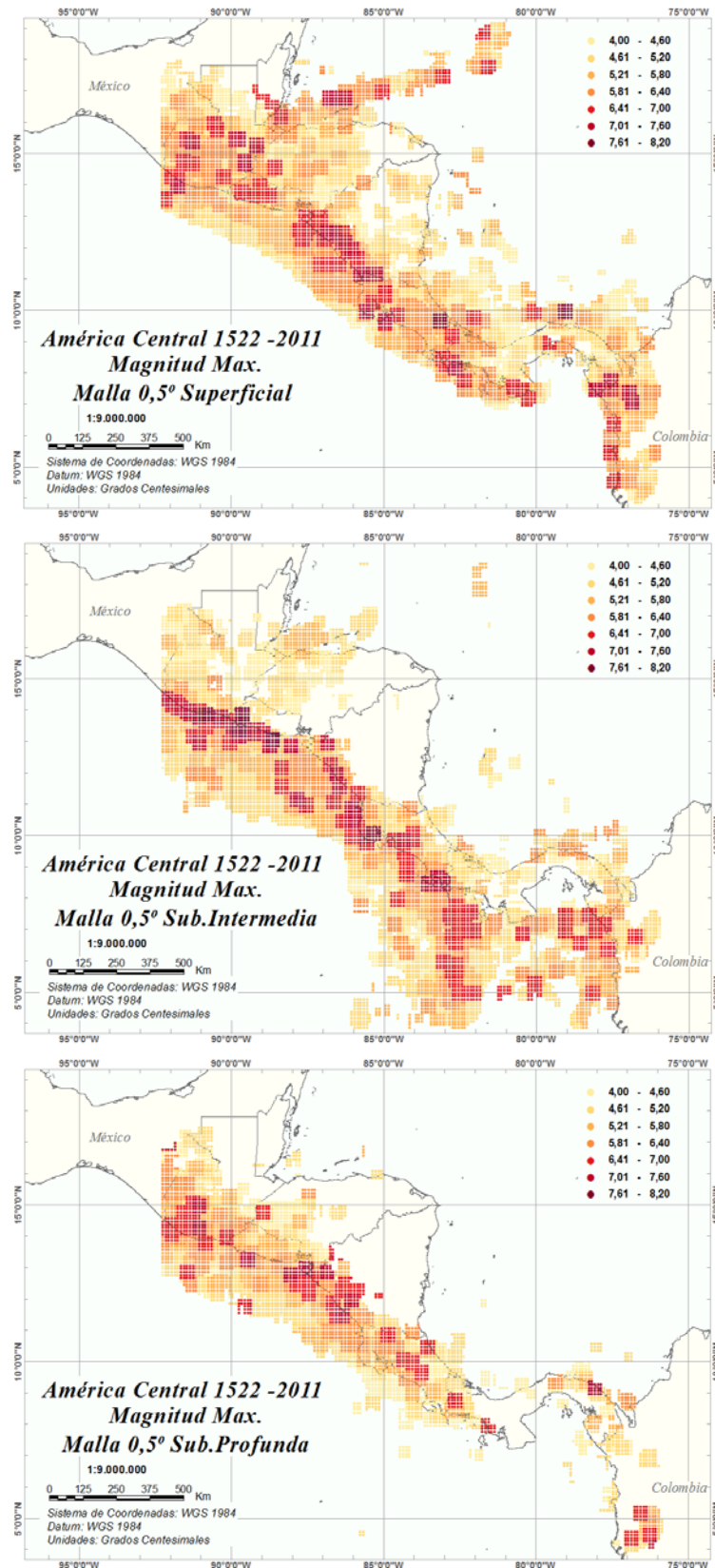


Figura 46.- América Central periodo completo (1522-2011), parámetro magnitud máxima, malla de 0,5° capa superficial (arriba), capa subducción intermedia (centro) y capa de subducción profunda (abajo).



### 7.2.2.3 Tasa

Atendiendo a la distribución de valores observados, se fijaron diferentes intervalos a los empleados en la Península Ibérica debido a la peculiaridad de la zona, ya que si se hubieran usado los mismos se perdería gran parte de la información, en cambio con esta nueva escala, en la que se añaden dos rangos más, se consigue mayor afinamiento en la representación y por lo tanto en el análisis.

Los valores más frecuentes son sobre todo los dos intervalos más bajo, hasta 0,02, el cual cubre casi todo el territorio, tanto terrestre como marino.

En la capa superficial (figura 47 - arriba) se ve como en la zona de subducción se concentran los valores más altos, donde más probabilidad de ocurrencia existe, marcando la alineación de la misma. A su vez, justo al norte de la subducción se encuentra un segundo alineamiento con la misma dirección pero ya en zona terrestre, coincidente a la línea volcánica. También se puede apreciar el límite de las placas de Norteamérica y Caribe, aunque se encuentran valores de tasa en esta estructura, queda bien definida.

En subducción intermedia se distingue la fosa mesoamericana, donde se agrupan los valores altos, al igual que la zona de fractura de Panamá, quedando ambas muy definidas. En subducción intermedia se empieza a perder la representación de la alineación de contacto entre las placas Norteamérica y Caribe. Las zonas de tasa baja parece que tienen un carácter más residual y desaparecen de la zona terrestre para cubrir más zona marítima.

Por último, en subducción profunda, se encuentran valores más moderados, sin perder la zona de subducción en la que se sigue manteniendo una probabilidad alta de ocurrencia, pero mucho más suavizada que en las capas anteriores. Al norte de Honduras y sureste de Panamá aparecen unas zonas de alta probabilidad que se explican porque un registro debe interferir en el cálculo. A su vez desaparece de la representación la zona de fractura de Panamá.



Resultados.

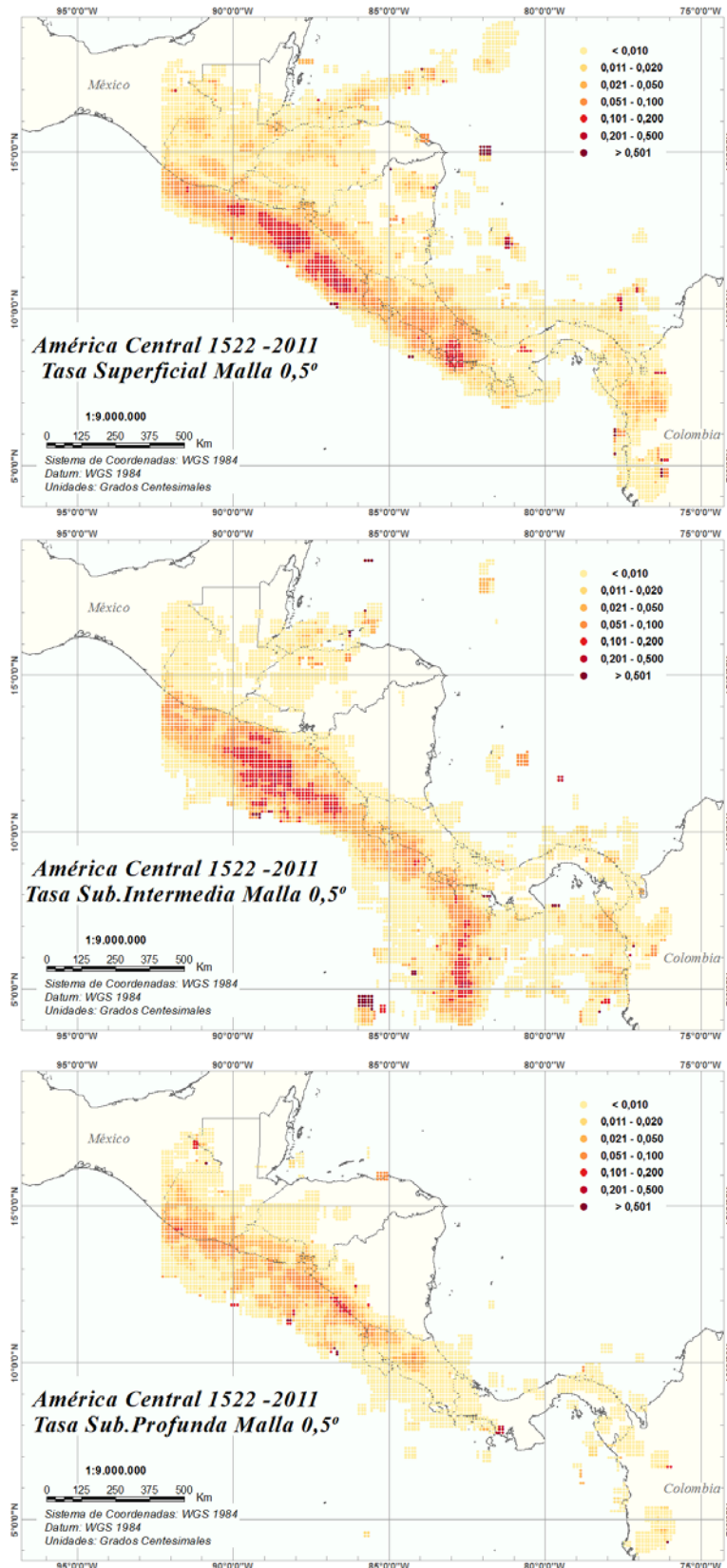


Figura 47.-América Central periodo completo (1522-2011), parámetro tasa, malla de 0,5° capa superficial (arriba), capa subducción intermedia (centro) y capa de subducción profunda (abajo).





### **7.2.3. Periodo moderno malla 0,5° (1985-2011).**

A continuación se estudia el periodo más moderno de catálogo de América Central, de 1985 a 2011, para la malla de 0,5° de lado. Al restringir el periodo y no tomar todo completo como anteriormente se pierden terremotos de mayor tamaño, ocurridos entre los años 1600 y 1700, viendo cómo afecta en el cálculo de los parámetros de sismicidad.

#### **7.2.3.1 Beta**

Atendiendo al valor máximo se aprecia cómo no sufren variación en comparación con el catálogo completo, en cambio los valores del límite superior, disminuyen ligeramente en este nuevo periodo.

Los valores predominantes en los tres mapas son pertenecientes a los intervalos con valores más bajos, al haber restringido el catálogo se pierden muchos seísmos de gran tamaño, por lo que la beta tiene menor valor.

En la capa superficial se pierde en parte la definición de la zona de subducción, y el contacto entre la placa de Norteamérica y Caribe aunque se aprecia no tiene una representación tan clara con respecto al periodo completo. Los valores en general son más bajos, y con menos uniformidad. La zona de Panamá es la que menos cambio sufre entre este periodo y el periodo completo.

En subducción intermedia es prácticamente igual en comparación con el periodo completo. Tan solo se pierde algo de representación, pero en zonas alejadas de los puntos característicos. Se puede apreciar también la zona de fractura de Panamá.

En subducción profunda, sucede lo mismo que en subducción intermedia, apenas hay variación en comparación con el periodo completo, y tan solo se aprecian ligeras variaciones en zonas como Honduras o Panamá.



Resultados.

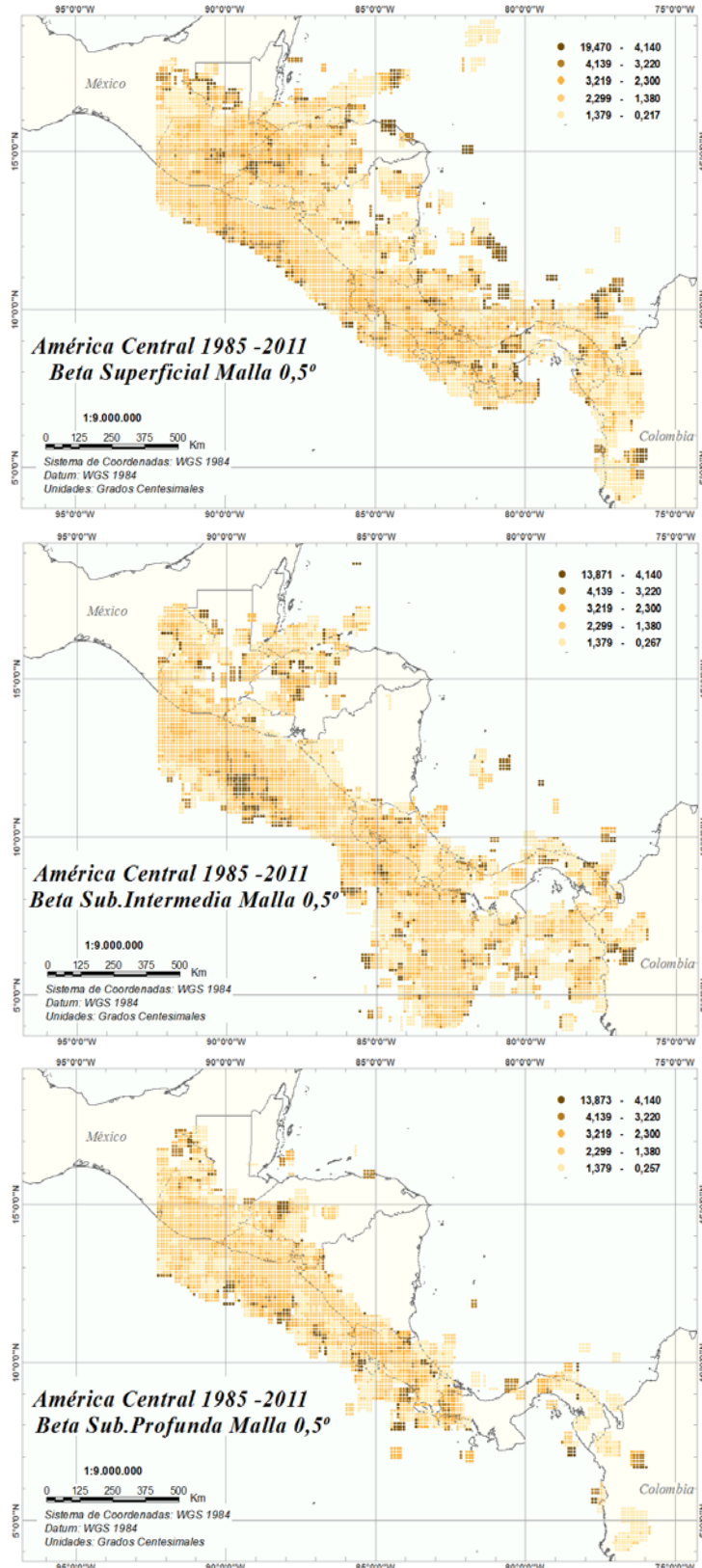


Figura 48.- América Central periodo completo (1985-2011), parámetro beta, malla de 0,5° capa superficial (arriba), capa subducción intermedia (centro) y capa de subducción profunda (abajo).



### **7.2.3.2 Magnitud máxima**

Se aprecia notablemente como en este periodo más moderno, del cual se prescinde de los grandes terremotos de ocurridos entre los años 1600-1700, repercute en la representación de la magnitud máxima, ya que apenas existen zonas donde haya terremotos del intervalo más alto y prácticamente en todas las zonas los valores han bajado de manera significativa en comparación con el periodo completo.

En la capa superficial, en la zona contacto de las tres grandes placas, Cocos, Norteamérica y Caribe, los valores de magnitud máxima bajan notablemente, de tener zonas del intervalo máximo en el periodo completo a ser prácticamente toda la capa los dos intervalos más bajos. Incluso en la línea de subducción los valores también son correspondientes a los intervalos más bajos.

En subducción intermedia, ocurre lo mismo que en superficial, ya no hay resultados del intervalo más alto, a pesar de ello se sigue distinguiendo por donde transcurre la subducción de la placa de Cocos, y aunque con intervalos más bajos siguen siendo los de dicha zona de subducción los más altos, junto con la zona de fractura de Panamá.

En subducción profunda, ocurre como en las capas de superficial y de subducción intermedia, desaparecen casi todos los valores de los intervalos más altos, quedando una representación con los intervalos más bajos, costando distinguir la zona de subducción.



Resultados.

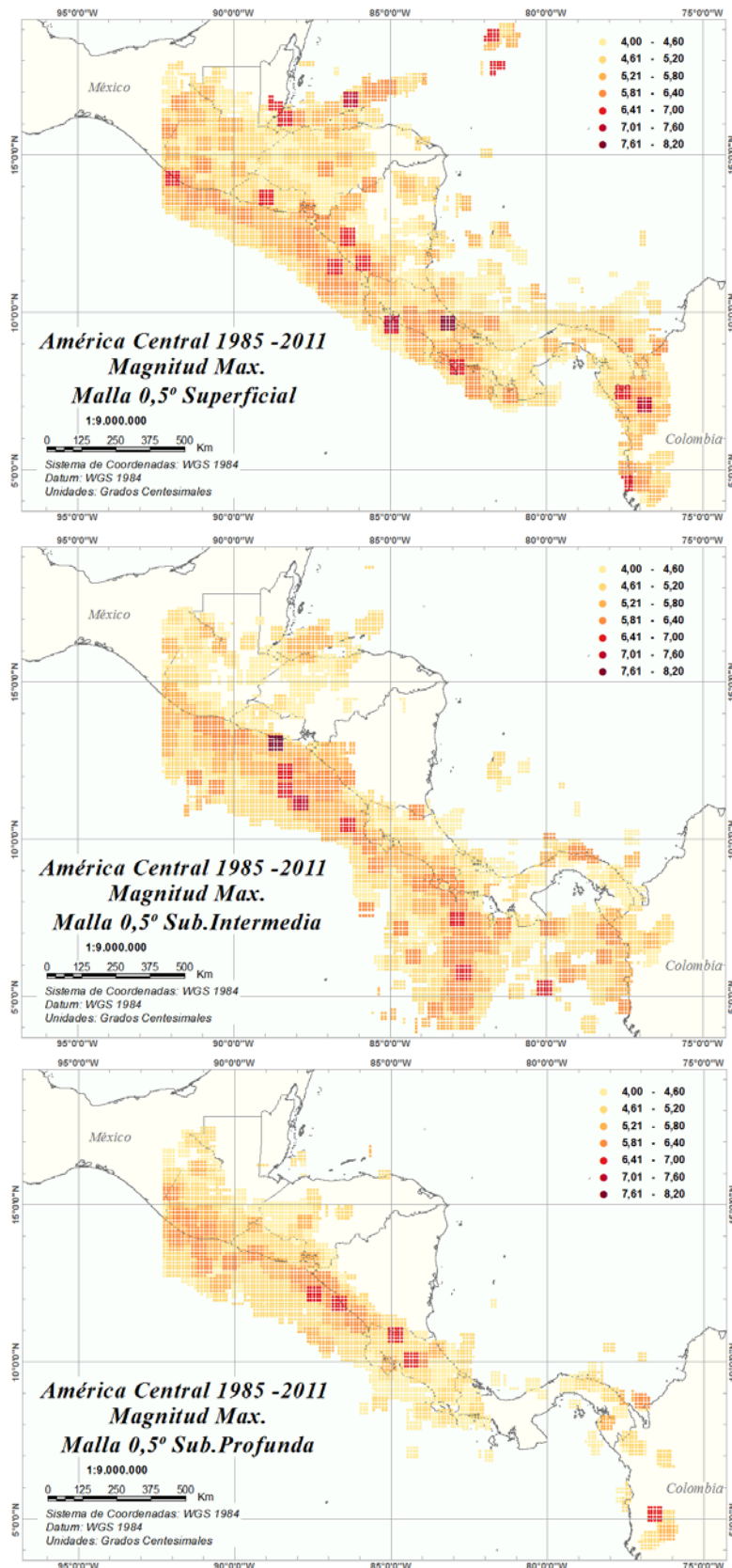


Figura 49.- América Central periodo completo (1985-2011), parámetro magnitud máxima, malla de 0,5° capa superficial (arriba), capa subducción intermedia (centro) y capa de subducción profunda (abajo).



### **7.2.3.3 Tasa**

Como el catálogo de América Central está depurado de réplicas y premonitores, la tasa debería alcanzar valores constantes en el tiempo. Y en efecto así es, pues apenas se observan variaciones significativas a pesar de haber quitado una época de gran actividad. En el paso de superficial a subducción intermedia y a subducción profunda la variación es muy pequeña, similar a lo que ocurre con el periodo completo.

Tanto en la capa superficial como en la de subducción intermedia y subducción profunda, las representaciones son muy similares que para el periodo completo, los intervalos más frecuentes siguen siendo valores bajos de tasa en zonas terrestres y marítimas, y en las zonas de contacto de placas y alineaciones características se concentran los valores altos, manteniendo las mismas formas que con el periodo completo. Tan solo en subducción profunda es donde se puede apreciar algo más la falta de uniformidad que caracteriza al periodo completo, ya que la subducción está más definida.



Resultados.

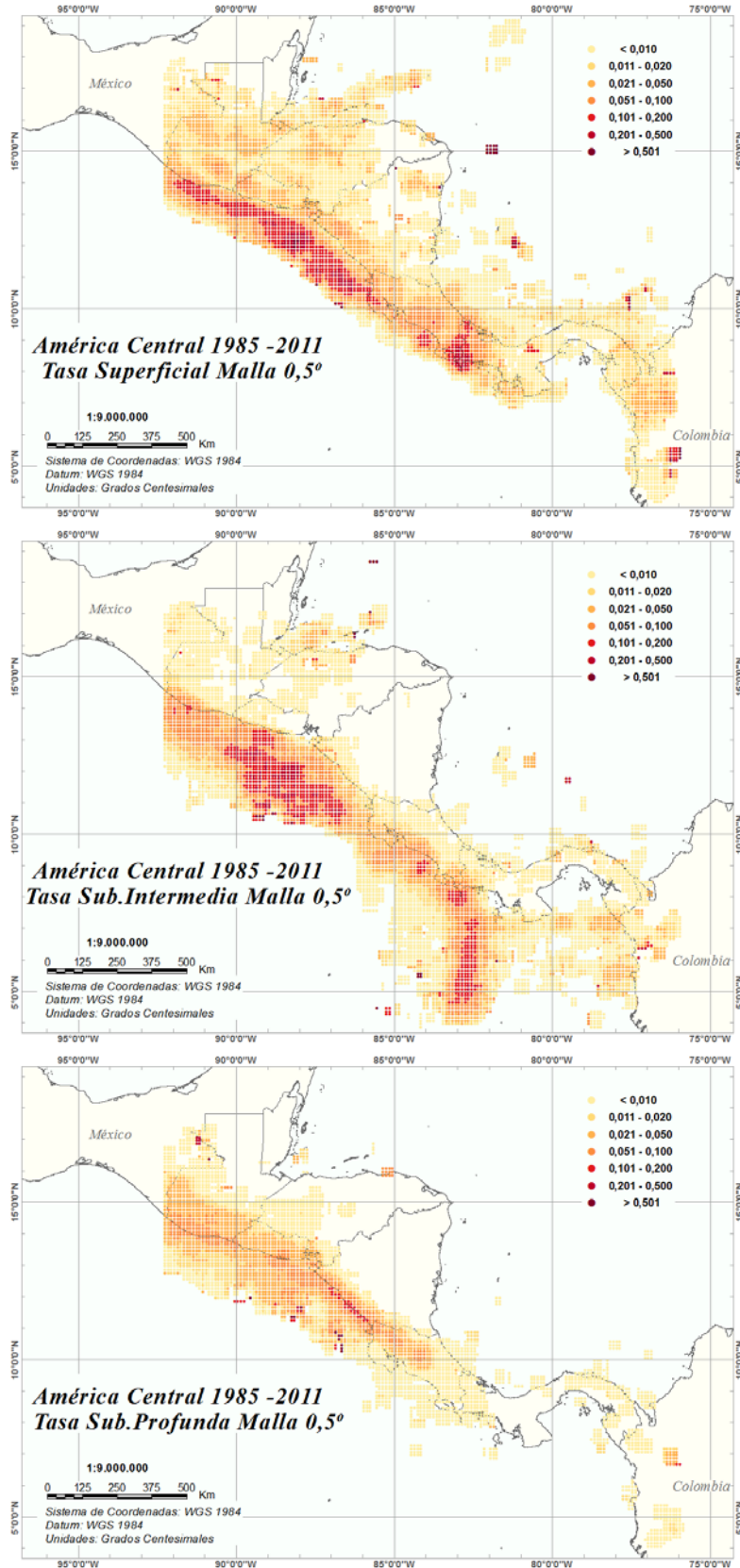


Figura 50.- América Central periodo completo (1985-2011), parámetro tasa, malla de 0,5° capa superficial (arriba), capa subducción intermedia (centro) y capa de subducción profunda (abajo).



#### **7.2.4. Periodo completo malla 0,2° (1522-2011).**

Para finalizar se analiza el periodo temporal que abarca el catálogo completo (1522-2011) pero en esta ocasión para la malla de 0,2° de lado, tomando para ello los tres mapas de cada parámetro de sismicidad y haciendo un análisis espacial tanto en coordenadas horizontales, como en profundidad para las tres capas: superficial, subducción intermedia y subducción profunda.

##### **7.2.4.1 Beta**

Atendiendo a los rangos de valores, se puede observar como el límite inferior de variación de beta varía notablemente, siendo el valor más grande el perteneciente a la capa de subducción intermedia. Por el contrario, el límite superior, no sufre variación significativa en el paso de una capa a otra. En comparación con la malla de 0,5° también varía de forma notoria el límite inferior, siendo la capa donde más diferencia existe en la superficial. El límite superior tampoco varía significativamente de calcular con la malla de 0,5° a con la malla de 0,2°.

Los valores más frecuentes para los tres cortes en profundidad son los pertenecientes al rango de [2,23 a 1,38]; sobre todo en la capa superficial y subducción intermedia, en las cuales también se encuentran varias zonas en las cuales el valor predominante es el rango [3,20 a 2,30]. En subducción profunda los valores más frecuentes son los bajos.

En la capa superficial se pueden distinguir las principales estructuras tectónicas al igual que en con la malla de 0,5°, se pierde en terreno cubierto por resultados, pero se gana en definición y precisión, como por ejemplo en el alineamiento volcánico paralelo a la línea de subducción y en la propia subducción. Aparecen muchos puntos con valores altos de forma individualizada, sobre todo por la zona terrestre, esto puede ser debido a los pocos registros que entran en el cálculo que originan resultados con valores extremos.

En subducción intermedia se pierde mucha representación, sobre todo en la zona interior, que prácticamente desaparece, y en la zona marítima, las estructuras quedan



definidas por menos resultados en comparación con la malla de 0,5°. La zona de subducción a la altura de El Salvador y Nicaragua se consigue mayor definición. Al igual que en la capa superficial se encuentran varios puntos con valores altos de manera individual, posiblemente por el mismo motivo de cálculo.

En subducción profunda es la capa donde más se nota la pérdida de información resultante, toda la zona de Panamá y Colombia queda prácticamente sin puntos, y la zona de la fosa mesoamericana queda muy reducida, en comparación con la malla de 0,5°. Los valores cambian notoriamente volviéndose la mayoría de valores bajos, y apareciendo algunos extremos de forma individual.





Resultados.

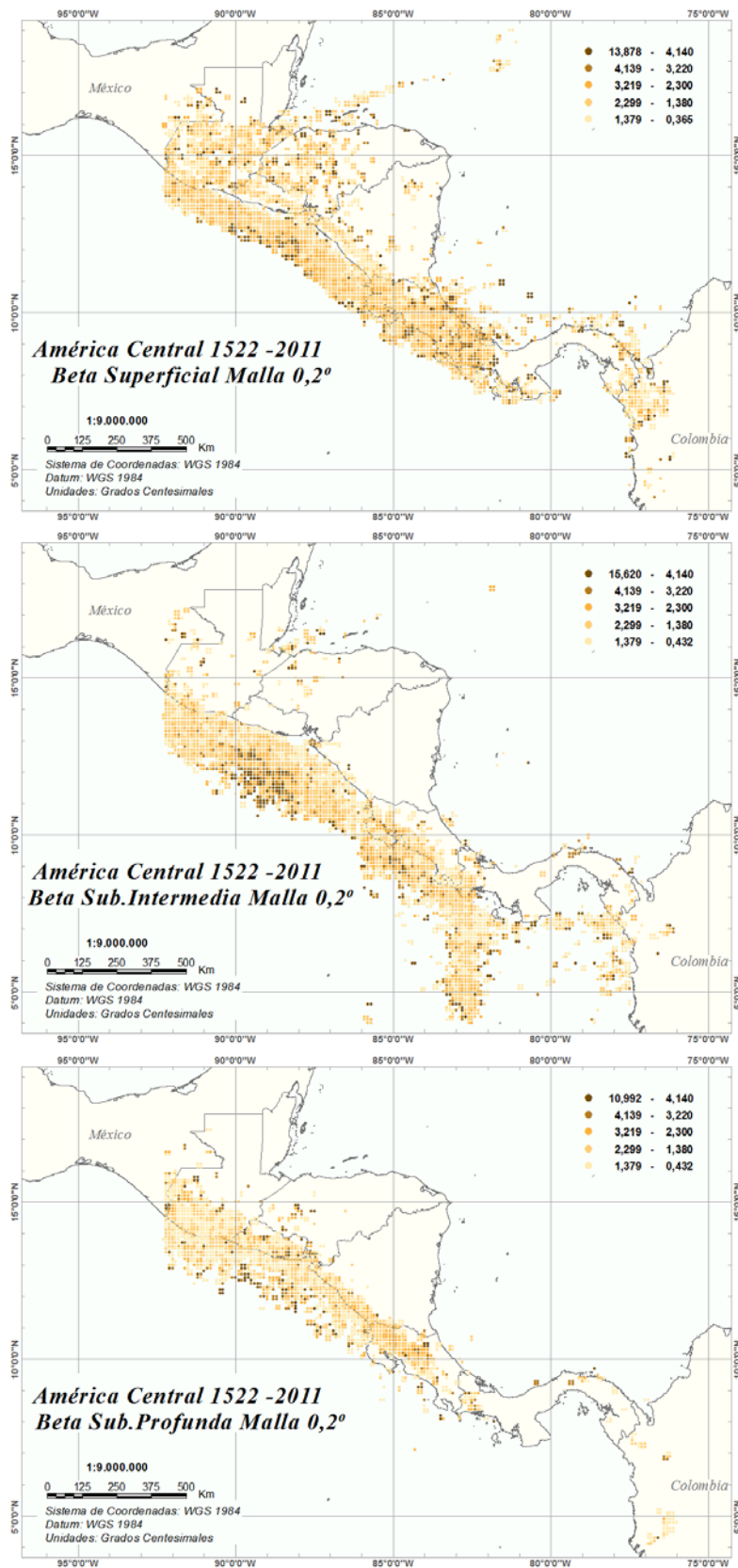


Figura 51.- América Central periodo completo (1522-2011), parámetro beta, malla de 0,2° capa superficial (arriba), capa subducción intermedia (centro) y capa de subducción profunda (abajo).



#### **7.2.4.2 Magnitud máxima**

Los valores más altos de magnitud máxima se encuentran sobre todo a lo largo de los borde de placa, tanto en la zona de subducción como de contacto de las placas de Norteamérica y Caribe. Conforme se aleja de dichas zonas, el valor de magnitud máxima disminuye de manera progresiva. Ocurre de manera similar a los resultados obtenidos de los cálculos con la malla de  $0,5^\circ$ , pero con mejor definición de donde se encuentran estos resultados.

En la capa superficial se puede observar como los valores más altos ocurren en el arco volcánico paralelo a la costa oeste. También se encuentra valores altos en la zona de contacto de las placas de Norteamérica y Caribe y en la zona de subducción, aunque en esta última prevalecen valores de rangos medios.

En subducción intermedia y subducción profunda se mantienen representaciones similares en comparación con la malla anterior de  $0,5^\circ$ , con menos puntos, pero obteniendo los valores más altos en las mismas zonas, con la diferencia de que se obtienen con mayor precisión la ubicación de estos puntos.



Resultados.

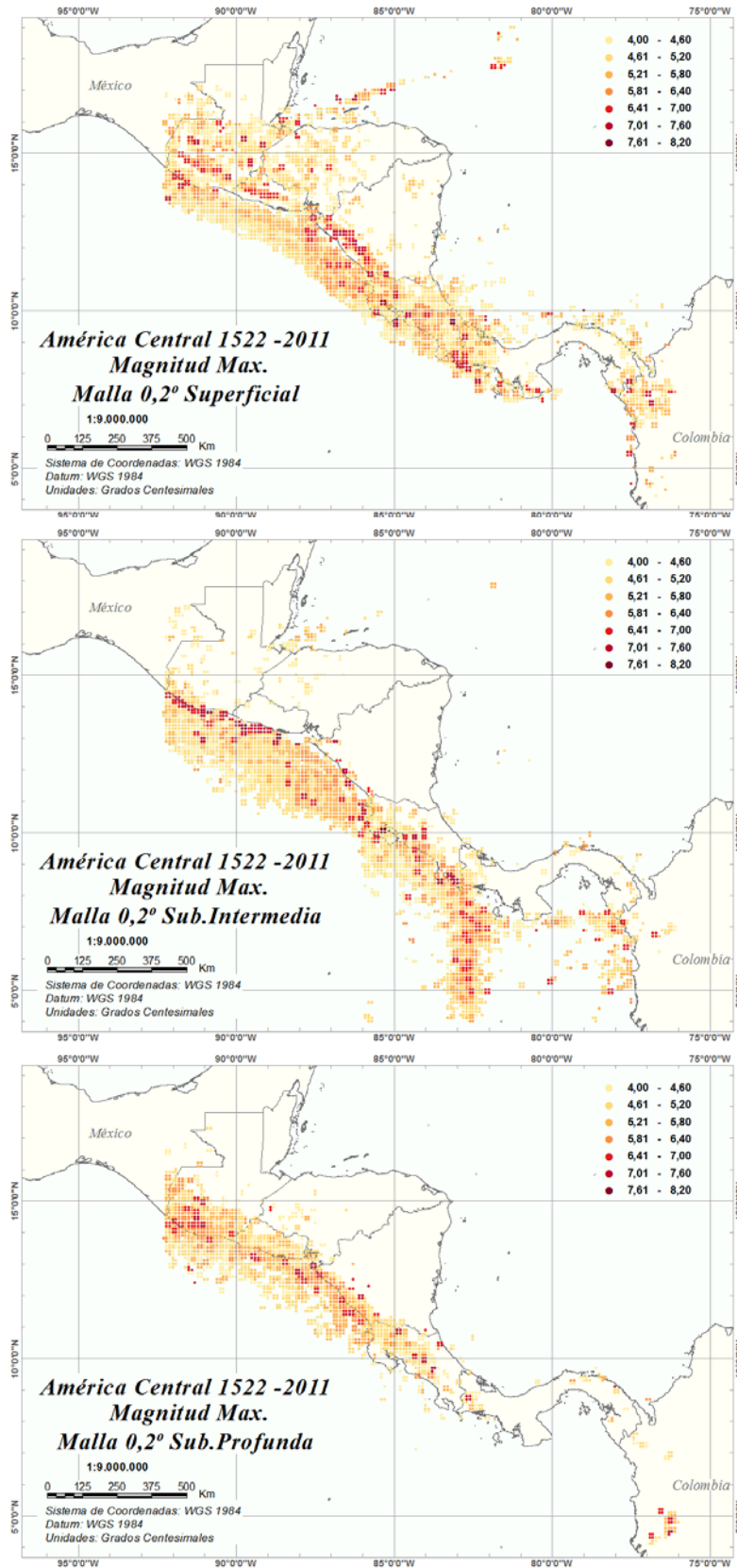


Figura 52.- América Central periodo completo (1522-2011), parámetro magnitud máxima, malla de 0,2° capa superficial (arriba), capa subducción intermedia (centro) y capa de subducción profunda (abajo).



#### **7.2.4.3 Tasa**

Los valores más frecuentes de tasa en la malla de 0,2° pertenecen a los dos intervalos que se encuentran entre los valores de 0,051 a 0,2. Por lo general, son valores ligeramente más altos a los obtenidos para la malla de 0,5° en todas las capas.

Los valores más altos de tasa se encuentran mayoritariamente en la zona de subducción, salvo a la altura de Costa Rica, donde bajan ligeramente. También a lo largo de la fractura de Panamá, se encuentran valores de los rangos más altos.

En la capa superficial se pierde una extensión bastante amplia de resultados, comparando los resultados para ambas mallas, pero la mayoría son de valores bajos, por lo que parecen más de carácter residual.

En subducción intermedia en comparación con la malla de 0,5 se pierden casi todos los puntos de los intervalos más bajos, quedando las zonas de valores de tasa altos representadas con mayor precisión, sobre todo en la zona de fractura de Panamá y en la zona de subducción frente a El Salvador y Nicaragua. Panamá y Colombia quedan casi sin resultados.

En la capa de subducción profunda ocurre igual que con la capa anterior, subducción intermedia, desaparecen casi todos los puntos de valores bajos, permaneciendo solo las zonas con mayor probabilidad, la zona de la fosa mesoamericana pero más adentrada bajo la placa de Caribe.



Resultados.

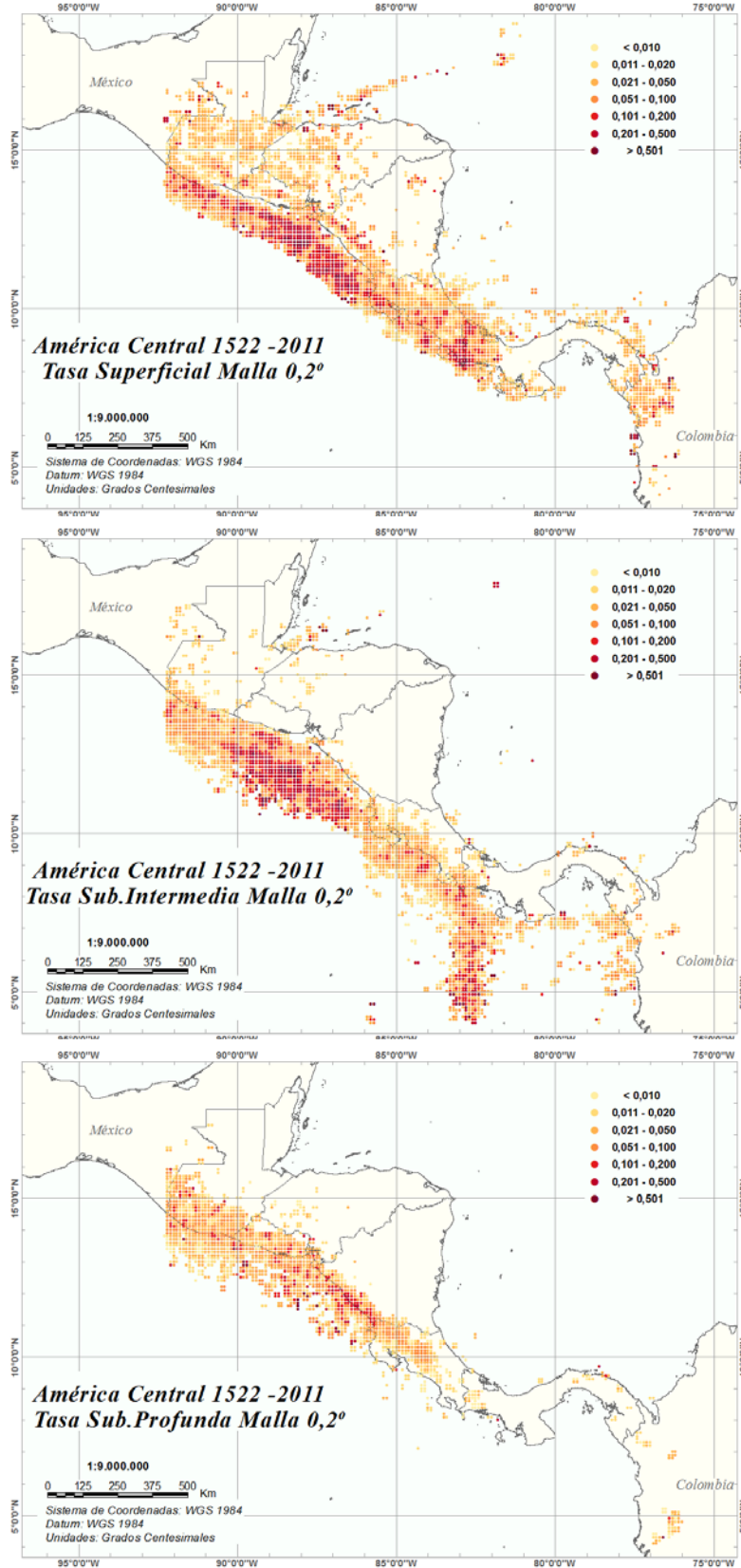


Figura 53.- América Central periodo completo (1522-2011), parámetro tasa, malla de 0,2° capa superficial (arriba), capa subducción intermedia (centro) y capa de subducción profunda (abajo).



# *Conclusiones.*



## **8. CONCLUSIONES.**

Se ha alcanzado el objetivo general que se perseguía con el proyecto, caracterizando la sismicidad de los dos ambientes tectónicos propuestos, Península Ibérica y América Central y determinando la variación espaciotemporal de los parámetros de sismicidad (tasa, beta y magnitud máxima).

Se han hecho un análisis de los tamaños de celda para definir las mallas espaciales con las que calcular los diferentes parámetros sísmicos. Tras dicho análisis se considera que el tamaño óptimo de celda es  $0,5^\circ$  de lado para la Península Ibérica, ya que contiene más información relevante, sin extrapolación y evitando la redundancia de datos, y además, teniendo en cuenta que el número de cálculos con dicha malla es asequible en el tiempo. Para América Central se consideró que tanto un tamaño de celda de  $0,5^\circ$  como uno de  $0,2^\circ$  son adecuados para analizar el territorio, uno para un estudio más general, y otro para un estudio más local y en detalle, respectivamente.

En la Península Ibérica se observó que los datos se concentran en zonas características, donde la actividad sísmica es mayor que en otras zonas resto, como en el norte de Marruecos y Argelia, en la alineación de la falla con dirección de NO-SE que recorre el sur de España, y en menor medida en Pirineos y frontera de Galicia con Portugal. A medida que se acorta el periodo temporal se pierden datos prevaleciendo las zonas de mayor actividad. Los parámetros sísmicos también varían conforme se acorta el periodo temporal, la magnitud máxima tiene valores más pequeños con catálogos más cortos. La distribución de valores del parámetro beta se concentra sobre todo en los valores centrales (en los tres intervalos medios), siendo los valores extremos poco relevantes según el método propuesto. Los valores de la tasa permanecen relativamente estables, lo que puede deberse a la poca sismicidad de la zona. Aun así las tasas altas se conservan en las zonas características.

El hecho de que en América Central la sismicidad sea mucho más alta facilita el análisis espacial, ya que hay más datos de donde extraer información, permitiendo que se pueda afinar más en el análisis. Por otro lado, apenas se aprecian variaciones temporales



debido a que el catálogo no depende tanto del tiempo por ser relativamente moderno. En esto contrasta con el caso de la Península Ibérica, donde se necesitan registros sísmicos más antiguos para poder interpretar con más realismo los resultados.

El utilizar ambos tamaños de malla en América Central para el cálculo permite poder hacer un mejor análisis de las diferentes zonas, ya que ambos resultados se complementan. Se puede hacer uso de un análisis más general cuando se encuentren zonas sin representación en el de carácter más local.





# *Bibliografía.*



## 9. BIBLIOGRAFÍA.

ADAMEK, S., C. FROHLICH y W. D. PENNINGTON (1988): *Seismicity of the Caribbean boundary: Constraints on microplate tectonics of the Panama region*, *Journal of Geophysical Research*, vol. 93, pp. 2053-2075.

AMBRASEYS, N. y R. ADAMS (1996): *Large Magnitude Central America Earthquakes, 1898-1994*, *Geophysical Journal International*, vol. 127, pp. 665-692.

AKI, K. (1965): *Maximum likelihood estimate of  $b$  in the formula  $\log(N) = a - bM$  and its confidence limits*, *Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ.*, 43, pp. 237-239

BENDER, B. (1983). *Maximum likelihood estimation of  $b$  values magnitude grouped data*. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 73, 831-851.

BENITO, B. y TORRES, Y., VV.AA. (2011). *Amenaza sísmica en América Central*. Madrid. 373 pp.

BUFORN, E., UDÍAS, A. and COLOMBÁS, M.A. (1988). *Seismicity, source mechanisms and seismotectonics of the Azores-Gibraltar plate boundary*. *Tectonophysics*, 152, 89-118.

BUFORN, E. y UDÍAS, A. (2010) *Azores-Tunisia, a tectonically complex plate boundary*. *Advances in Geophysics*.

CAMACHO, E. (1991): *The Puerto Armuelles Earthquake (southwestern Panama) of July 18, 1934*, *Revista Geológica de América Central*, vol. 13, pp. 113.

CORNELL, C. A. (1968): *Engineering Seismic Risk Analysis*, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 58, n° 5, pp. 1583-1606.

DE VICENTE, G., R. VEGAS, J. GUIMERA, A. MUÑOZ MARTÍN, A. CASAS, S. MARTÍN VELÁZQUEZ, N.HEREDIA, L.R. RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, J.M. GONZÁLEZ CASADO, S. CLOETINGH, B. ANDEWEG, J.ÁLVAREZ y A. OLAIZ (2004). *Evolución geodinámica cenozoica de la placa ibérica y su registro en el antepaís*. En: *Geología de España*. (J.A. Vera, Ed.), SGE-IGME, Madrid, 597- 602.

DE VICENTE, G., CLOETINGH, S., MUÑOZ-MARTIN, A., OLAIZ, A., STICH, D., VEGAS, R., GALINDO-ZALDÍVAR, J. & FERNANDEZ-LOZANO, J. (2008). *Inversion of moment tensor focal mechanisms for active stresses around the microcontinent Iberia: Tectonic implications*. *Tectonics*, 27, doi:10.1029/2006TC002093.

GUTENBERG, B. and RICHTER, C. F. (1944). *Frequency of earthquakes in California.*, *Bull. Seism. Soc. Am.* 34, 185- 188.

HANKS, T. C. and H. KANAMORI, H. (1979). *A moment magnitude scale*. *J. Geophys. Res.*, 84, 23480-23500.



HAYES, G. P., D. J. WALD, And R. L. JOHNSON (2012), *Slab1.0: A Three-Dimensional Model Of Global Subduction Zone Geometries*, *J. Geophys. Res.*, 117, B01302, Doi:10.1029/2011JB008524.

HEIL, D. J., y E. SILVER (1987): *Forearc uplift south of Panama. A result of transform ridge subduction*. *Geological Society of America. Abstracts Prog.* 19, 698 pp.  
IGN-UPM, 2012. *Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España*. Madrid. 267 pp.

ISOBE, T., FEIGELSON, E.D., AKRITAS, M.G., BABU, G.J. (1990). *Linear Regression in Astronomy I*. *The Astrophysical Journal*, 364, 104-113.

LÓPEZ, C. (2008). *Nuevas Fórmulas de Magnitud para la Península Ibérica y su entorno*. Trabajo de Investigación del Máster de Geofísica y Meteorología. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Físicas. Dpto. de Geofísica y Meteorología.

MANN, P., y K. BURKE (1984): *Cenozoic rift formation in the northern Caribbean*. *Geology*, vol. 12, pp. 732-736.

MANN, P. y J. CORRIGAN (1990): *Model for late Neogene deformation in Panama*. *Geology*, vol. 18, pp. 558-562.

MARTÍNEZ SOLARES J.M (2003). *Sismicidad histórica de la Península Ibérica*. *Física de la Tierra*, 15, 13-28.

MEZCUA, J. MARTÍNEZ SOLARES, J.M (1983). *Sismicidad del área Ibero-Mogrebí*. Publicación 203. Instituto Geográfico Nacional. Madrid. 301 pp.

MOLINA, S. (1998). *Sismotectónica y peligrosidad sísmica del área de contacto entre Iberia y África*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 280 pp.

MOORE, G., D. KELLOG, E. SILVER, J. TAGUDIN, D. HEIL, T. SHIPLEY y D. HUSSONG (1985): *Structure of the south Panama continental margin: A zone of oblique convergence*, *EOS*, vol. 44, 1087 pp.

PACHECO, J., R. QUINTERO, F. VEGA, J. SEGURA, W. JIMÉNEZ y V. GONZÁLEZ (2006): *The MW 6,4 Damas, Costa Rica Earthquake of 20 November 2004: Aftershocks and Slip Distribution*. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 96, n° 4, pp. 1-August 2006. doi: 10.1785/0120050261.

PACHECO, J. y L. SYKES (1992): *Seismic moment catalog of large, shallow earthquakes, 1900-1989*. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 82, pp. 1306-1349.

PENNINGTON, W. (1981): *Subduction of the eastern Panama basin and the sismotectonics of northwestern South America*. *Journal Geophysical Research*, vol. 86, pp. 10753-10770. PERALDO, G. y W. MONTERO (1999): *Sismología Histórica de América Central*. Instituto Panamericano de Historia y Geografía, México, 347 pp.

PLAFKER, G. (1976): *Tectonic aspects of the Guatemala earthquake of 4 February, 1976*, *Science*, vol. 193, pp. 1201-1208.



ROJAS, W., H. BUNGUM y C. LINDHOLM (1993a): *A Catalog of Historical and Recent Earthquake in Central America. NORSAR, technical report. Project: Reduction of Natural Disasters in Central America, Earthquake Preparedness and Hazard Mitigation, Seismic Zonation and Earthquake Assessment. 77 pp.*

SERPELLONI, E., VANNUCCI, G., PONDRELLI, S., ARGNANI, A., CASULA, G., ANZIDEI, M., BALDI, P., GASPERINI, P., 2007, *Kinematics of the western Africa-Eurasia plate boundary from focal mechanisms and GPS data, Geophys. J. Int., 169(3), 1180-1200.*

SHA, Y. and BOLT, B.A. (1980). *The standard error of the magnitud-frequency b value. Bull.Seism.Soc.Am. 72, 1677-1687.*

SILVER, E. A., D. L. REED, J. L. TAGUDIN y D. L. HEIL (1990): *Implications of the North and South Panama Thrut Belts for the origin of the Panama Orocline. Tectonics, vol. 9, pp. 261-281.*

STICH D., MARTÍN, R., MORALES, J. (2010). *Moment tensor inversión for Iberia-Maghreb earthquakes 2005-2008. Tectonophysics, 483, 390-398.*

WHITE, R., J. P. LIGORRIA y I. CIFUENTES (2004): *Seismic history of the Middle America subduction zone along El Salvador, Guatemala, and Chiapas, Mexico: 1526- 2000, en: Geological Society of America. Special Paper, 375: Natural Hazards in El Salvador, pp. 379-396.*

WOLTERS, B. (1986): *Seismicity and tectonics os southern Central America and adjacent regions with special attention to the surroundings of Panama. Tectonophysics, vol. 128, pp. 21-46.*



# *ANEXO.*

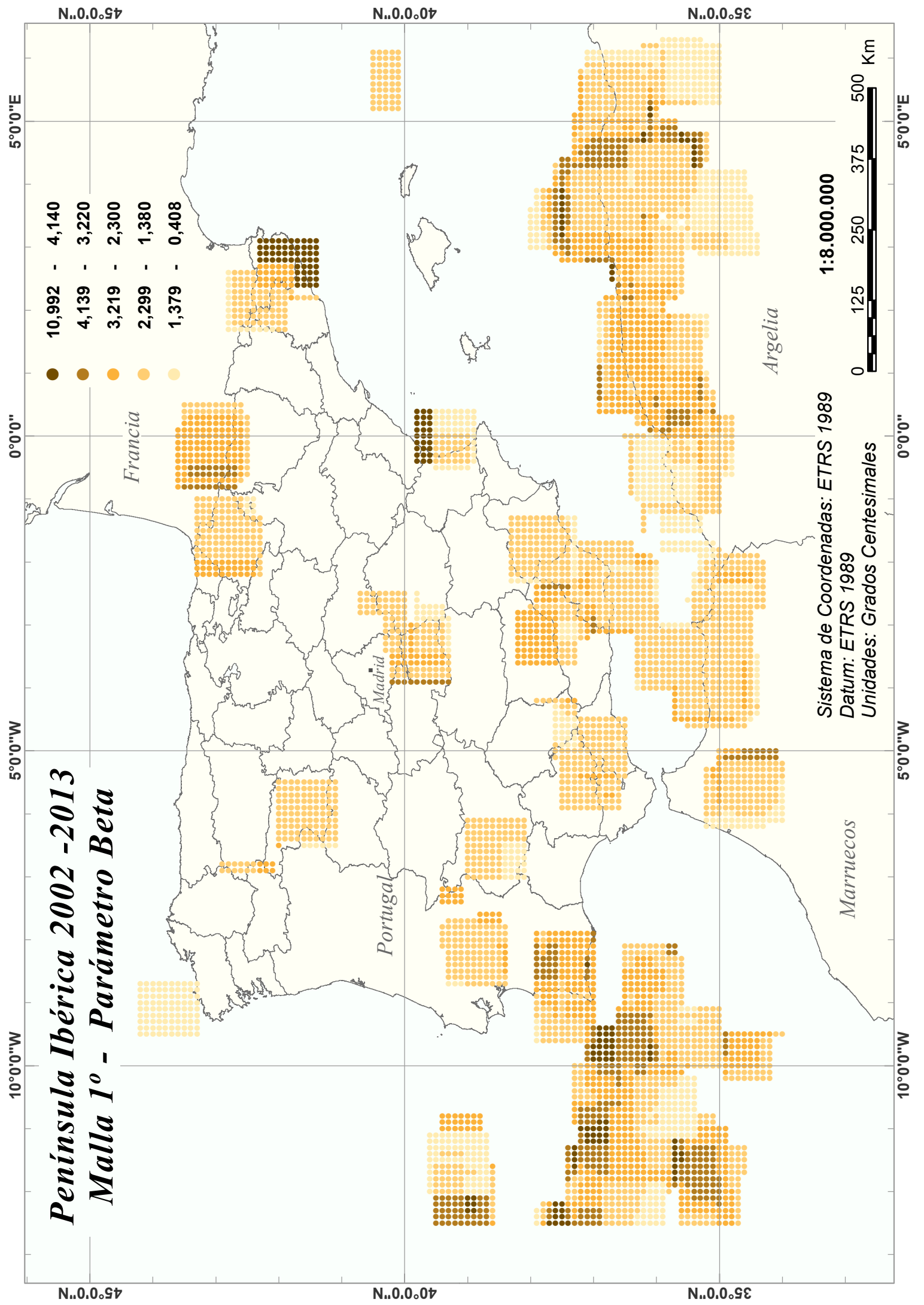


## **10. ANEXO.**

A continuación se muestran todos los mapas con los resultados realizados para el estudio y análisis del presente proyecto.

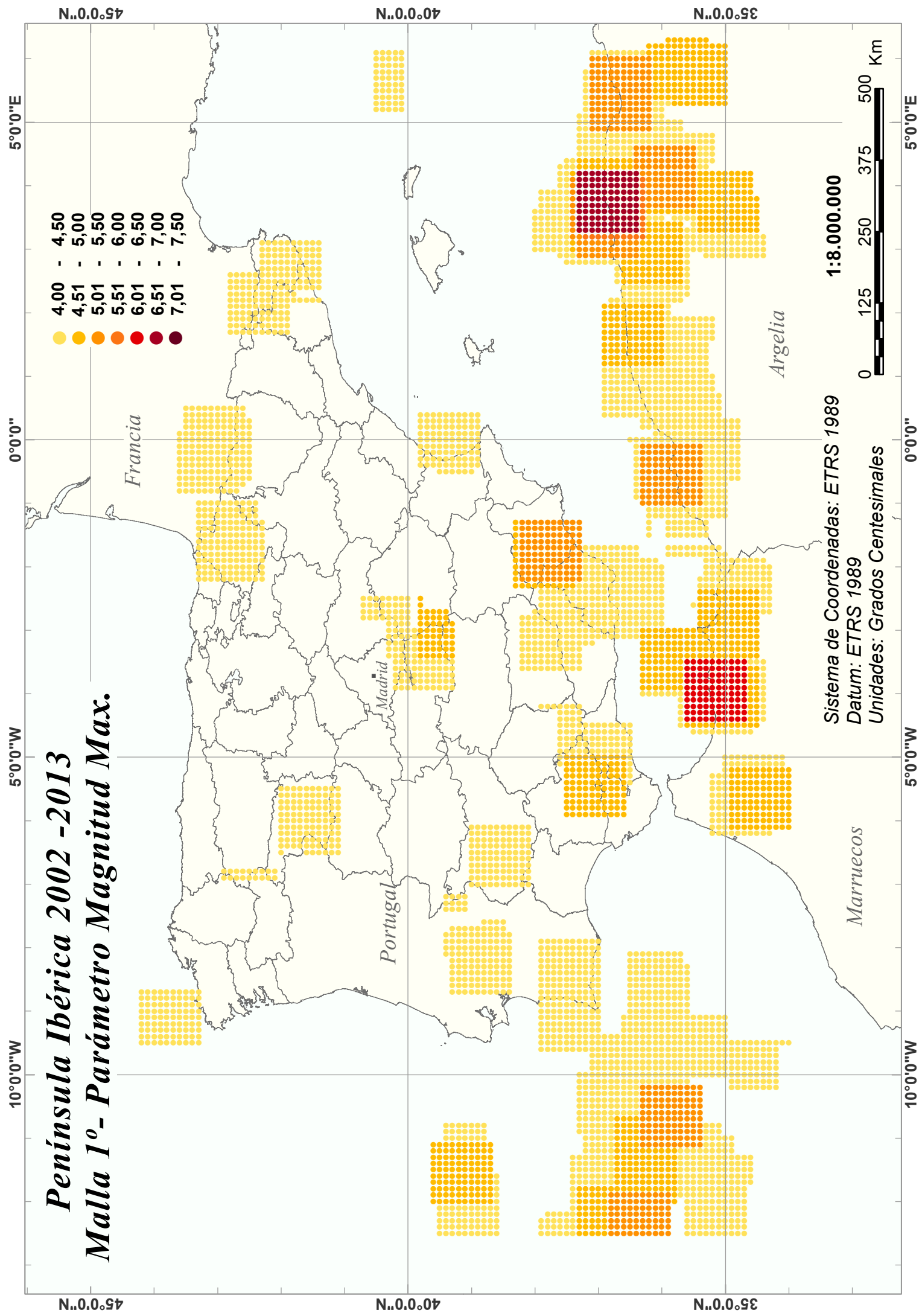
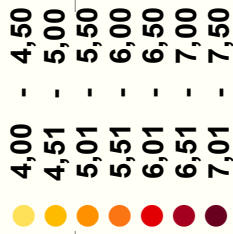
# Península Ibérica 2002 - 2013

## Malla 1° - Parámetro Beta



# Península Ibérica 2002 -2013

## Malla 1° - Parámetro Magnitud Max.



Sistema de Coordenadas: ETRS 1989  
Datum: ETRS 1989  
Unidades: Grados Centesimales

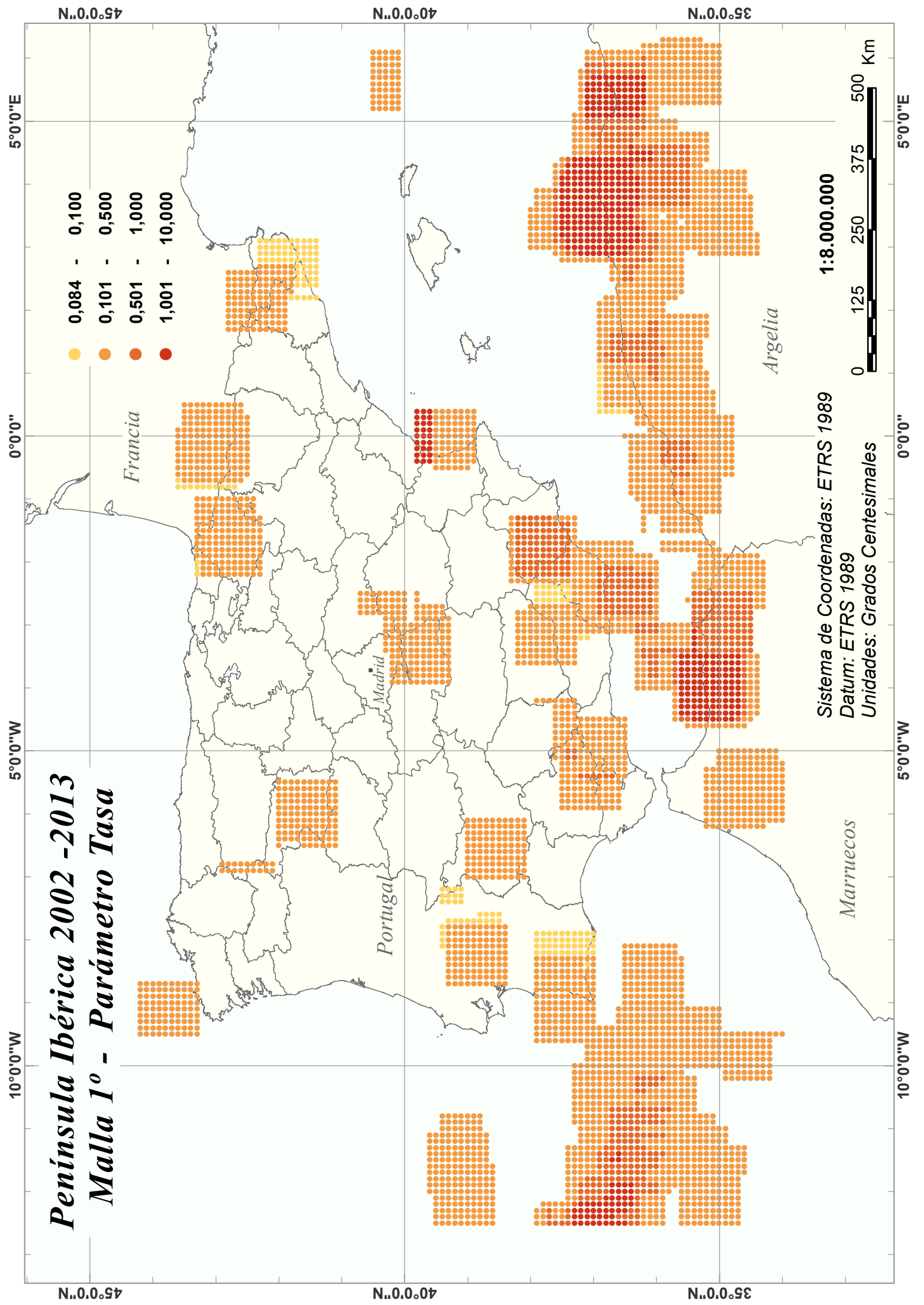
1:8.000.000





# Península Ibérica 2002 -2013

## Malla 1° - Parámetro Tasa



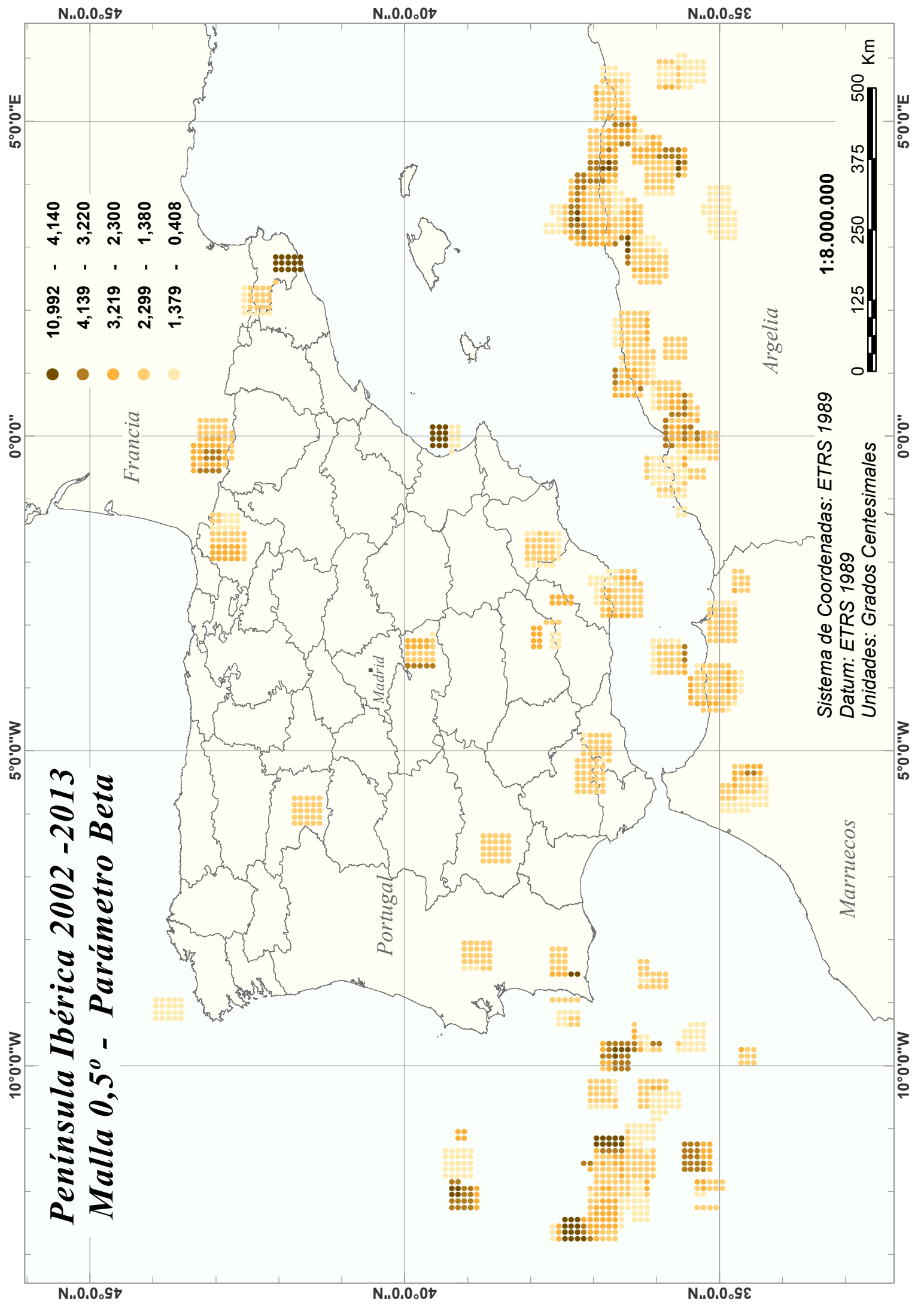
- 0,084 - 0,100
- 0,101 - 0,500
- 0,501 - 1,000
- 1,001 - 10,000

Sistema de Coordenadas: ETRS 1989  
Datum: ETRS 1989  
Unidades: Grados Centesimales  
1:8.000.000



# Península Ibérica 2002 - 2013

## Malla 0,5° - Parámetro Beta



# Península Ibérica 1985 - 2013

## Malla 0,5° - Parámetro Beta

- 6,939 - 4,140
- 4,139 - 3,220
- 3,219 - 2,300
- 2,299 - 1,380
- 1,379 - 0,365

Francia

Madrid

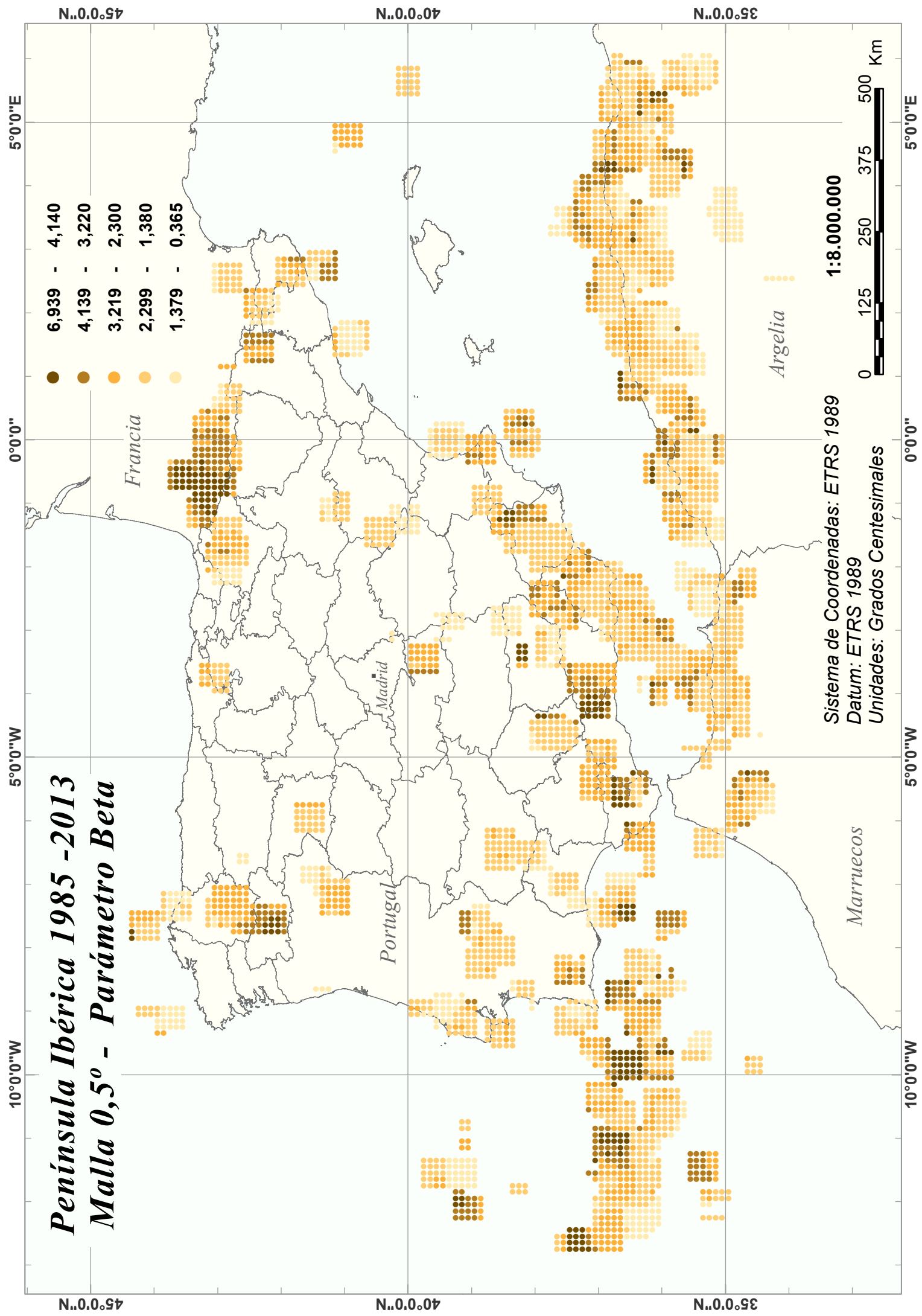
Portugal

Argelia

Marruecos

Sistema de Coordenadas: ETRS 1989  
Datum: ETRS 1989  
Unidades: Grados Centesimales

1:8.000.000



# Península Ibérica 1962 - 2013

## Malla 0,5° - Parámetro Beta

- 9,343 - 4,140
- 4,139 - 3,220
- 3,219 - 2,300
- 2,299 - 1,380
- 1,379 - 0,356

Francia

Madrid

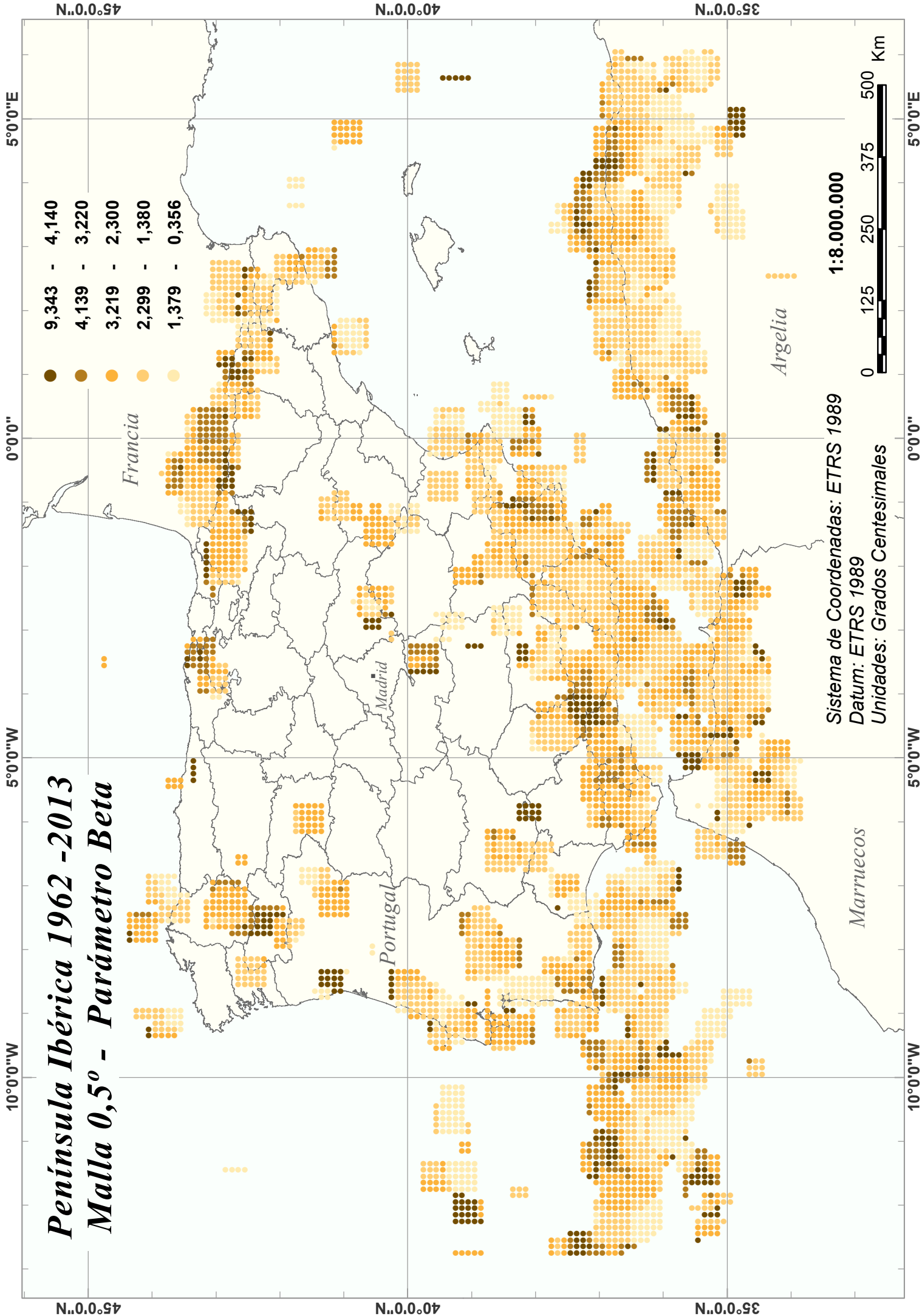
Portugal

Argelia

Marruecos

Sistema de Coordenadas: ETRS 1989  
Datum: ETRS 1989  
Unidades: Grados Centesimales

1:8.000.000



# Península Ibérica 1048 - 2013

## Malla 0,5° - Parámetro Beta

- 12,895 - 4,140
- 4,139 - 3,220
- 3,219 - 2,300
- 2,299 - 1,380
- 1,379 - 0,190

Francia

Portugal

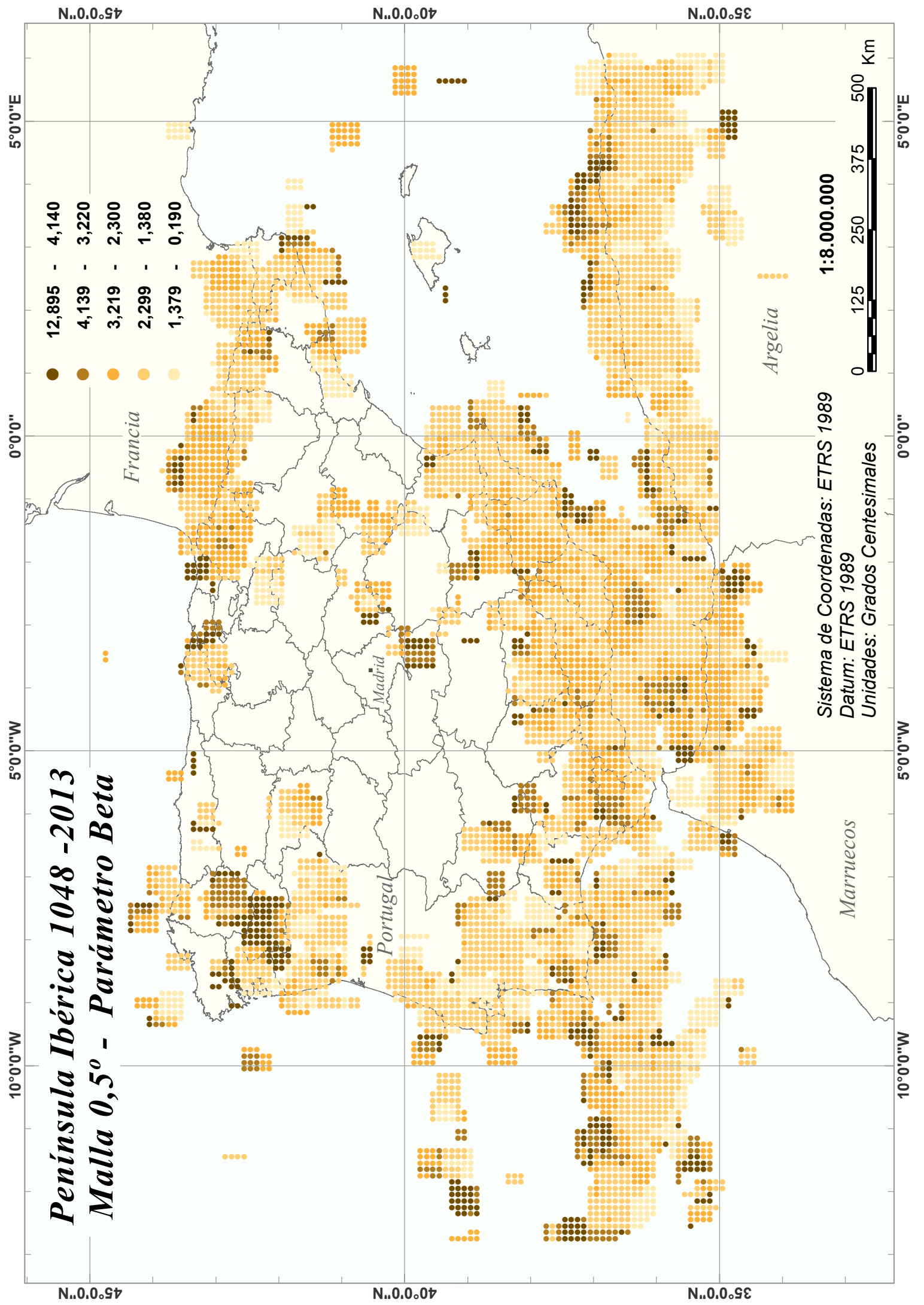
Madrid

Argelia

Marruecos

Sistema de Coordenadas: ETRS 1989  
Datum: ETRS 1989  
Unidades: Grados Centesimales

1:8.000.000



45°0'0"N

0°0'0"

5°0'0"W

10°0'0"W

5°0'0"E

0°0'0"

5°0'0"W

10°0'0"W

5°0'0"E

40°0'0"N

40°0'0"N

35°0'0"N

35°0'0"N

5°0'0"E

0°0'0"

5°0'0"W

10°0'0"W

5°0'0"E

0°0'0"

5°0'0"W

10°0'0"W

45°0'0"N

40°0'0"N

35°0'0"N

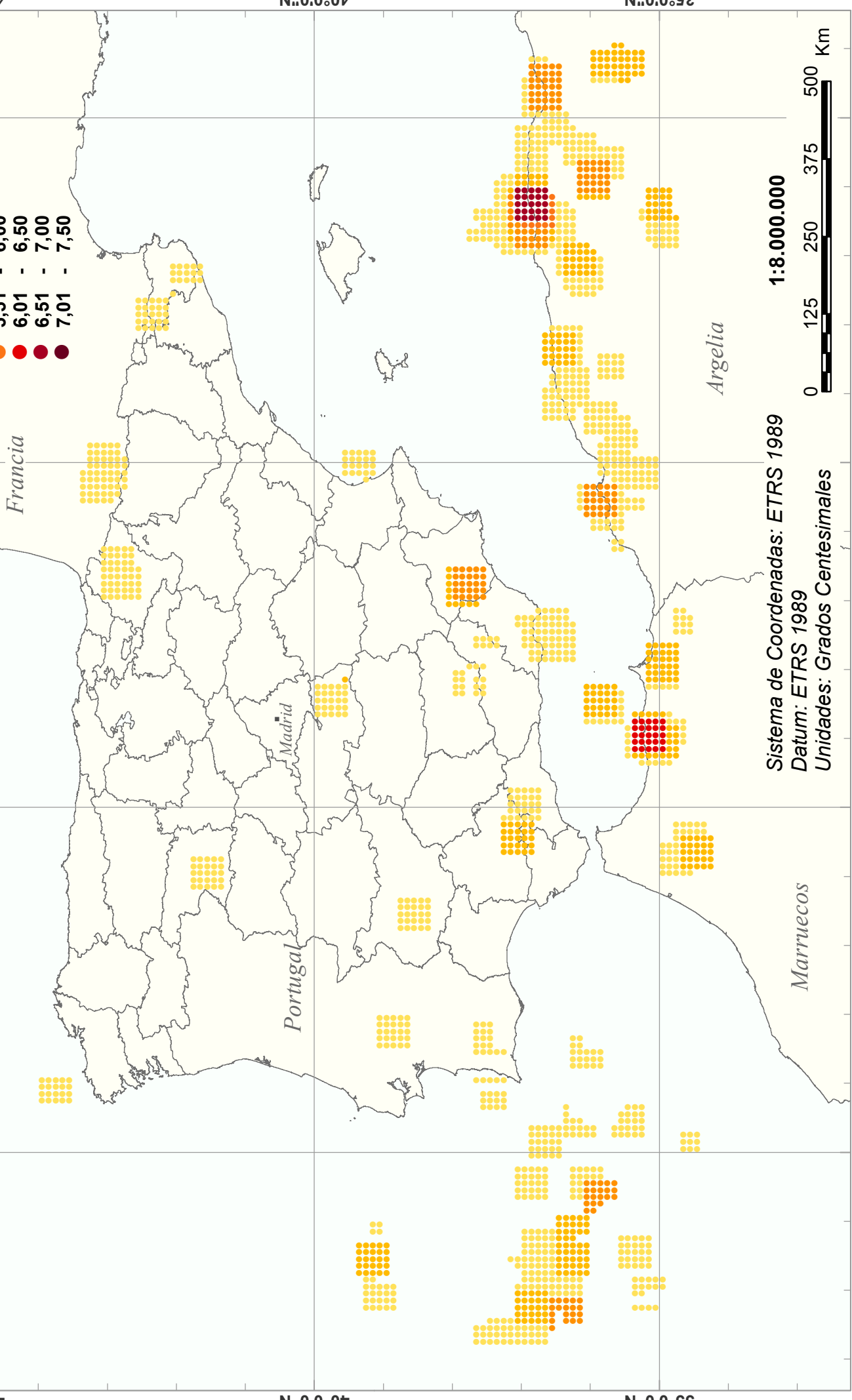
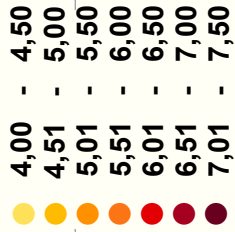
45°0'0"N

40°0'0"N

35°0'0"N

# Península Ibérica 2002 -2013

## Malla 0,5°- Parámetro Magnitud Max.



45°0'0"N 40°0'0"N 35°0'0"N

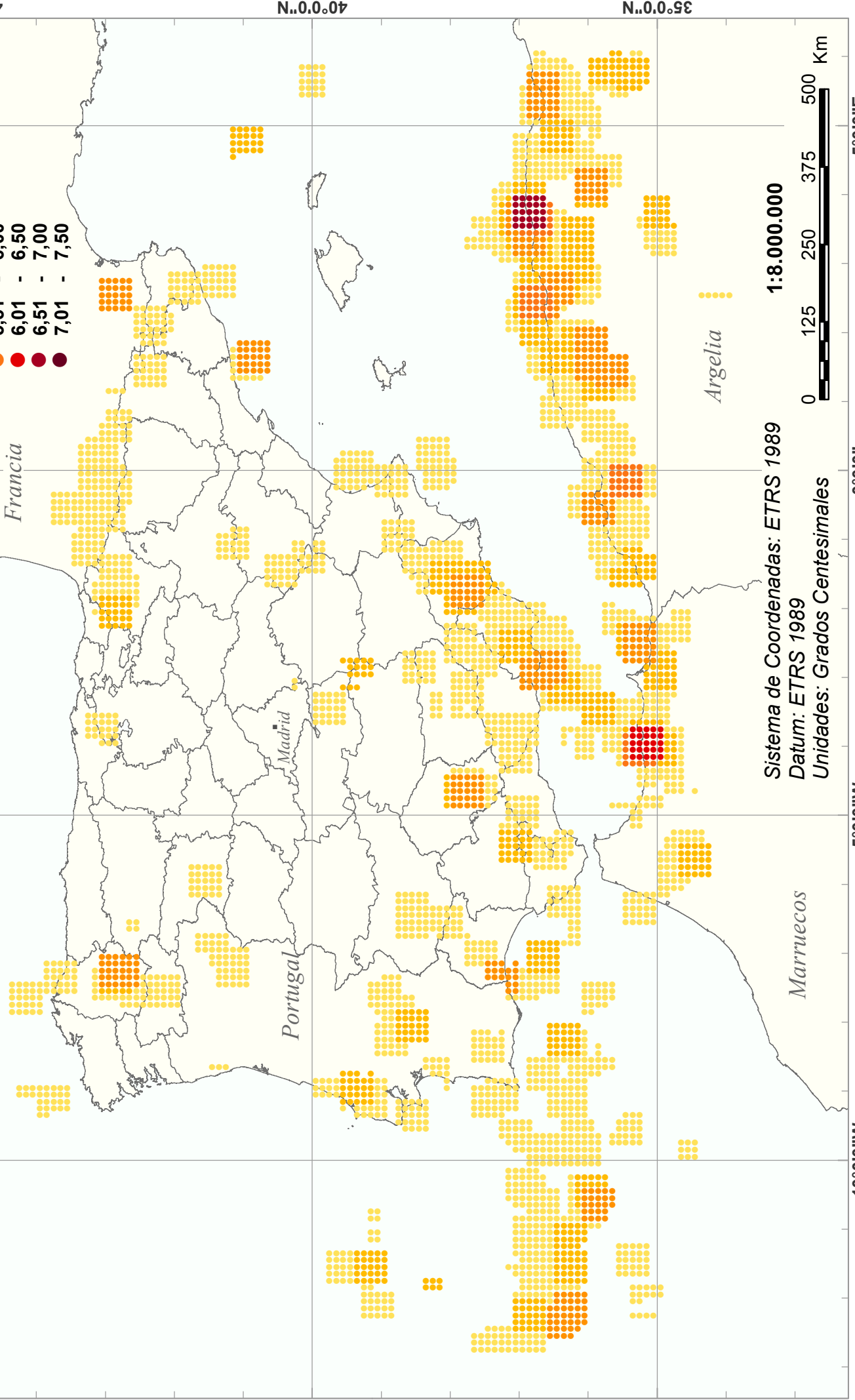
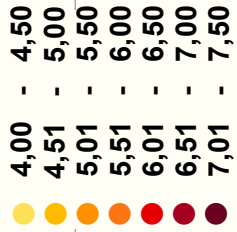
10°0'0"W 5°0'0"W 0°0'0" 5°0'0"E

45°0'0"N 40°0'0"N 35°0'0"N

10°0'0"W 5°0'0"W 0°0'0" 5°0'0"E

# *Península Ibérica 1985 -2013*

## *Malla 0,5°- Parámetro Magnitud Max.*



Sistema de Coordenadas: ETRS 1989  
Datum: ETRS 1989  
Unidades: Grados Centesimales

1:8.000.000

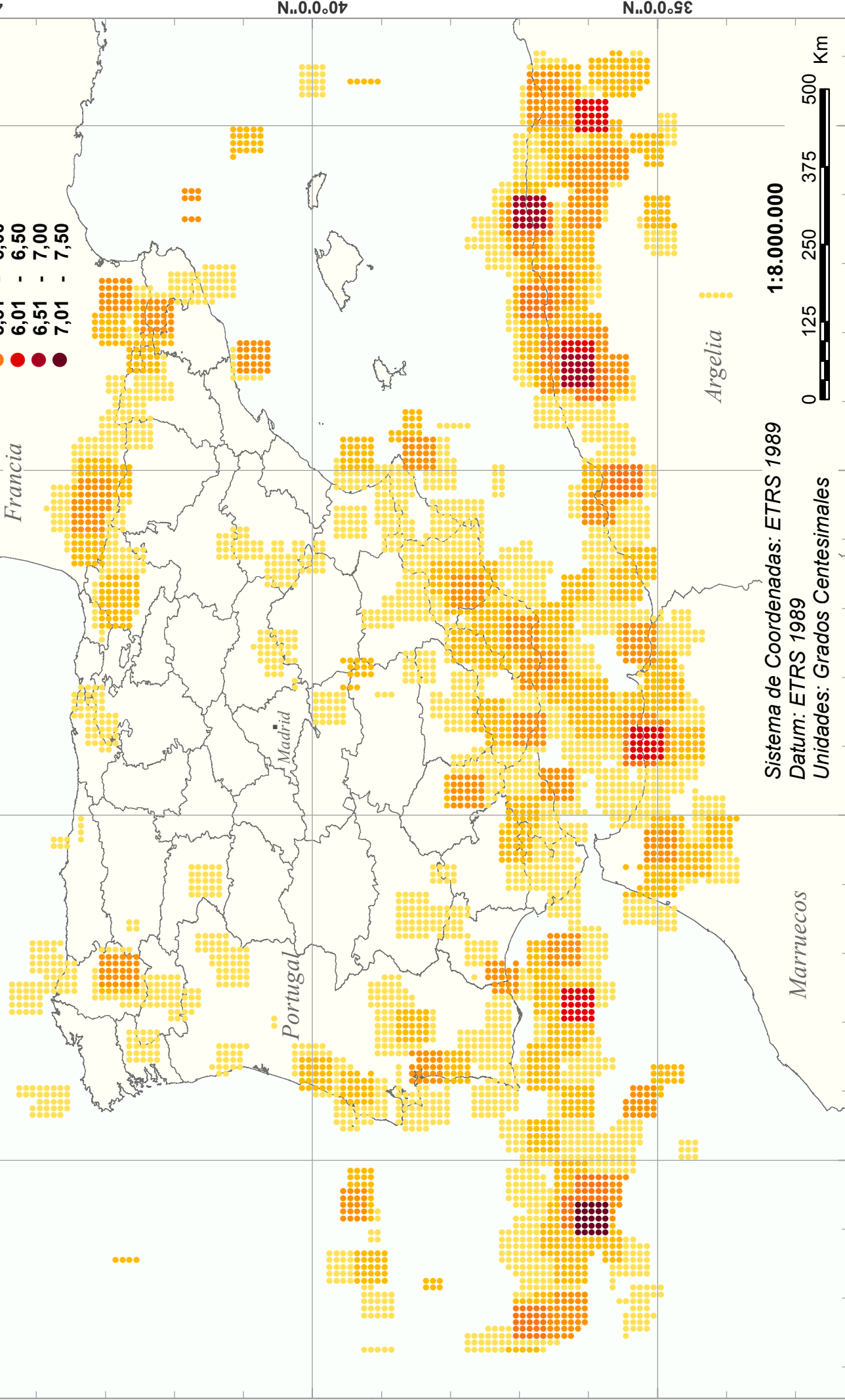
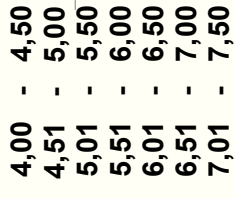
45°0'0"N 40°0'0"N 35°0'0"N

10°0'0"W 5°0'0"W 0°0'0" 5°0'0"E

10°0'0"W 5°0'0"W 0°0'0" 5°0'0"E

# Península Ibérica 1962 - 2013

## Malla 0,5°- Parámetro Magnitud Max.



Sistema de Coordenadas: ETRS 1989  
Datum: ETRS 1989  
Unidades: Grados Centesimales

1:8.000.000

45°0'0"N 40°0'0"N 35°0'0"N

10°0'0"W 5°0'0"W 0°0'0" 5°0'0"E

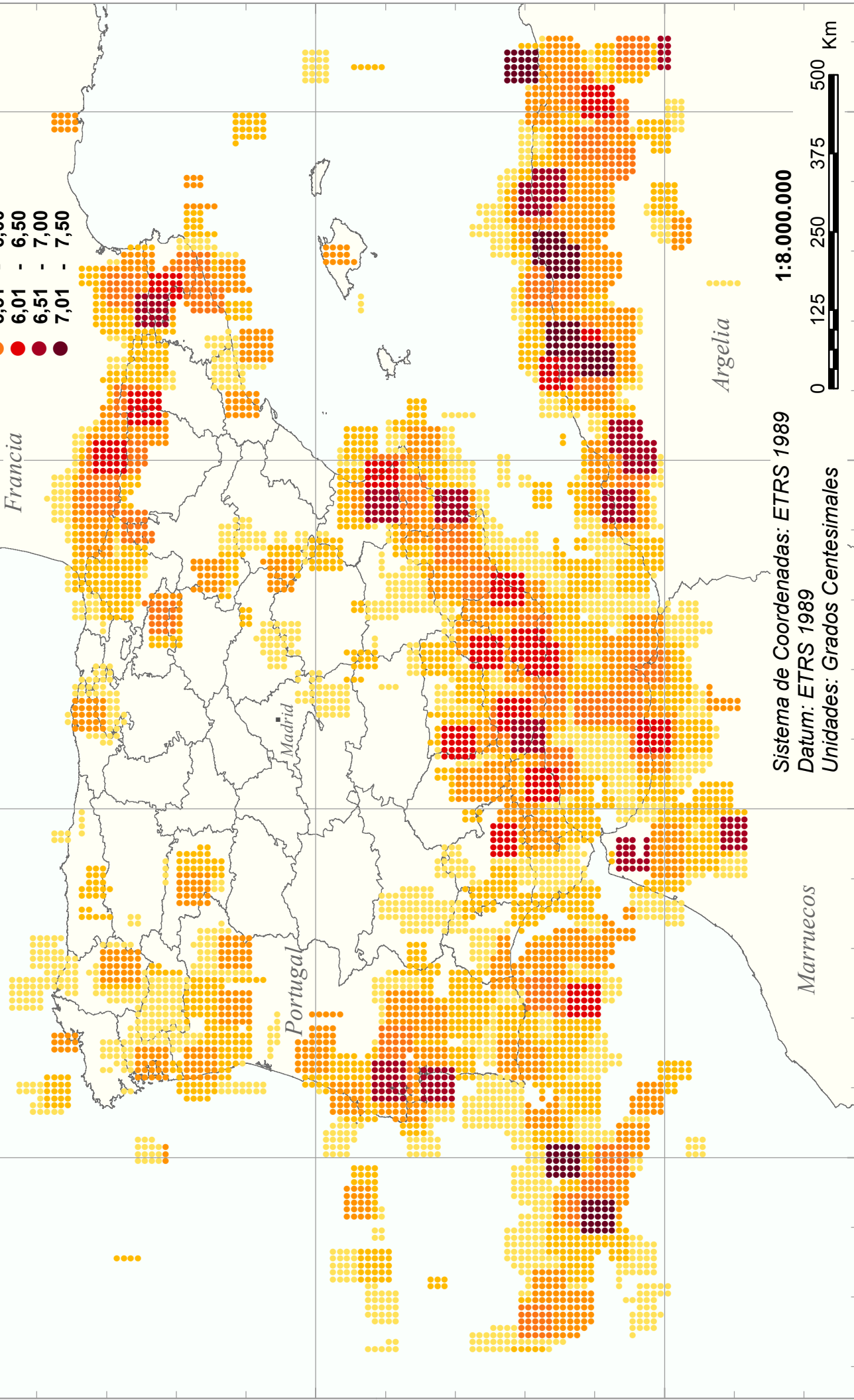
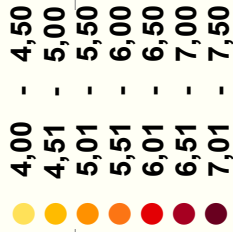
45°0'0"N 40°0'0"N 35°0'0"N

10°0'0"W 5°0'0"W 0°0'0" 5°0'0"E



# Península Ibérica 1048 -2013

## Malla 0,5°- Parámetro Magnitud Max.



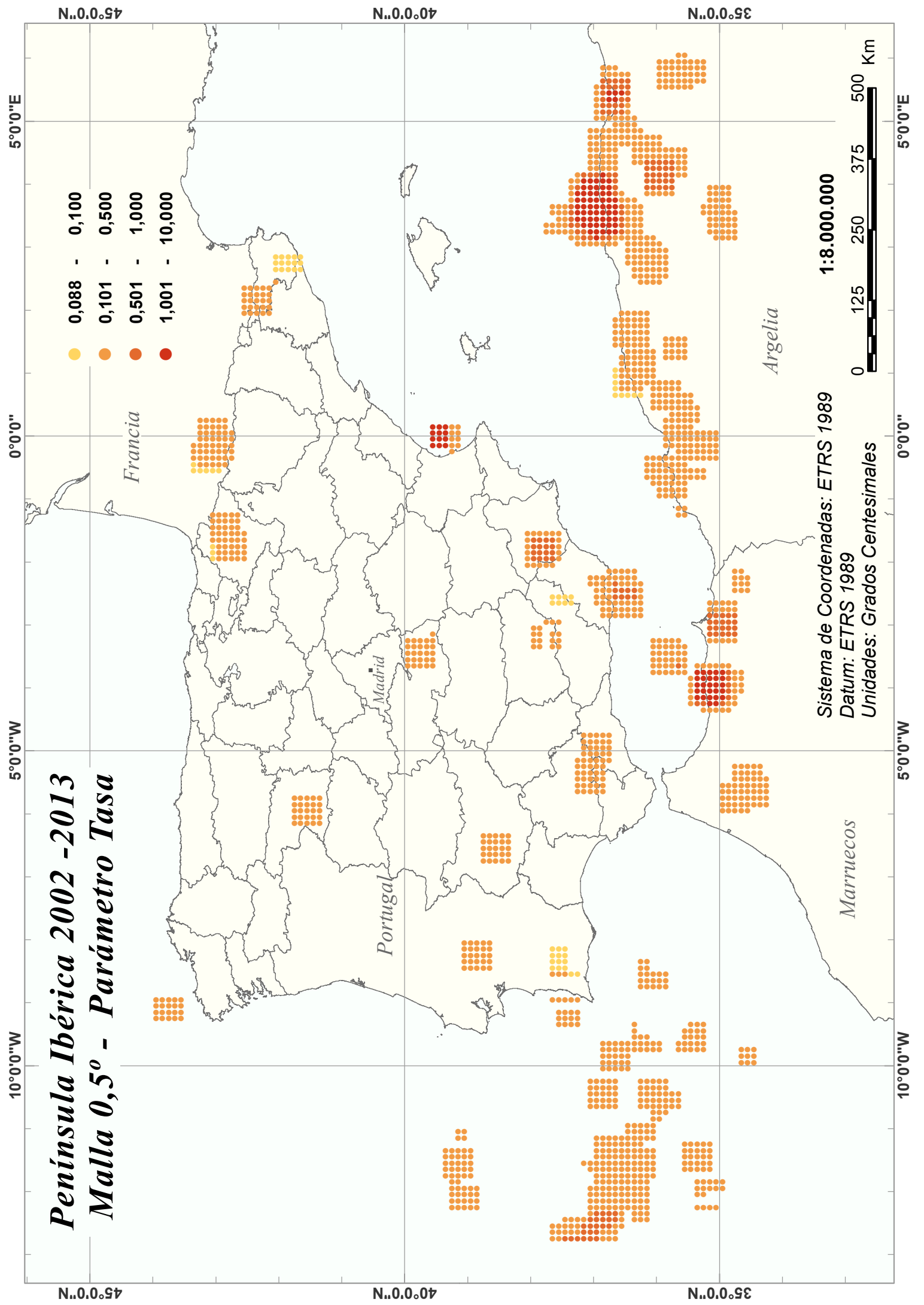
Sistema de Coordenadas: ETRS 1989  
Datum: ETRS 1989  
Unidades: Grados Centesimales

1:8.000.000



10°0'0"W 5°0'0"W 0°0'0" 5°0'0"E

45°0'0"N 40°0'0"N 35°0'0"N



# Península Ibérica 1985 - 2013

## Malla 0,5° - Parámetro Tasa

- 0,031 - 0,100
- 0,101 - 0,500
- 0,501 - 1,000
- 1,001 - 10,000

Francia

Portugal

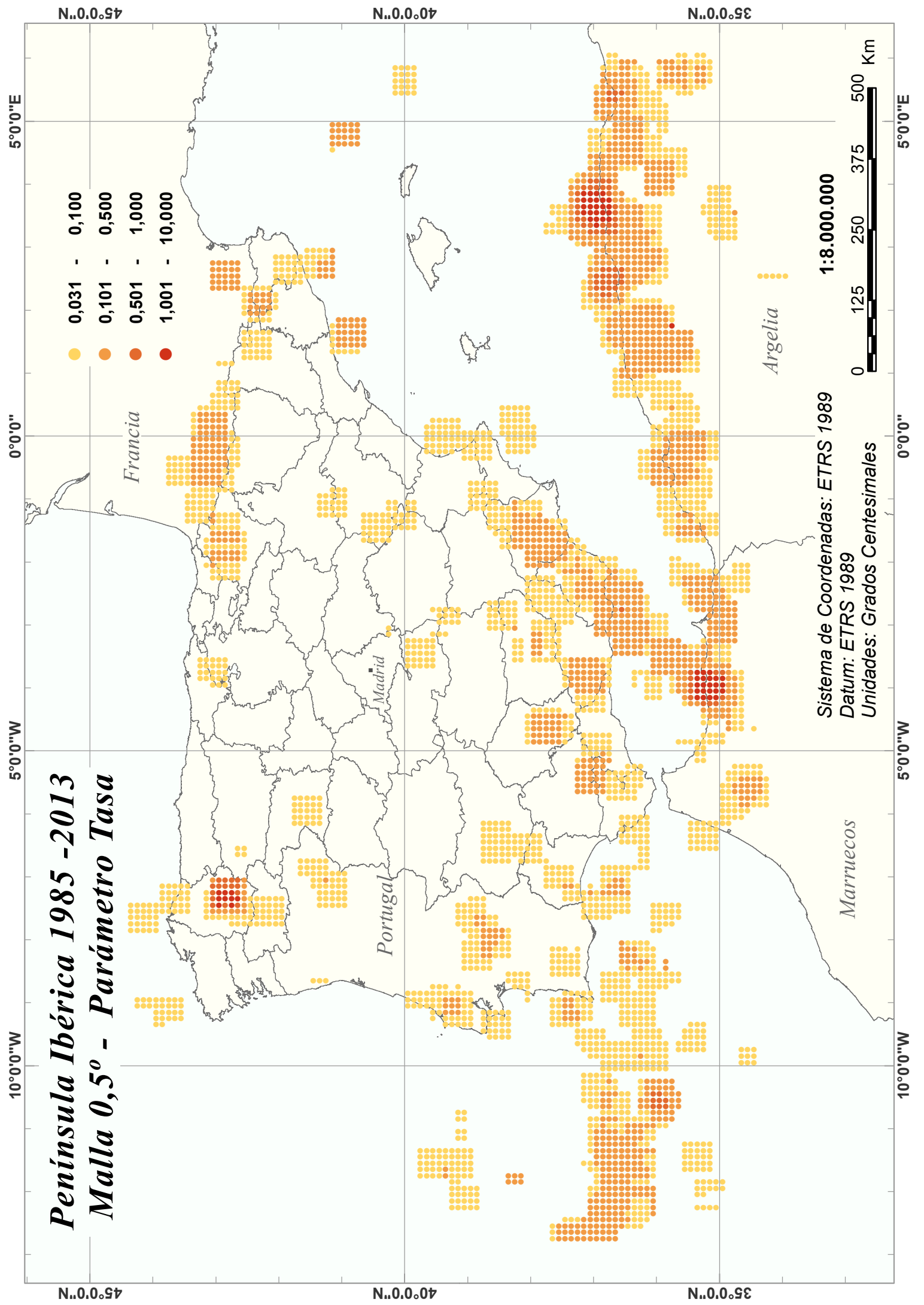
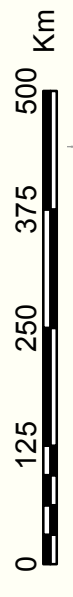
Madrid

Argelia

Marruecos

Sistema de Coordenadas: ETRS 1989  
Datum: ETRS 1989  
Unidades: Grados Centesimales

1:8.000.000



45°0'0"N

0°0'0"

5°0'0"W

10°0'0"W

5°0'0"E

40°0'0"N

35°0'0"N

0°0'0"

5°0'0"W

10°0'0"W

5°0'0"E

45°0'0"N

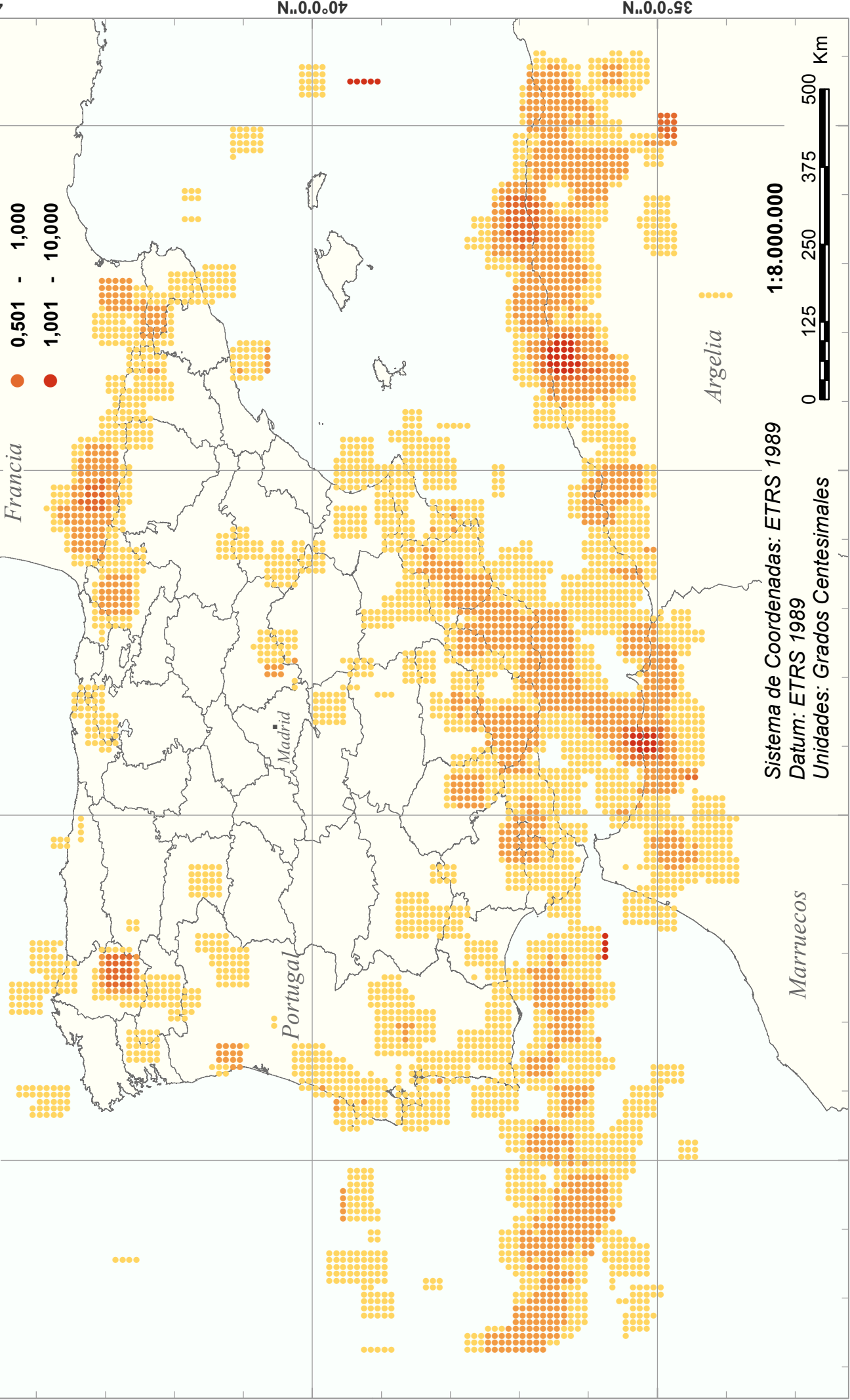
40°0'0"N

35°0'0"N

# Península Ibérica 1962 - 2013

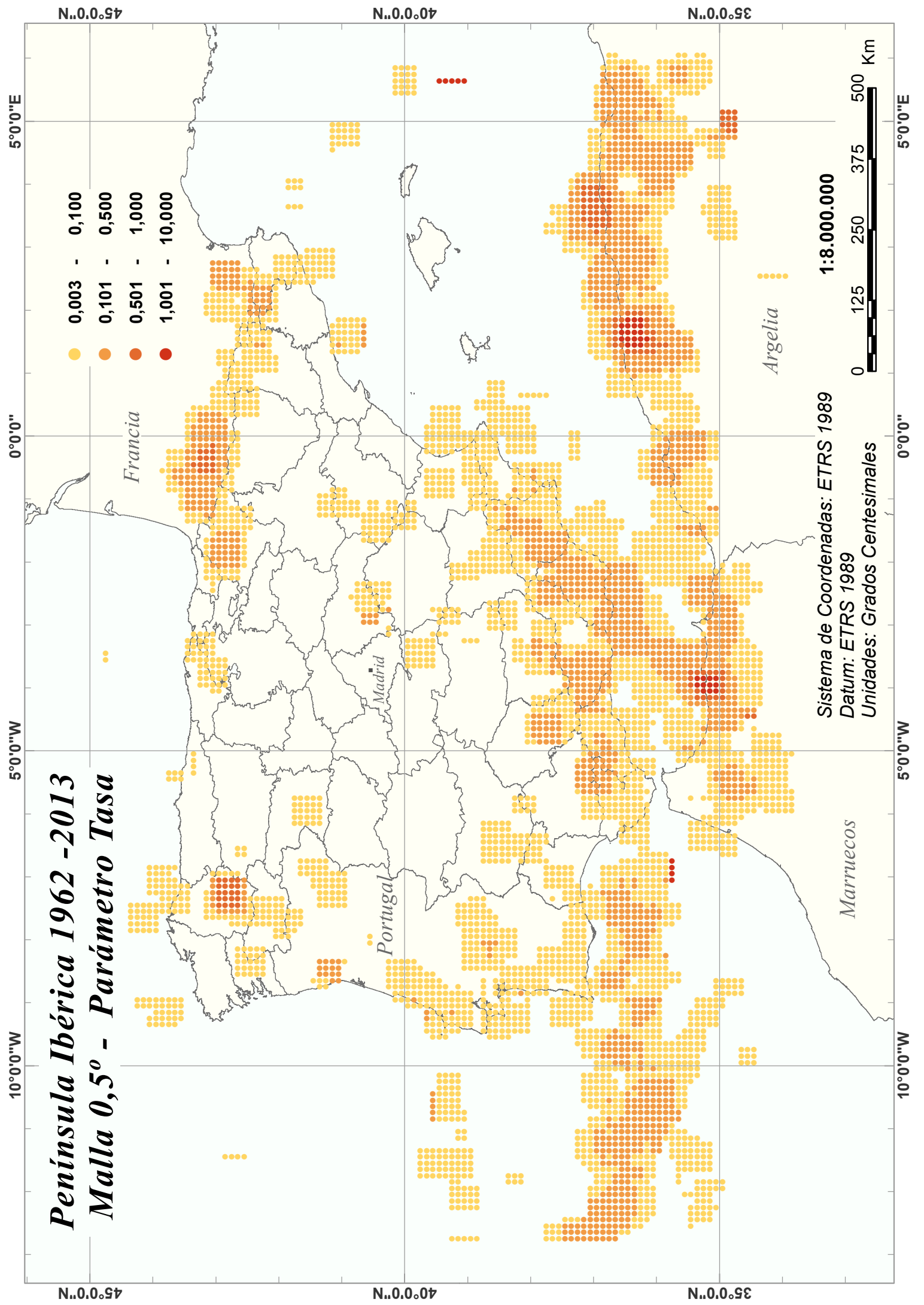
## Malla 0,5° - Parámetro Tasa

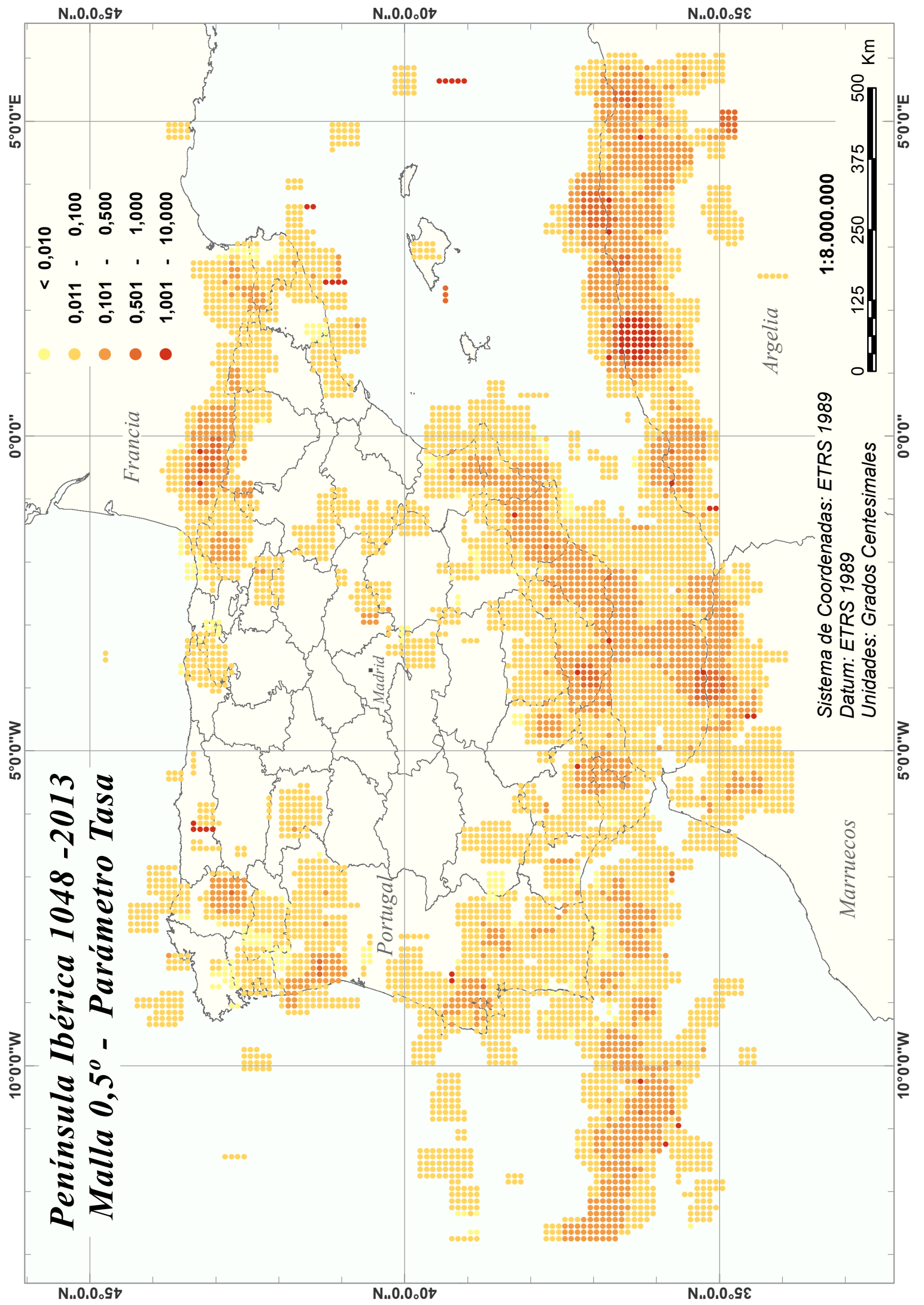
- 0,003 - 0,100
- 0,101 - 0,500
- 0,501 - 1,000
- 1,001 - 10,000



Sistema de Coordenadas: ETRS 1989  
Datum: ETRS 1989  
Unidades: Grados Centesimales

1:8.000.000





# Península Ibérica 2002 - 2013

## Malla 0,2° - Parámetro Beta

- 10,992 - 4,140
- 4,139 - 3,220
- 3,219 - 2,300
- 2,299 - 1,380
- 1,379 - 0,451

Francia

Portugal

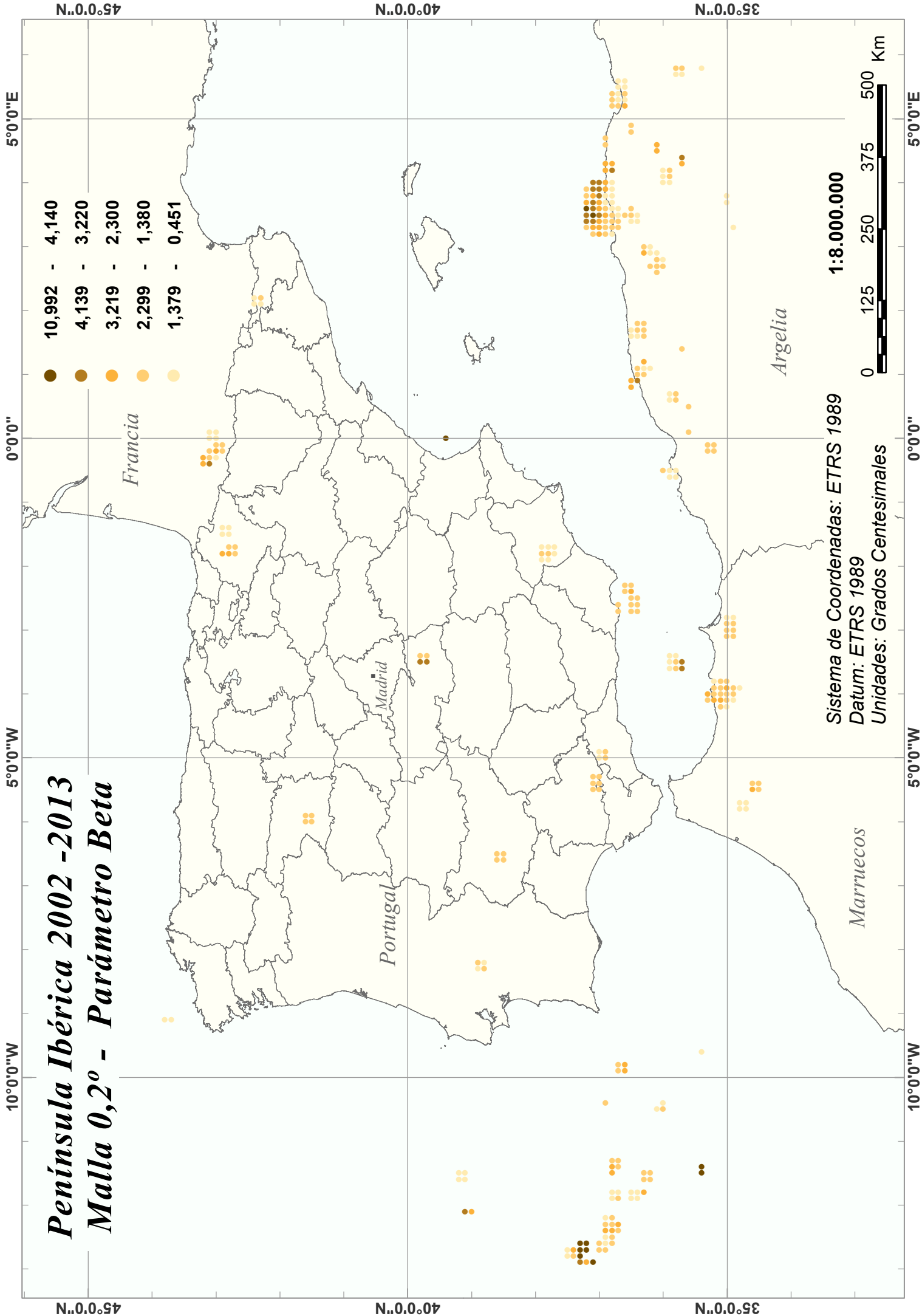
Madrid

Argelia

Marruecos

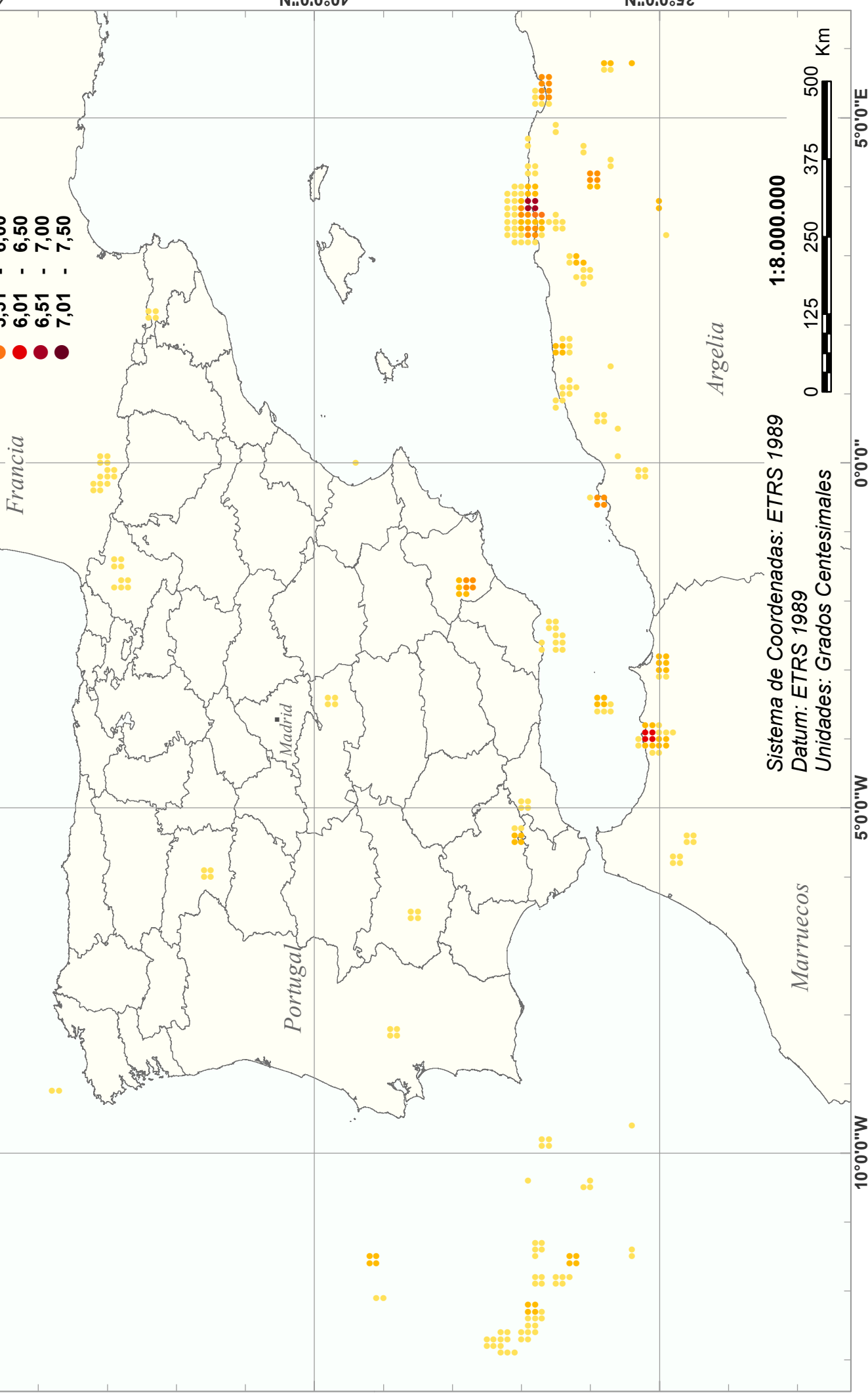
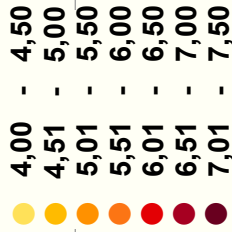
Sistema de Coordenadas: ETRS 1989  
Datum: ETRS 1989  
Unidades: Grados Centesimales

1:8.000.000



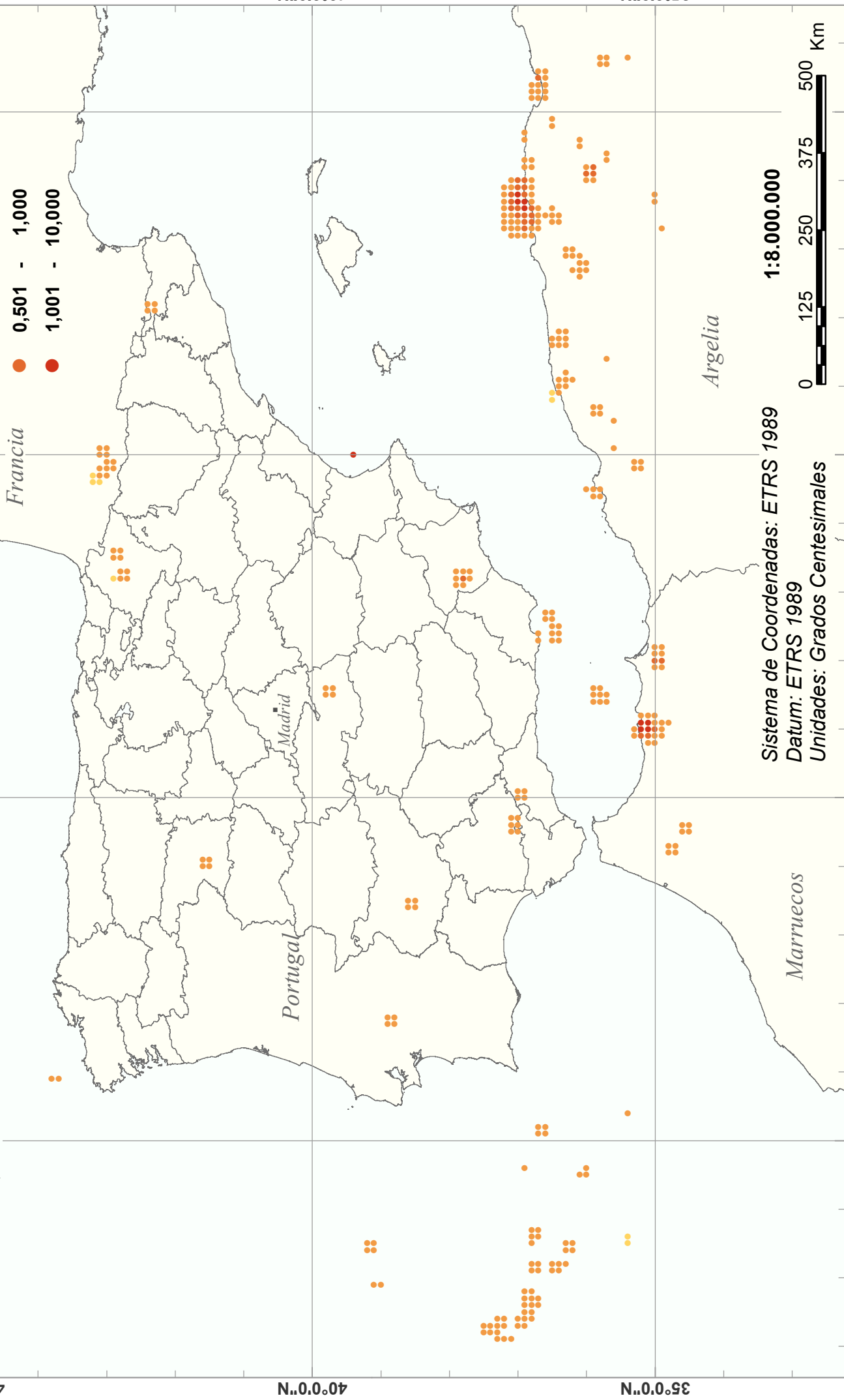
# Península Ibérica 2002 -2013

## Malla 0,2°- Parámetro Magnitud Max.

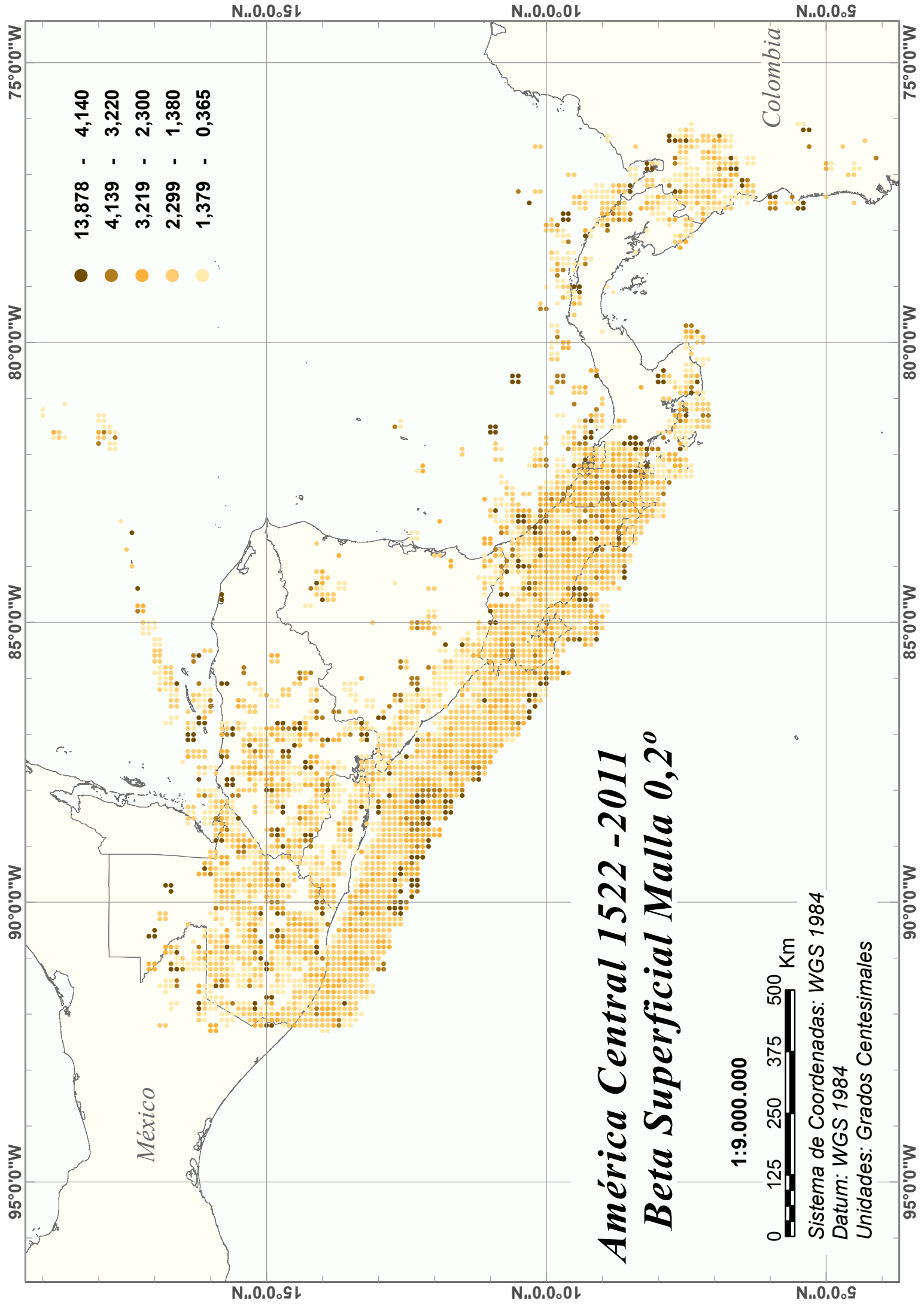


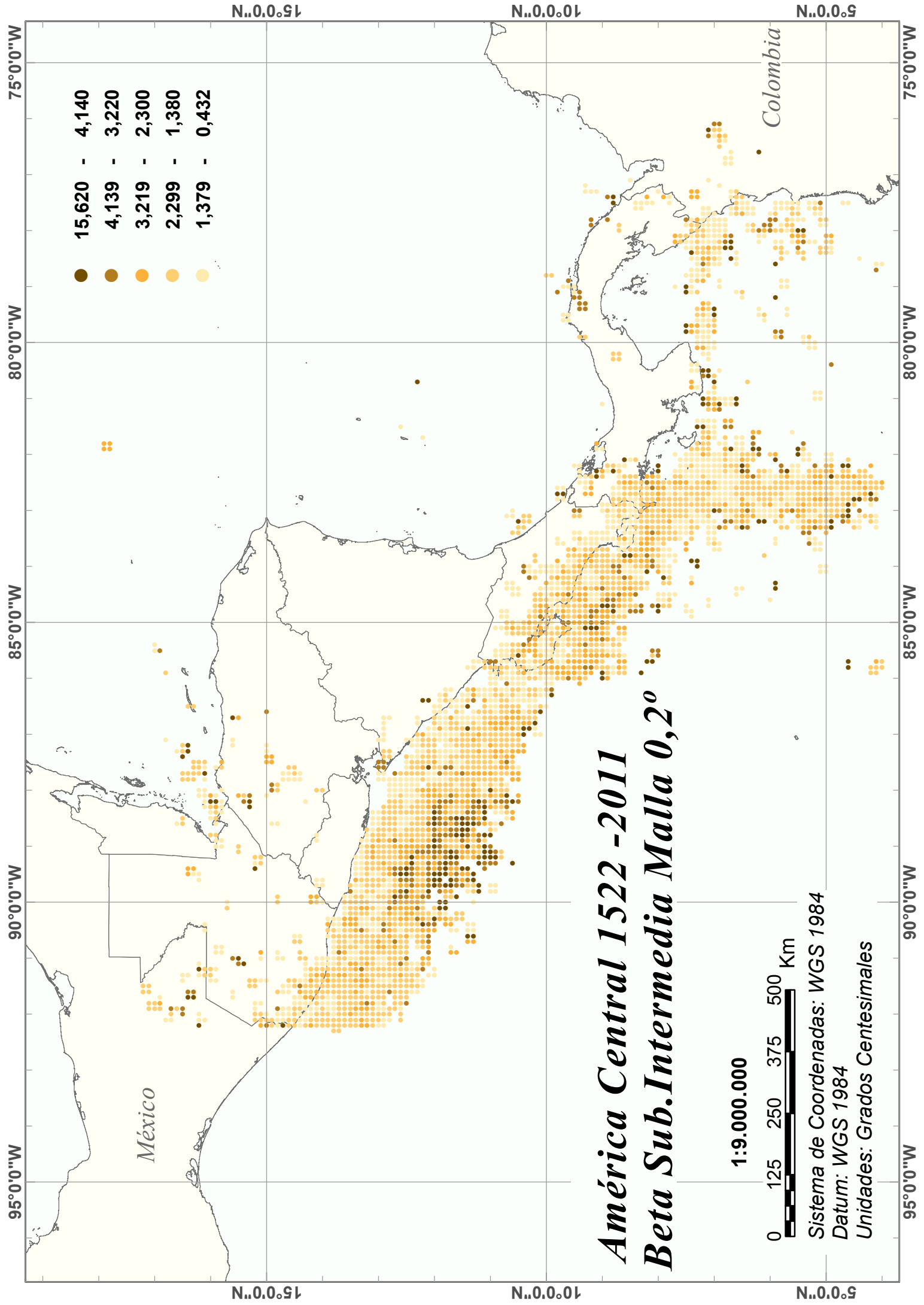
# Península Ibérica 2002 - 2013

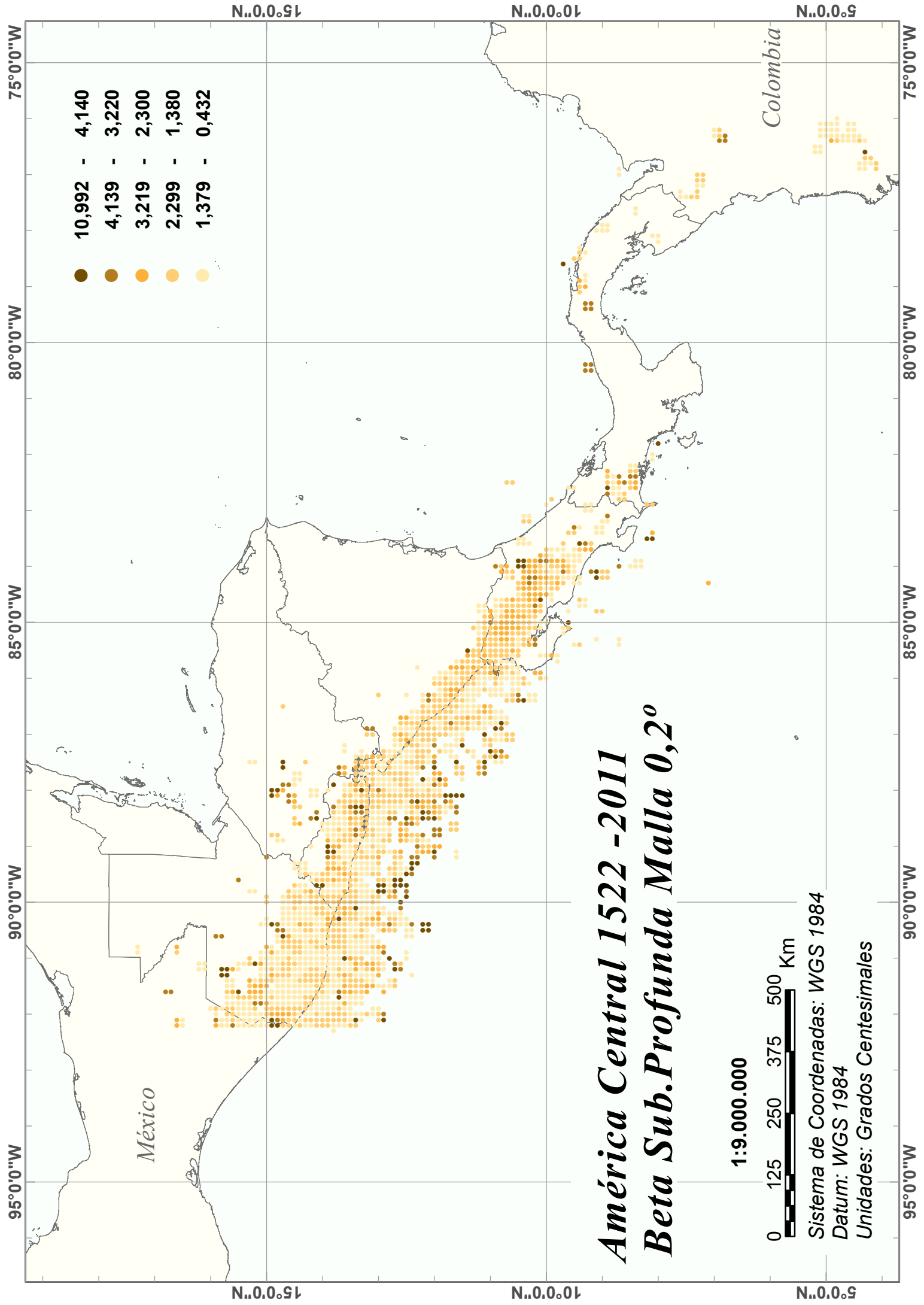
## Malla 0,2° - Parámetro Tasa

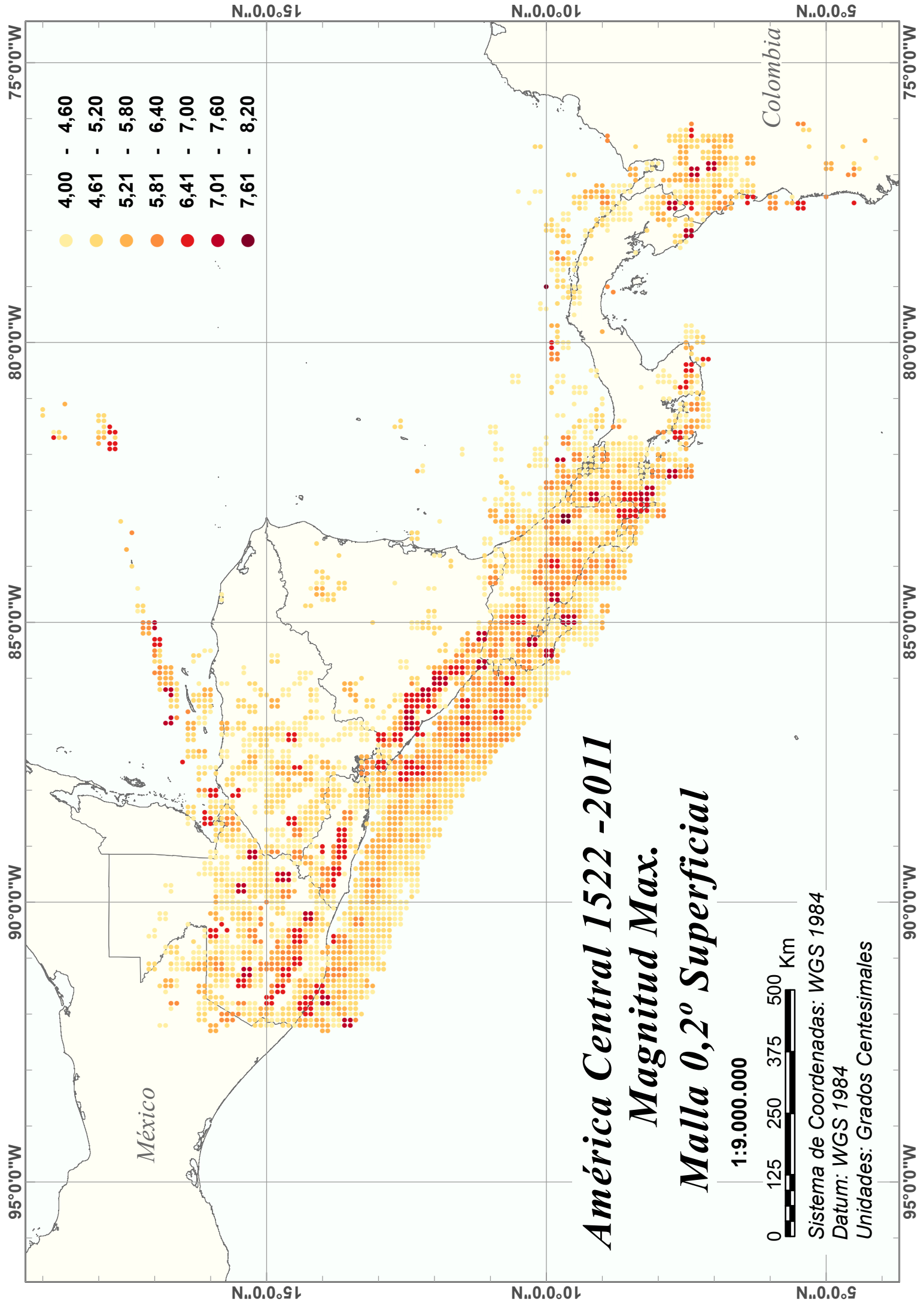


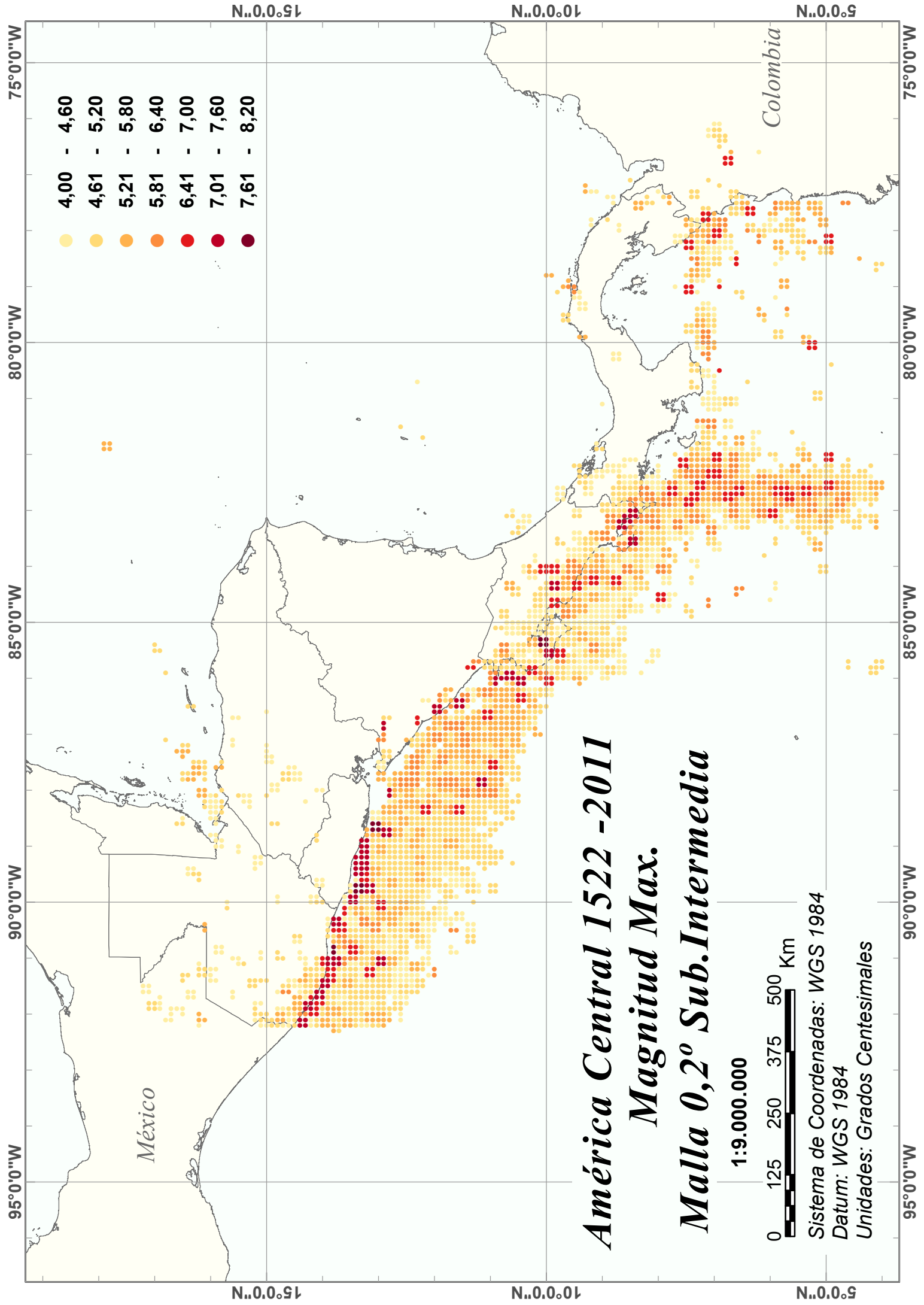


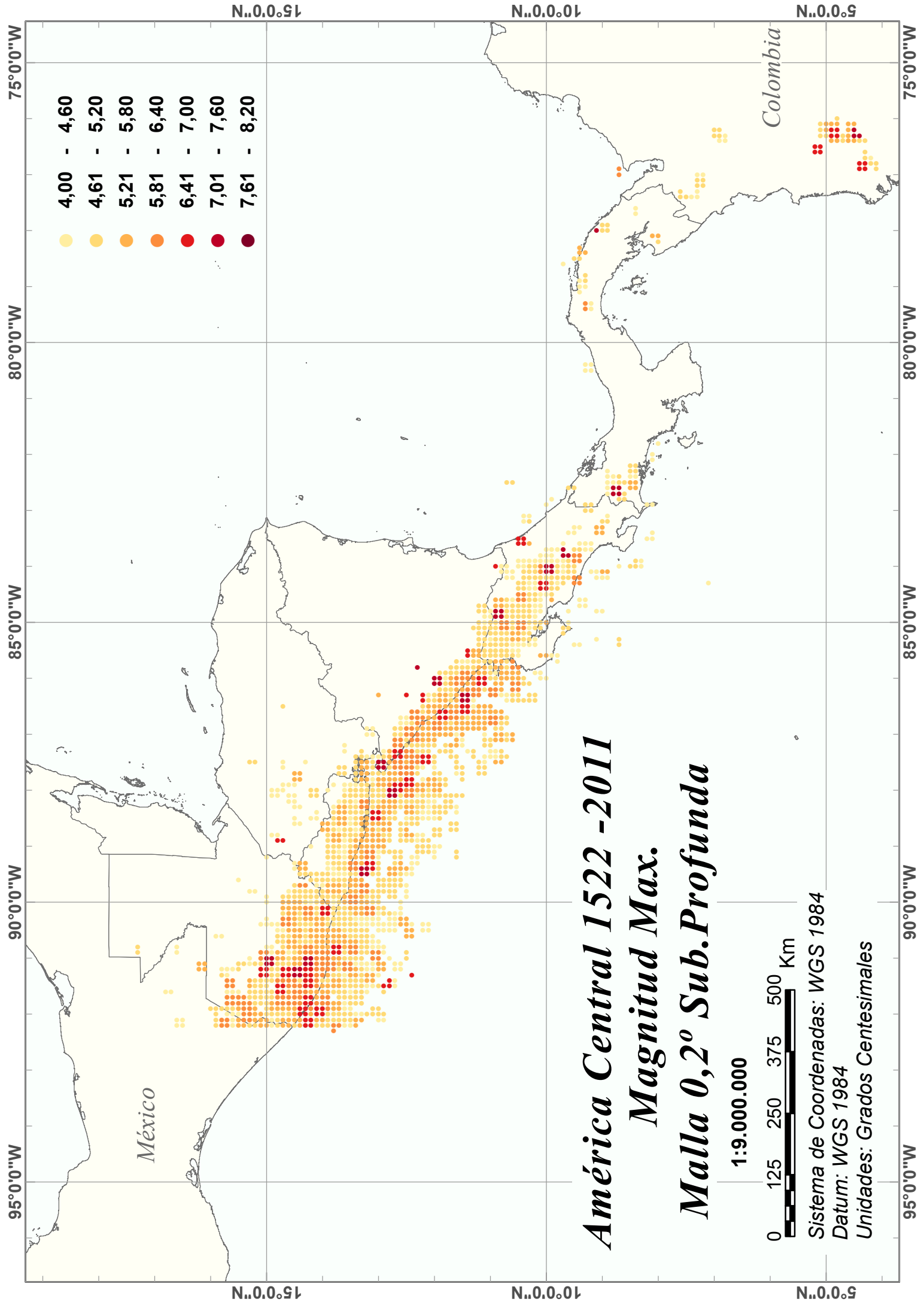


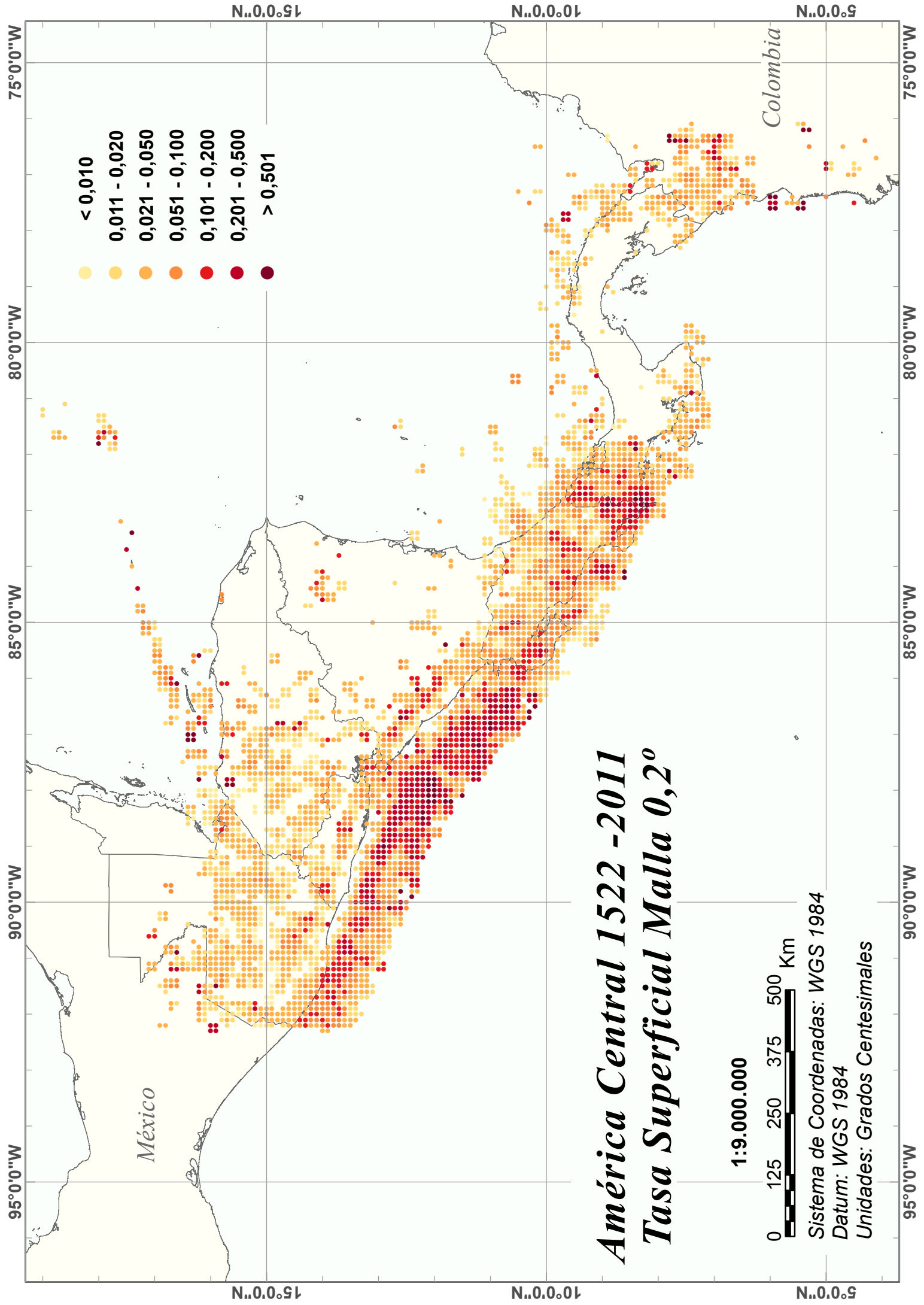


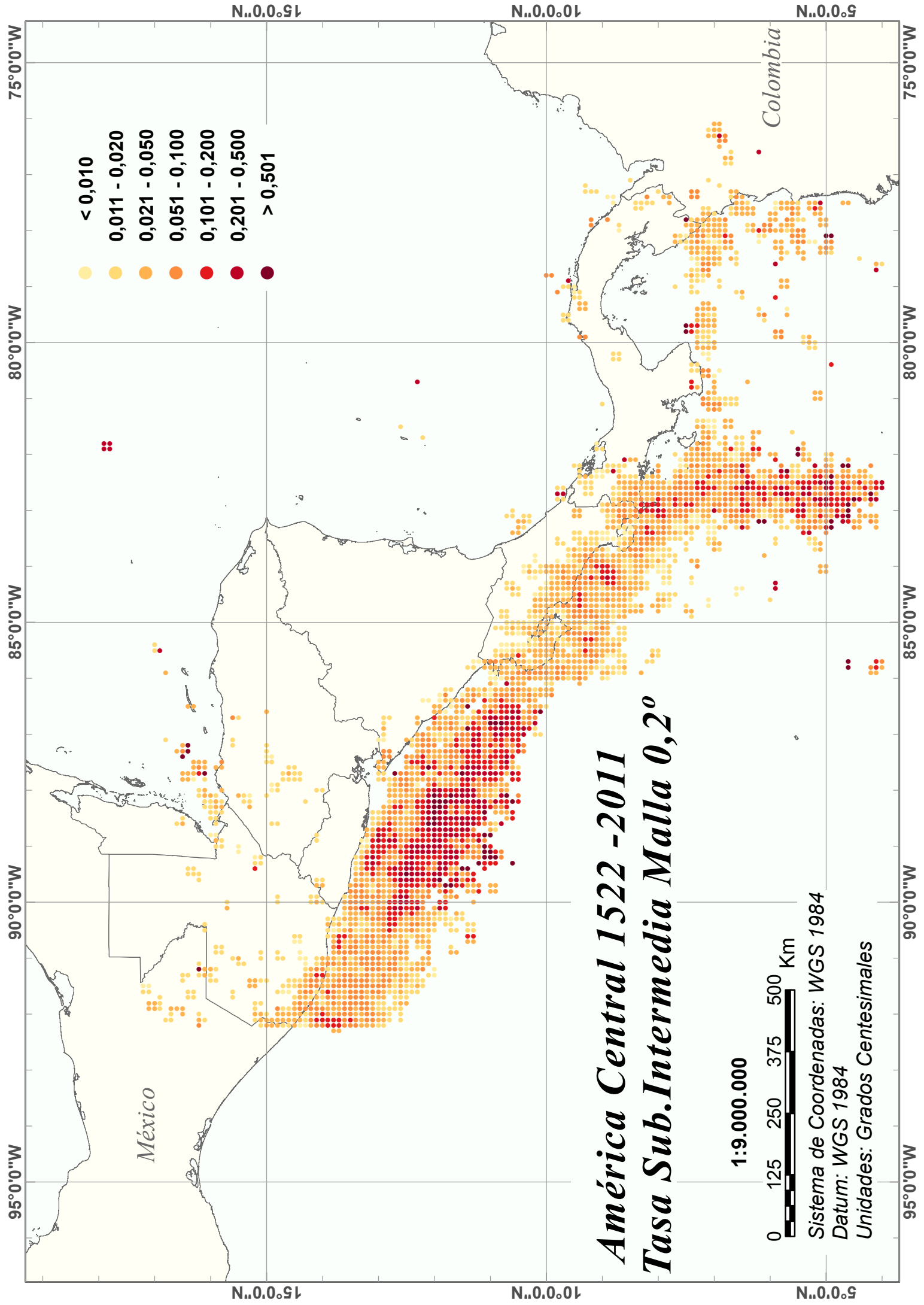












- < 0,010
- 0,011 - 0,020
- 0,021 - 0,050
- 0,051 - 0,100
- 0,101 - 0,200
- 0,201 - 0,500
- > 0,501

# *América Central 1522 - 2011*

## *Tasa Sub.Intermedia Malla 0,2°*

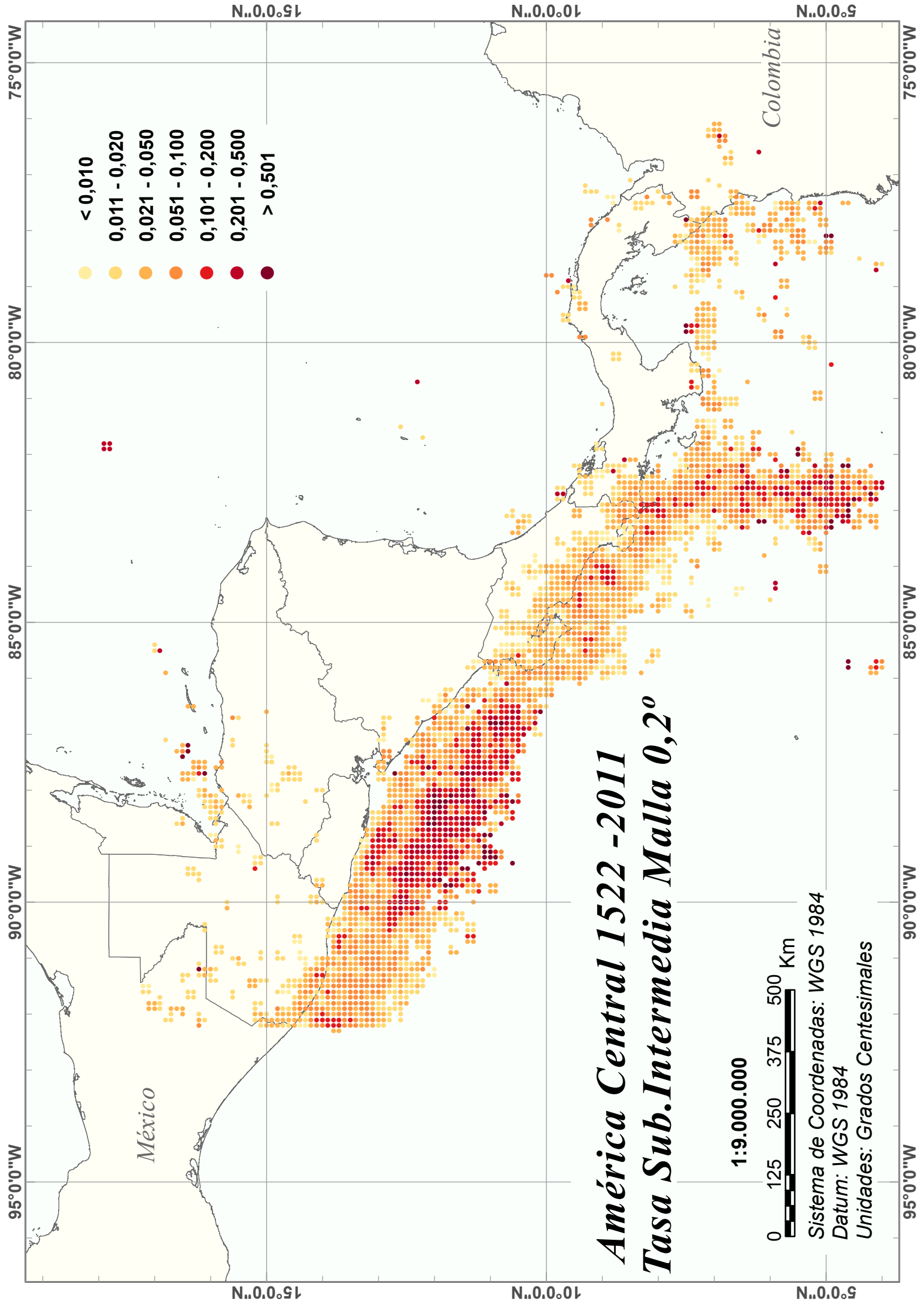
1:9.000.000

0 125 250 375 500 Km

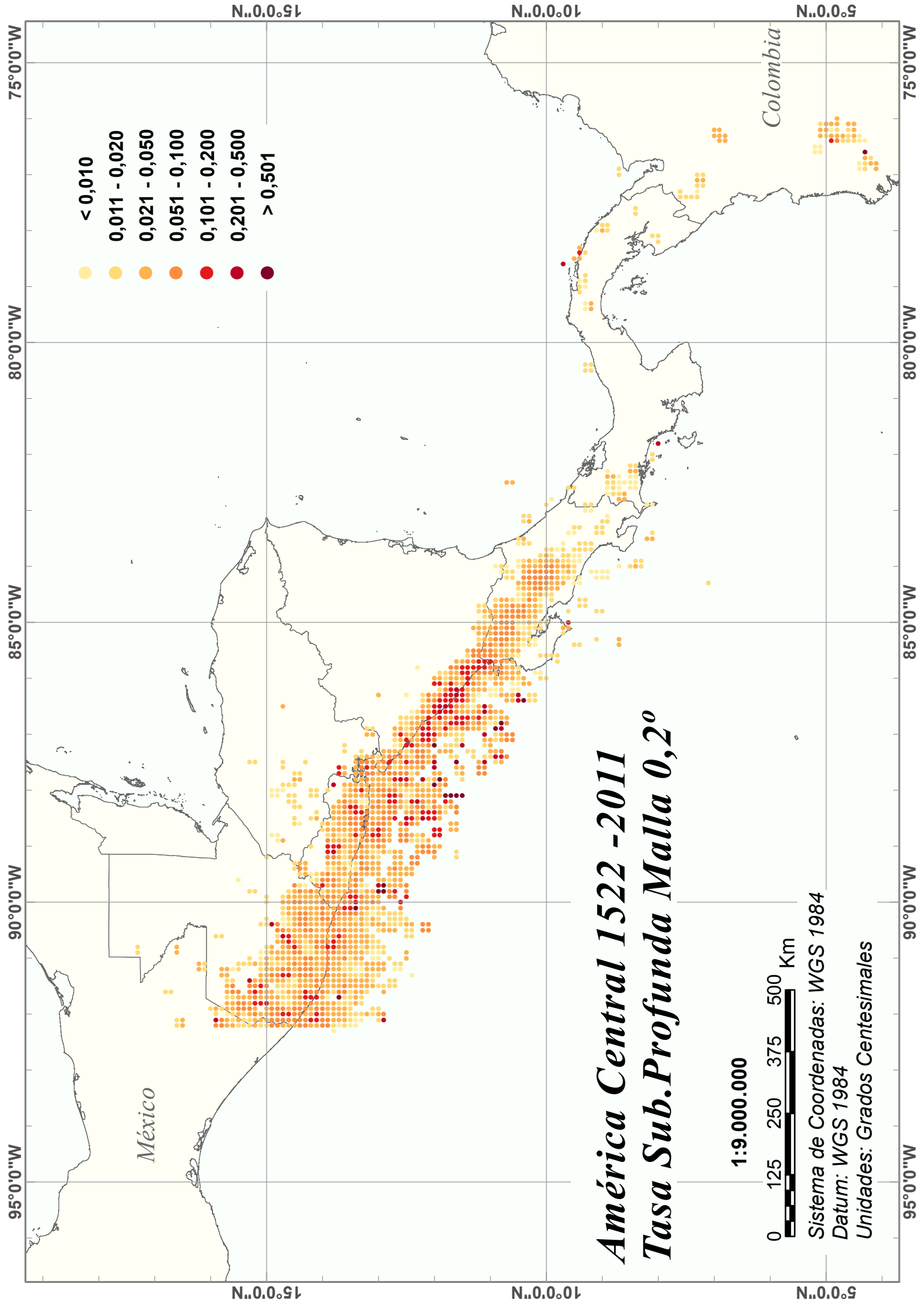
Sistema de Coordenadas: WGS 1984  
Datum: WGS 1984  
Unidades: Grados Centesimales

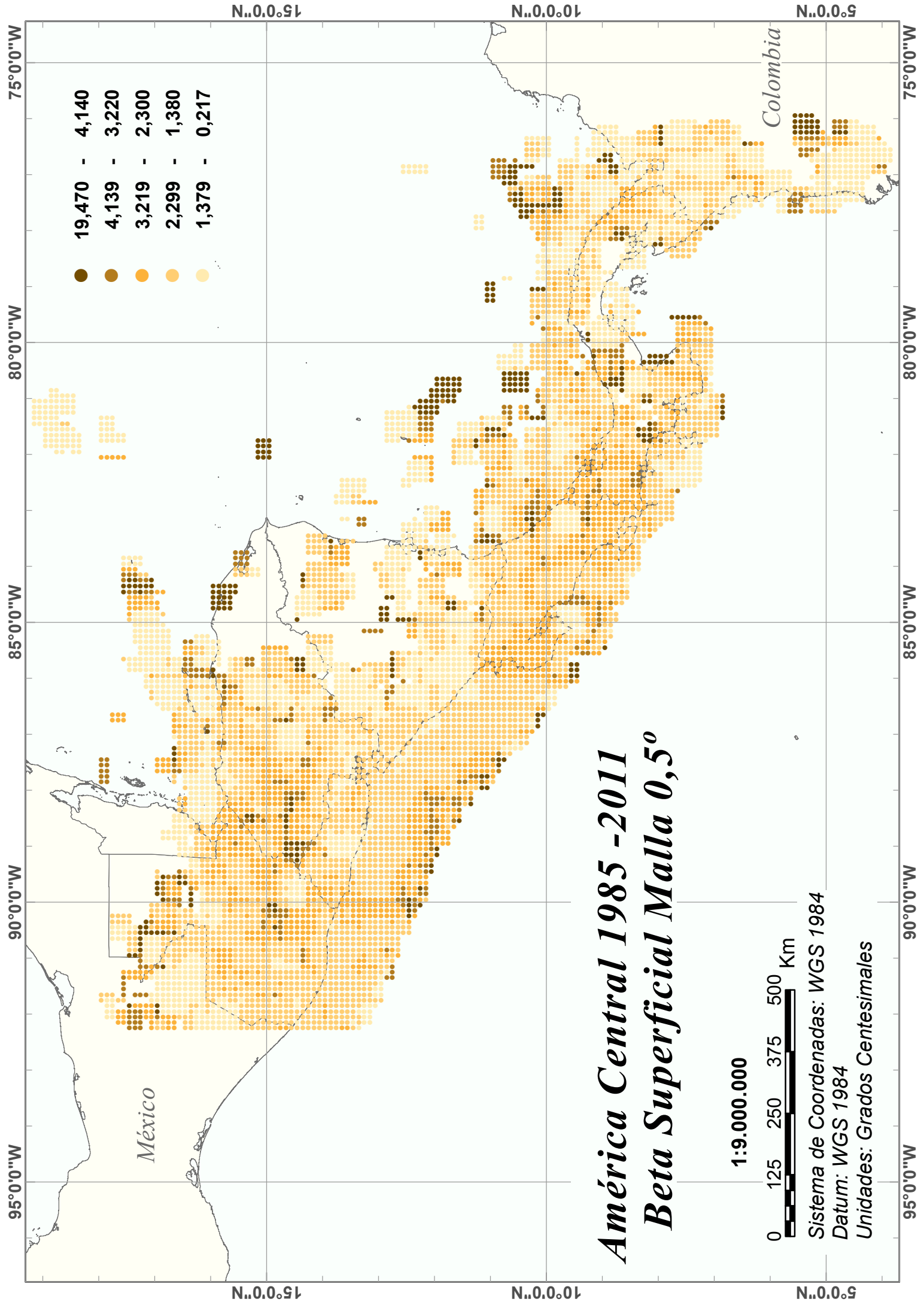
México

Colombia









- 19,470 - 4,140
- 4,139 - 3,220
- 3,219 - 2,300
- 2,299 - 1,380
- 1,379 - 0,217

*América Central 1985 - 2011*  
*Beta Superficial Malla 0,5°*

1:9.000.000



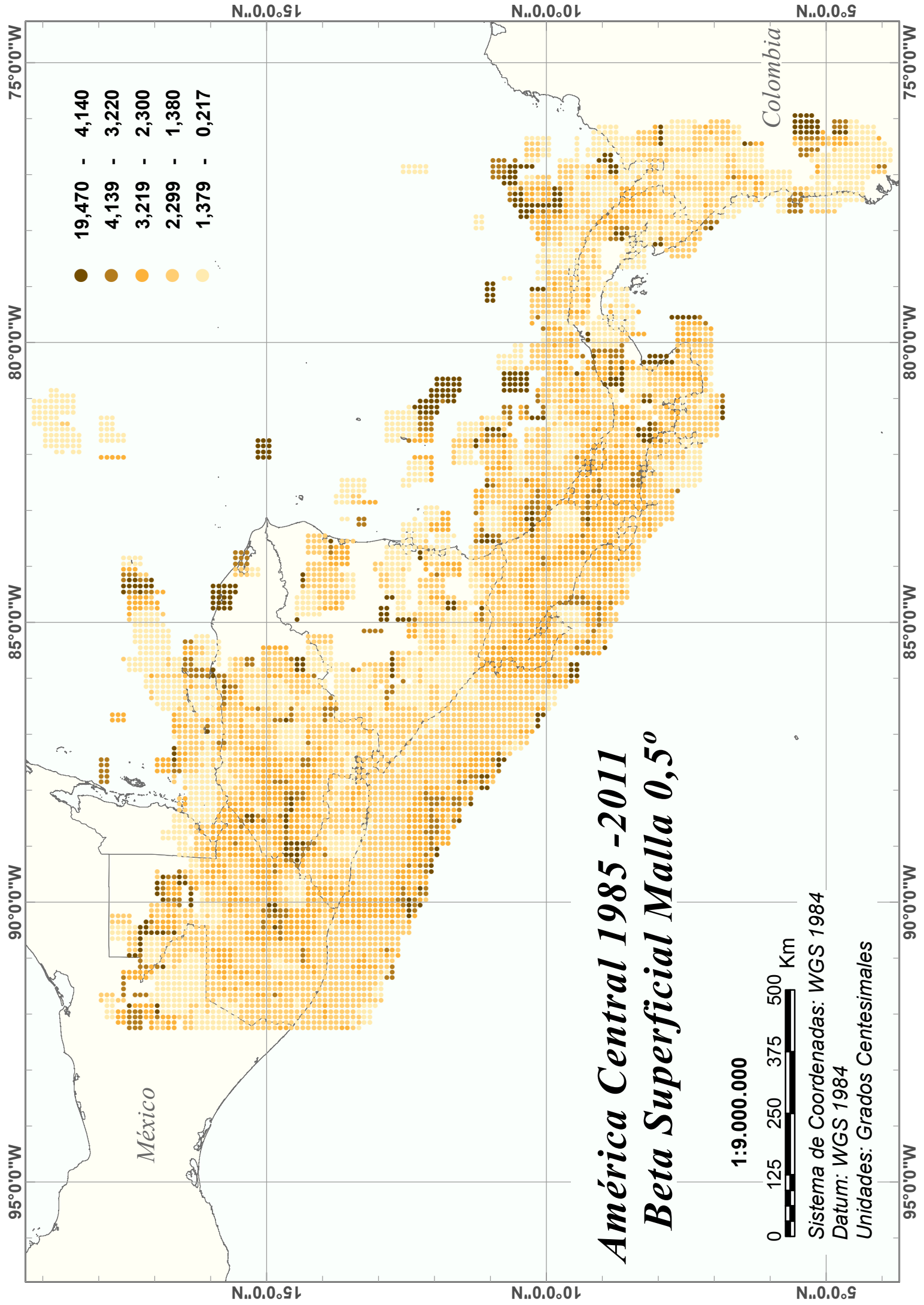
Sistema de Coordenadas: WGS 1984

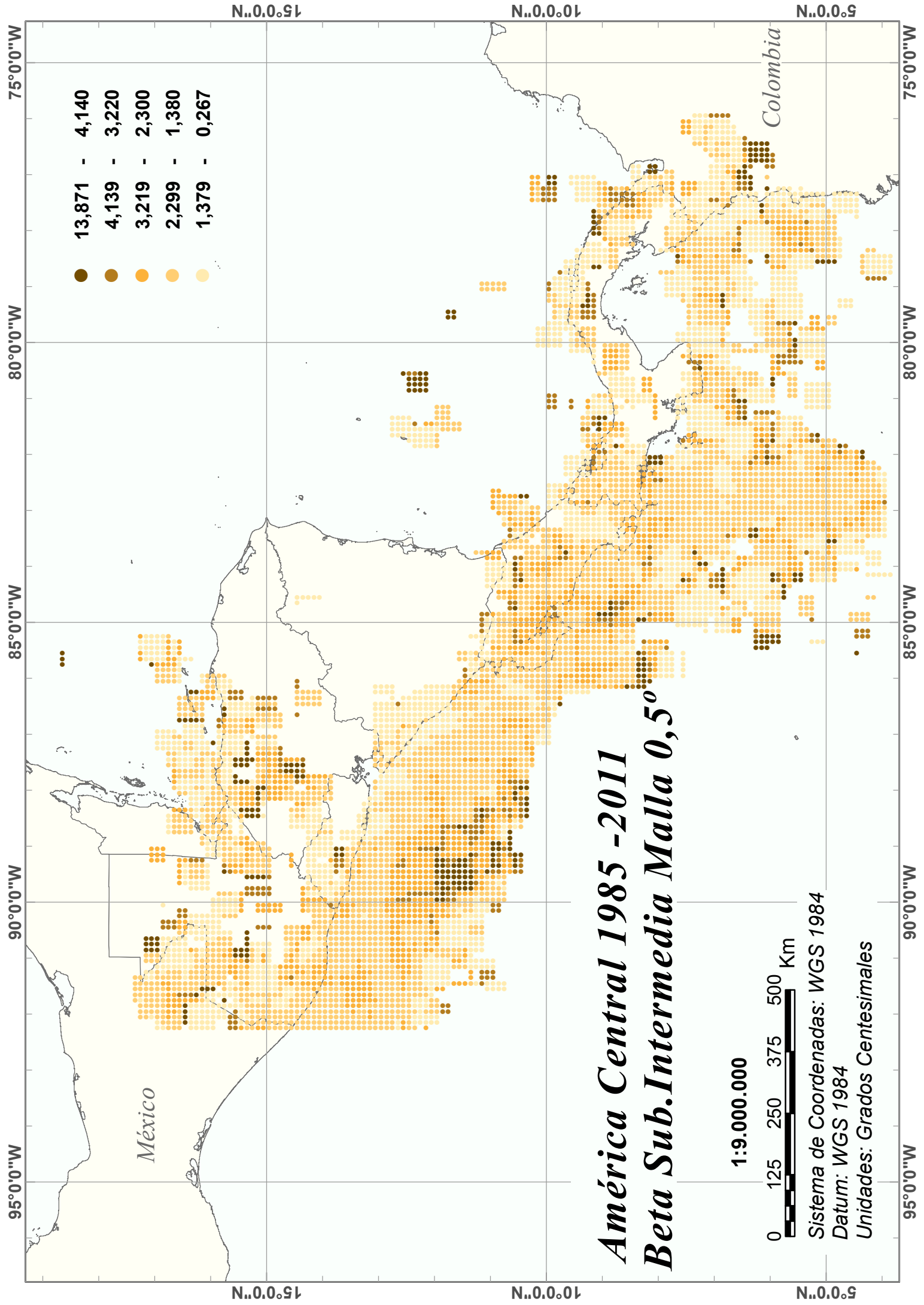
Datum: WGS 1984

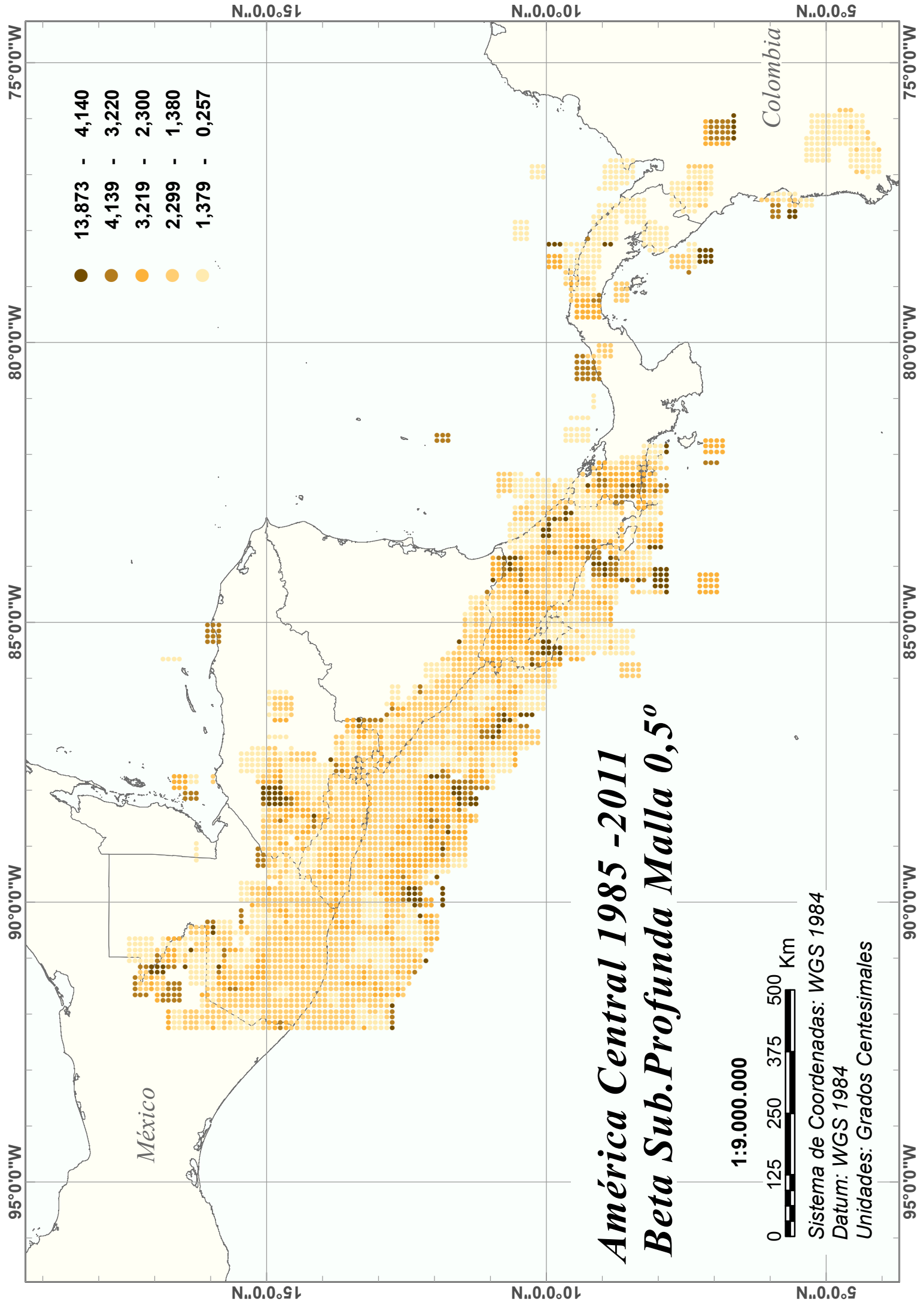
Unidades: Grados Centesimales

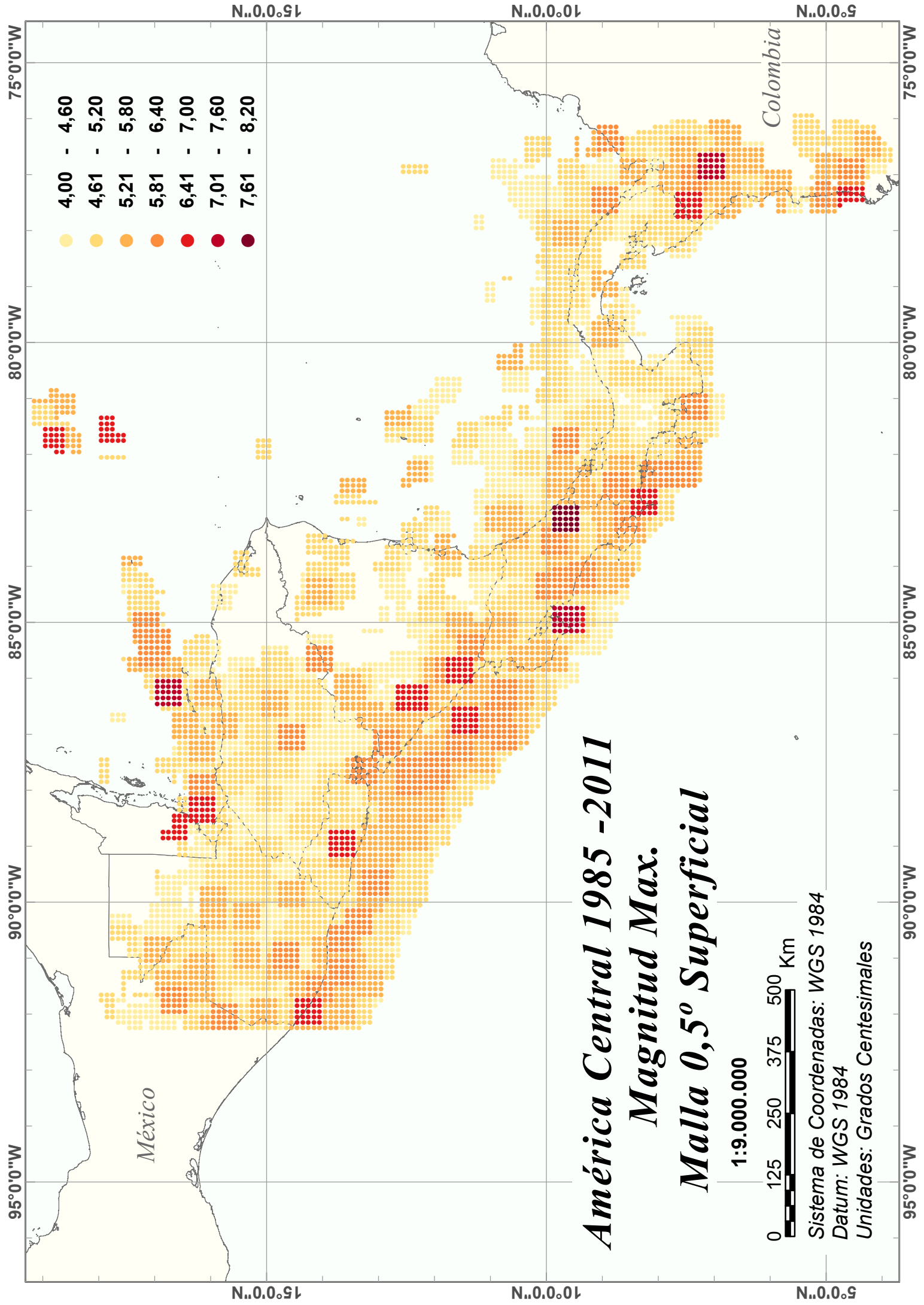
México

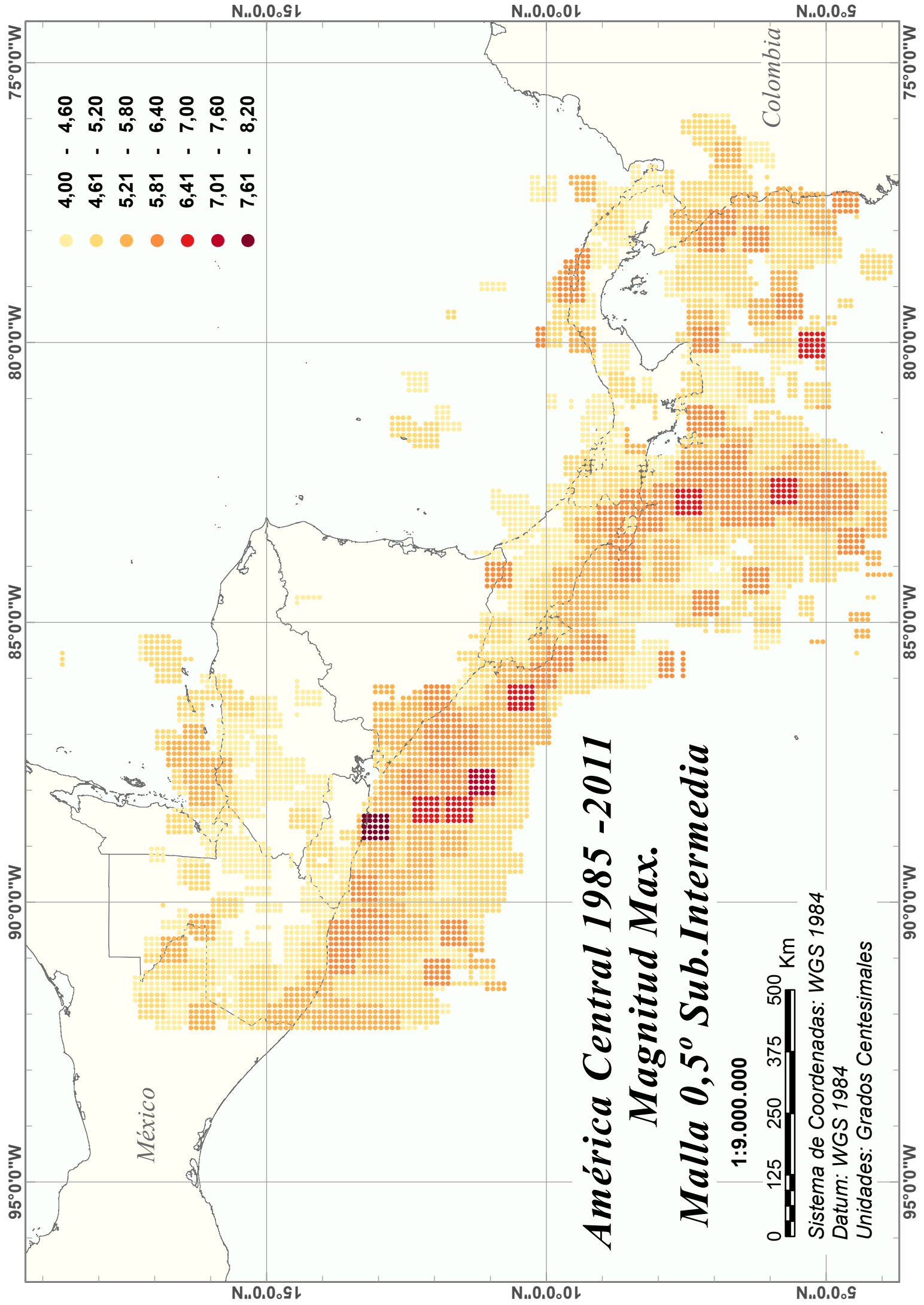
Colombia







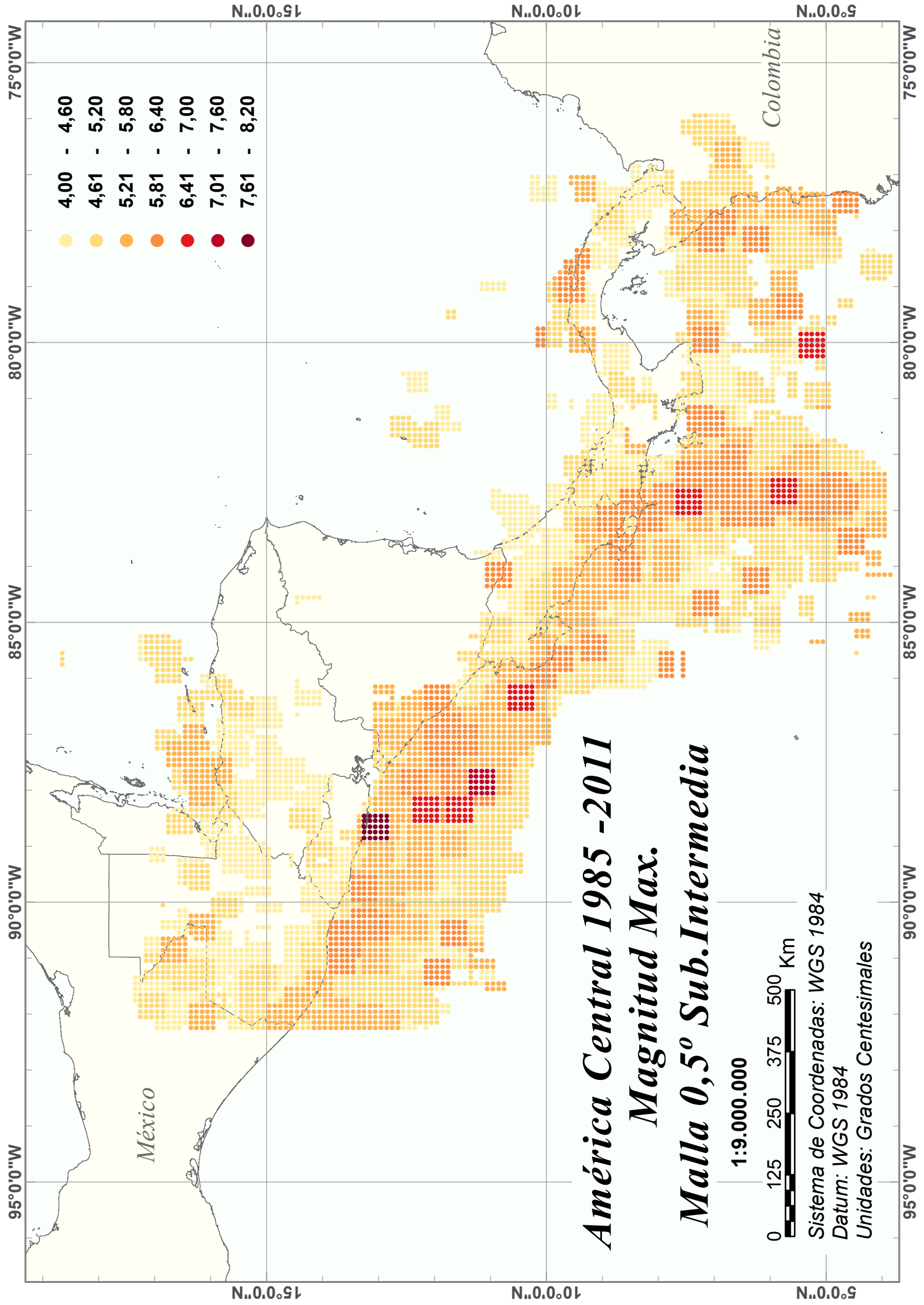


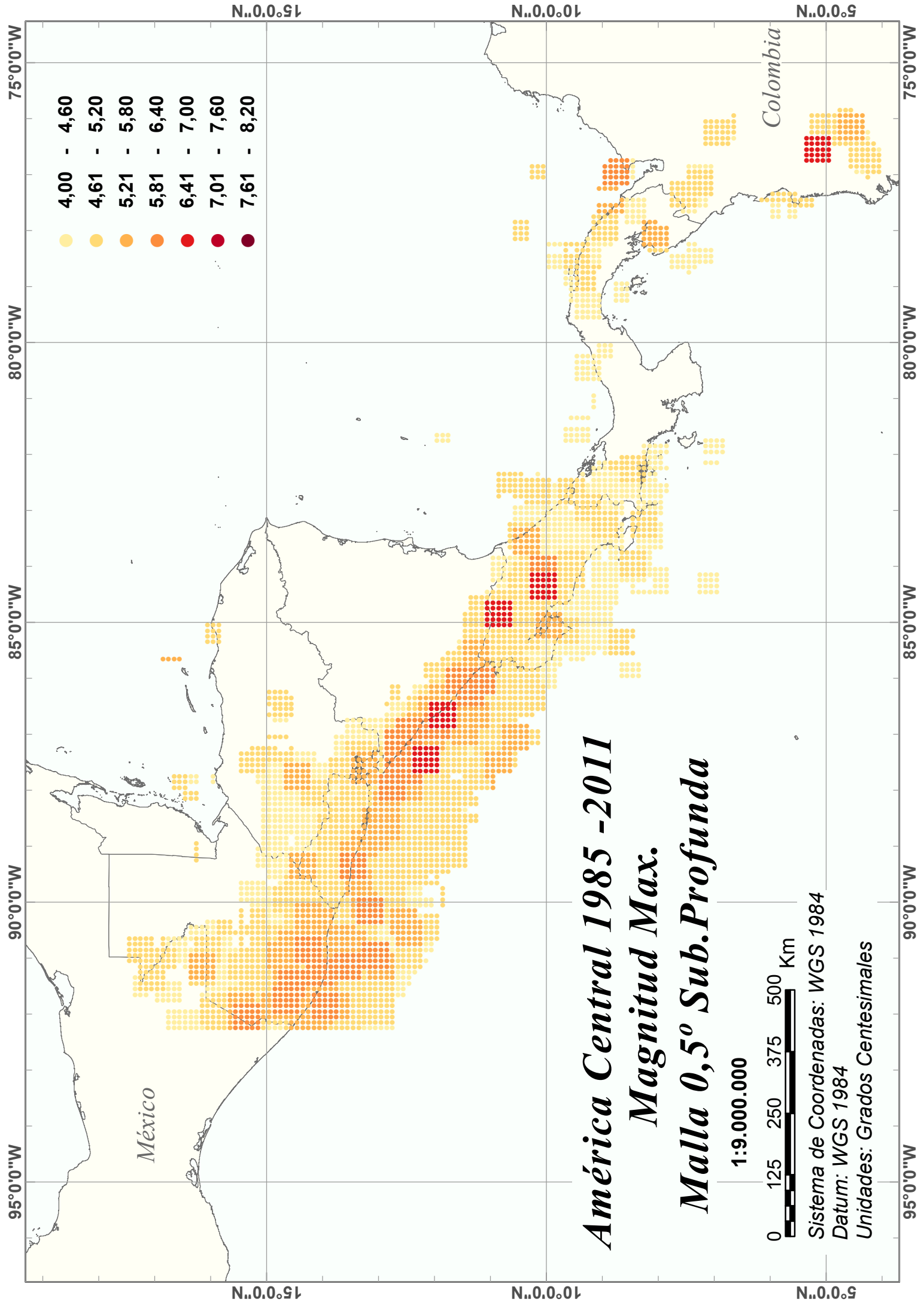


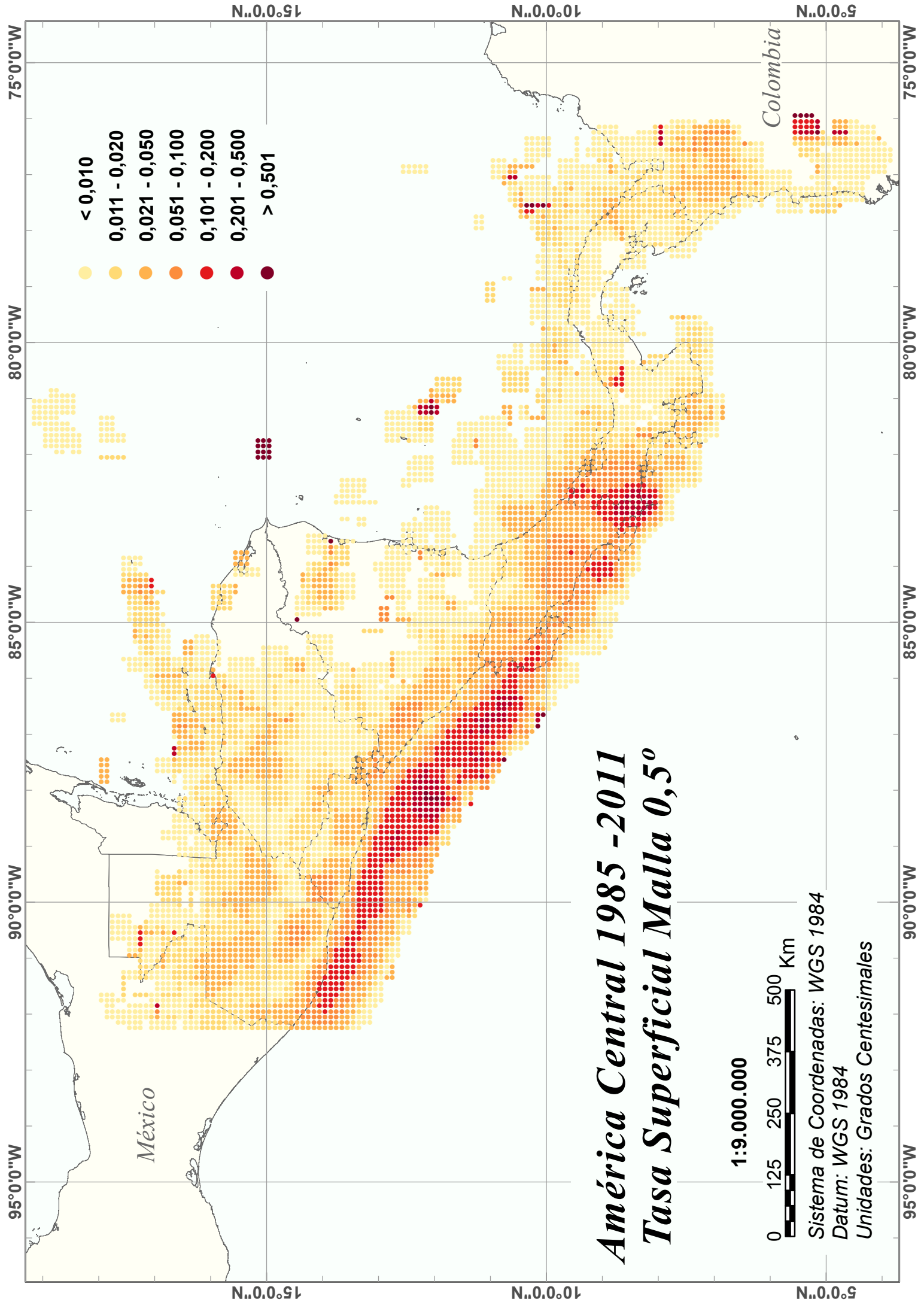
- 4,00 - 4,60
- 4,61 - 5,20
- 5,21 - 5,80
- 5,81 - 6,40
- 6,41 - 7,00
- 7,01 - 7,60
- 7,61 - 8,20

***América Central 1985 - 2011***  
***Magnitud Max.***  
***Malla 0,5° Sub. Intermedia***

1:9.000.000  
 0 125 250 375 500 Km  
 Sistema de Coordenadas: WGS 1984  
 Datum: WGS 1984  
 Unidades: Grados Centesimales







- < 0,010
- 0,011 - 0,020
- 0,021 - 0,050
- 0,051 - 0,100
- 0,101 - 0,200
- 0,201 - 0,500
- > 0,501

# *América Central 1985 - 2011*

## *Tasa Superficial Malla 0,5°*

1:9.000.000



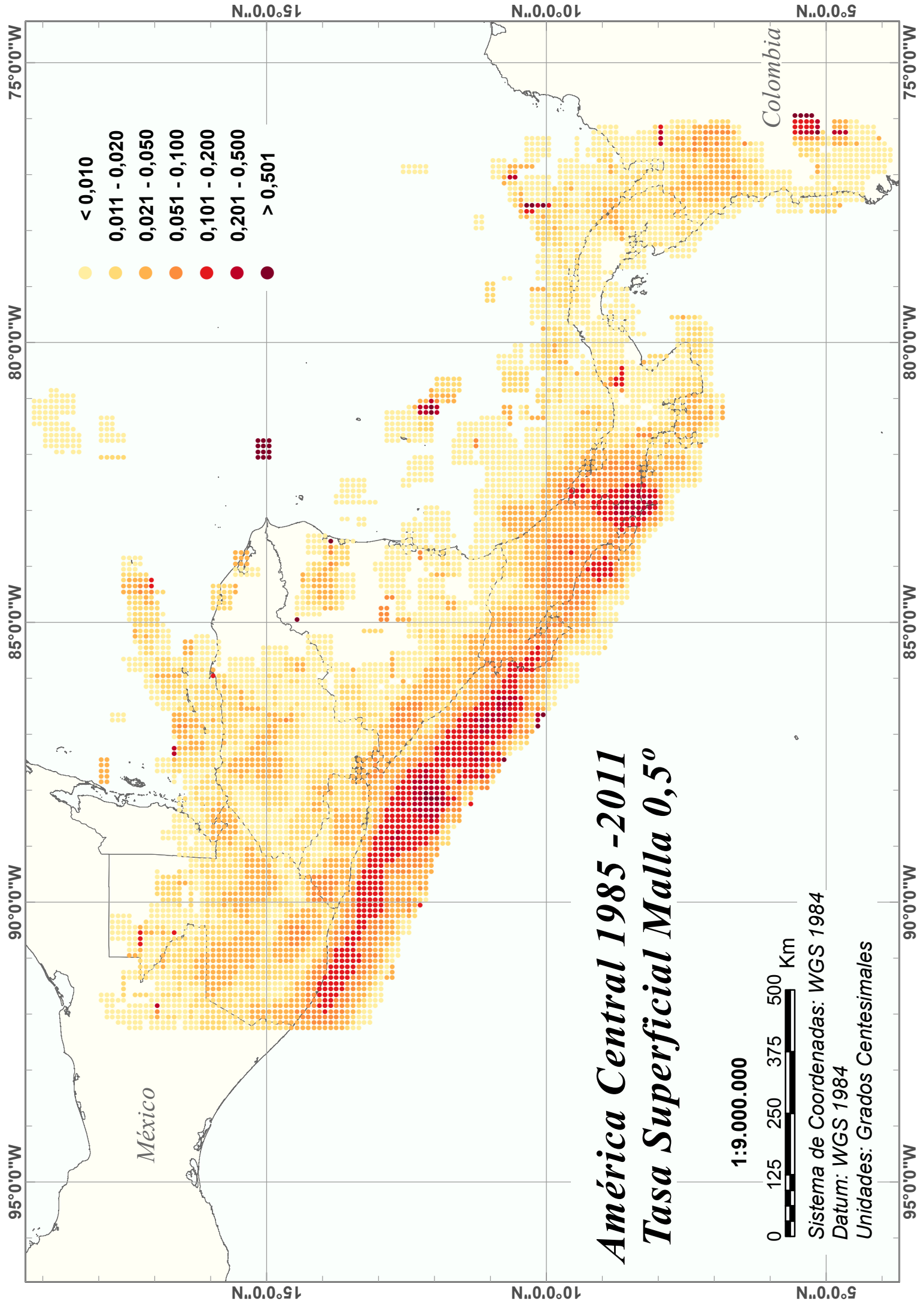
Sistema de Coordenadas: WGS 1984

Datum: WGS 1984

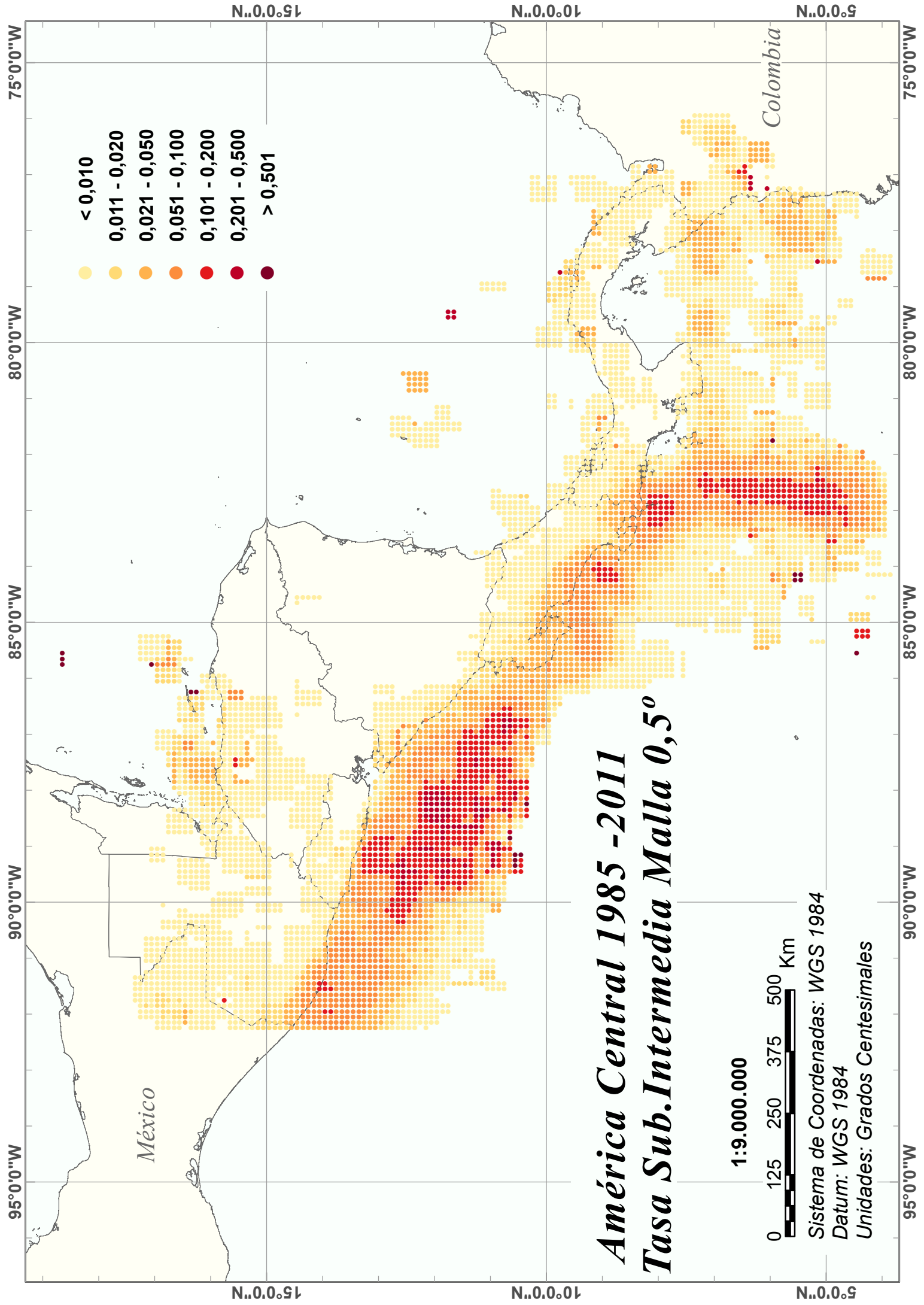
Unidades: Grados Centesimales

*México*

*Colombia*







- < 0,010
- 0,011 - 0,020
- 0,021 - 0,050
- 0,051 - 0,100
- 0,101 - 0,200
- 0,201 - 0,500
- > 0,501

# *América Central 1985 - 2011*

## *Tasa Sub.Intermedia Malla 0,5°*

1:9.000.000



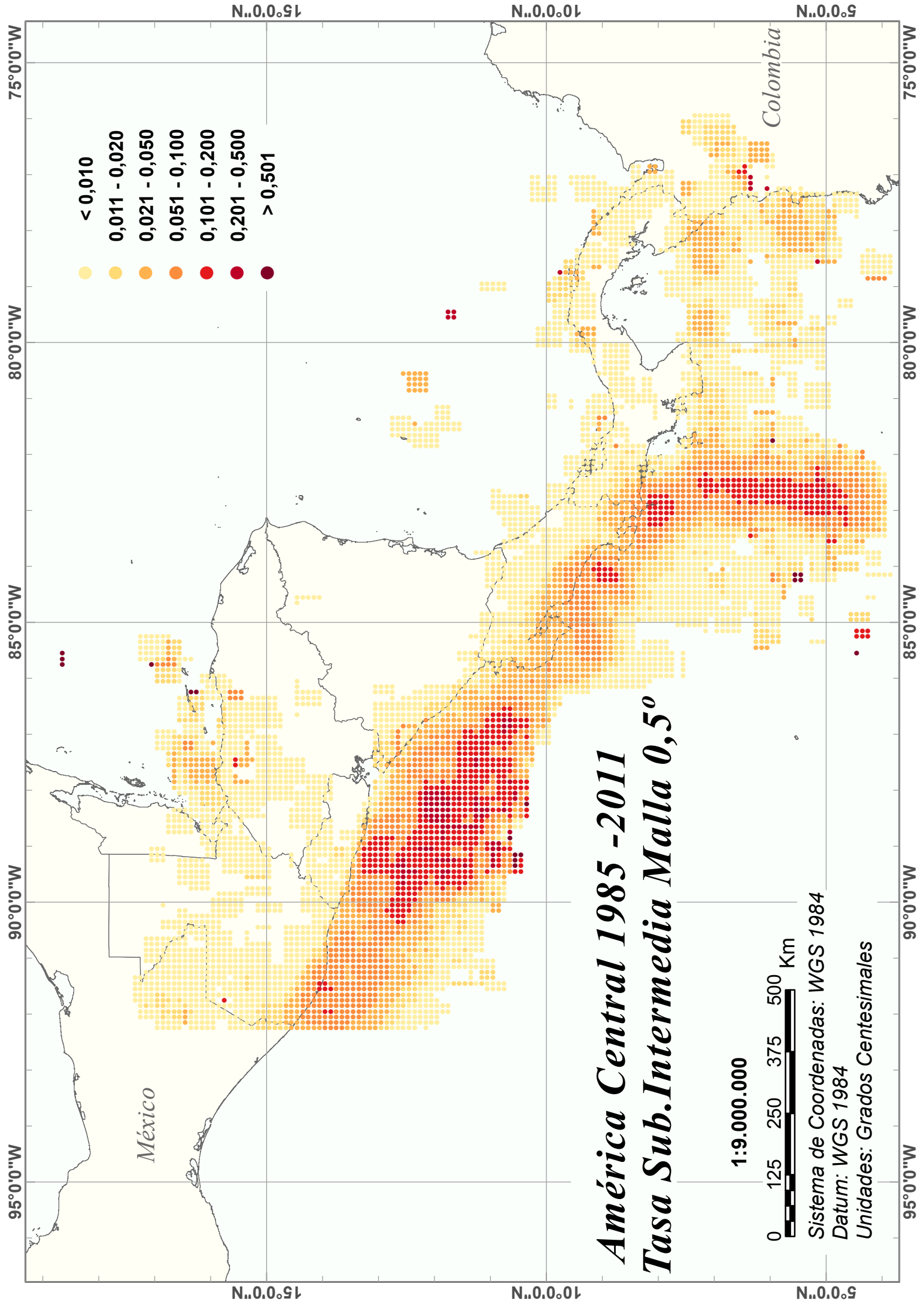
Sistema de Coordenadas: WGS 1984

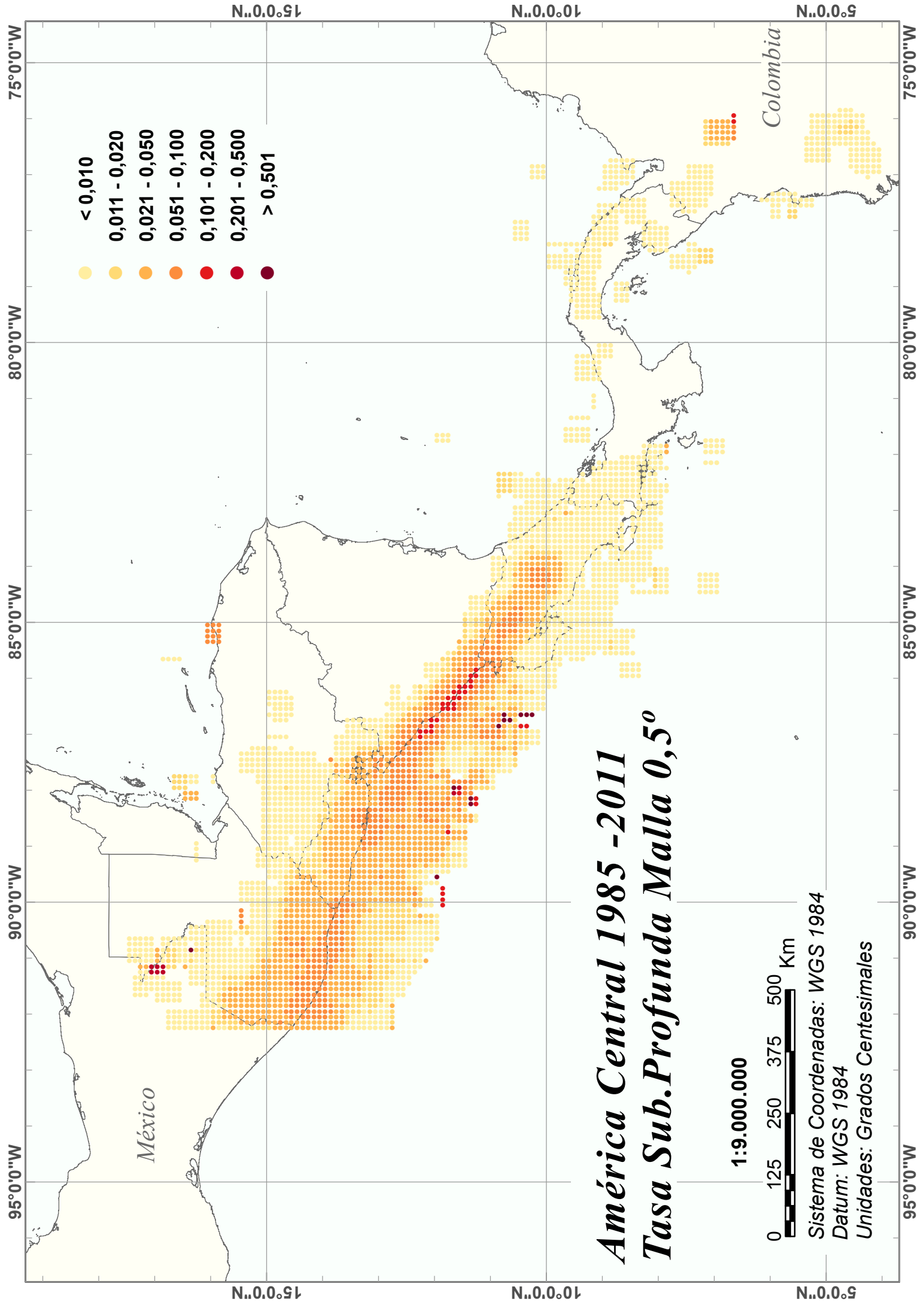
Datum: WGS 1984

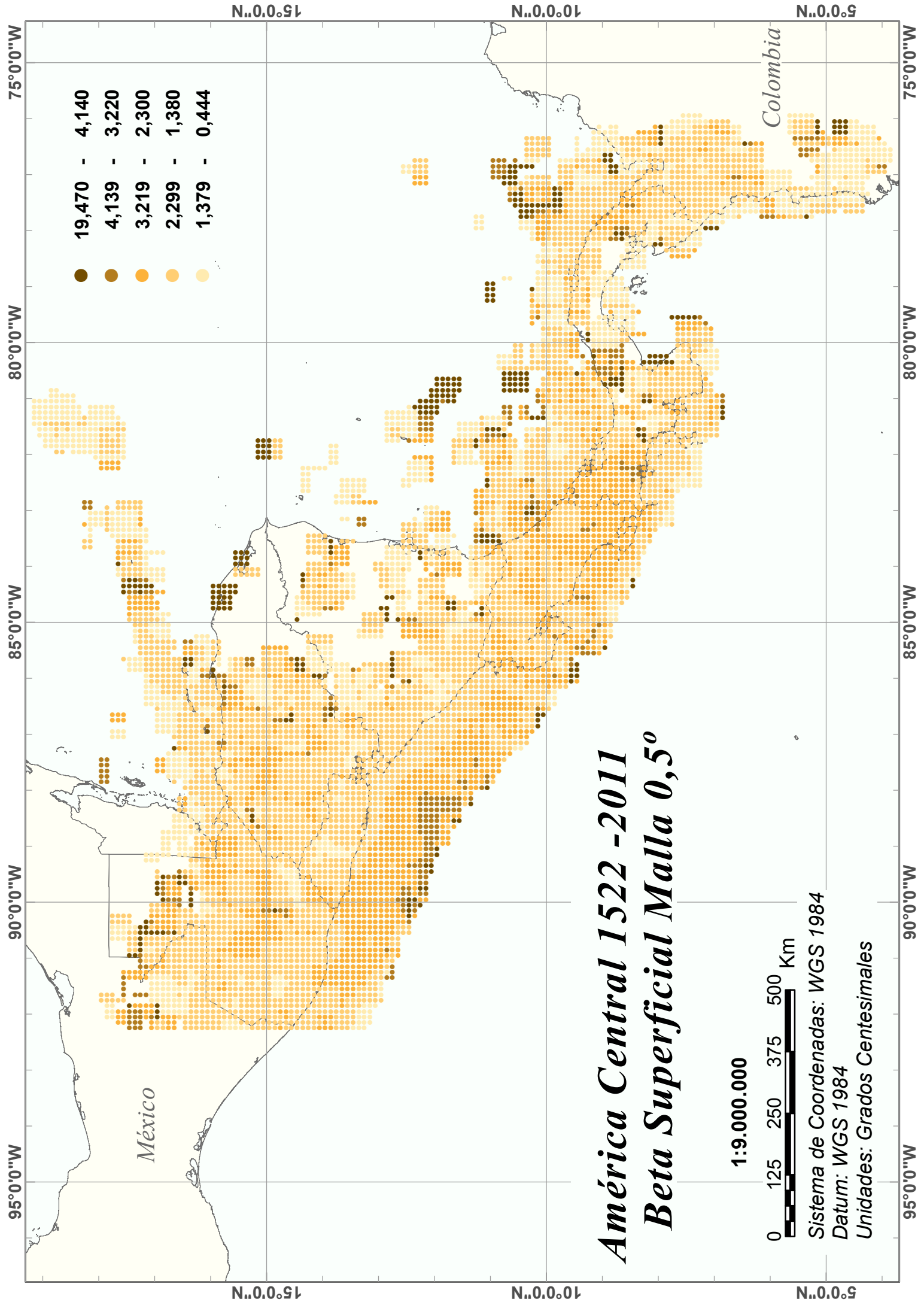
Unidades: Grados Centesimales

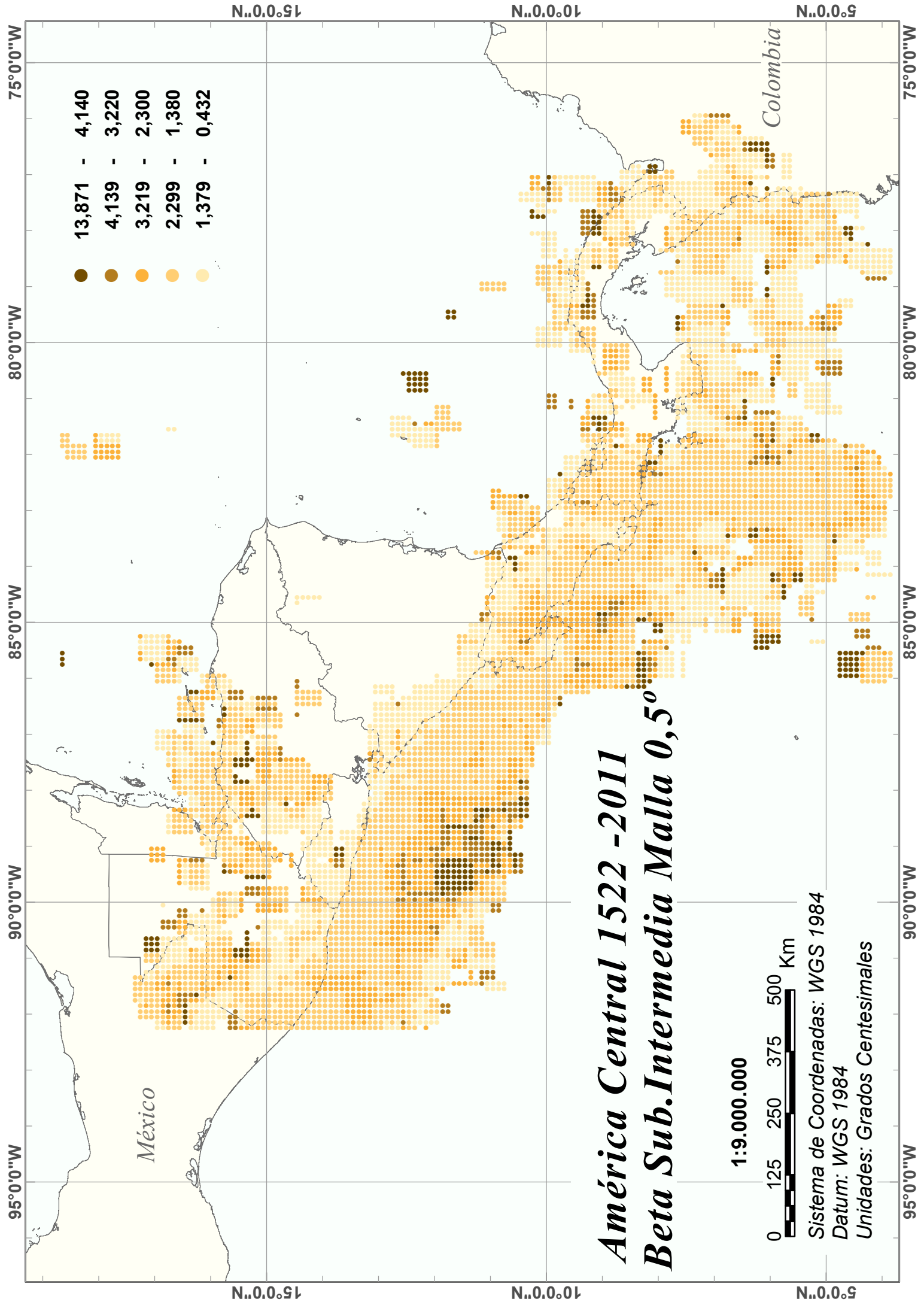
México

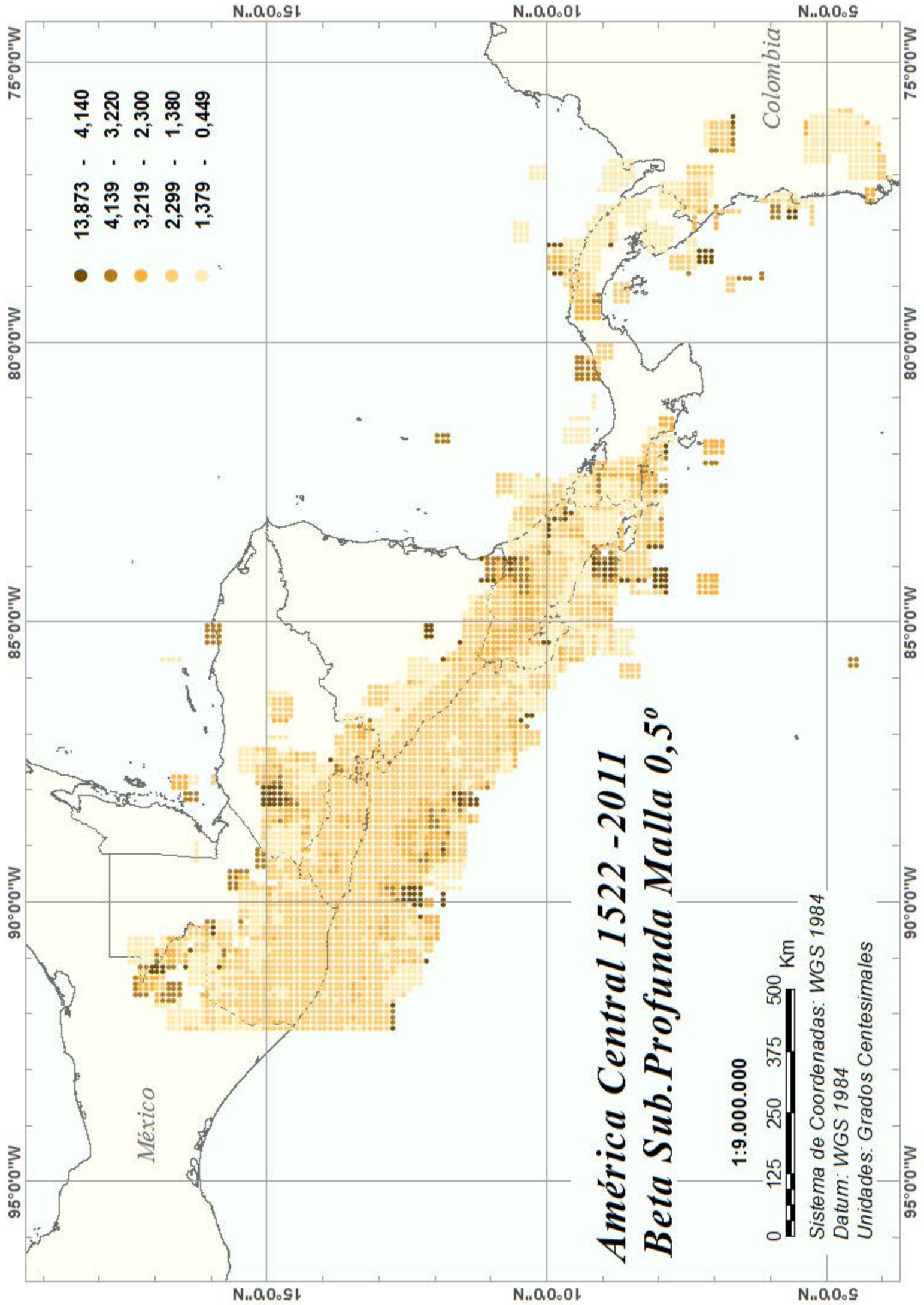
Colombia

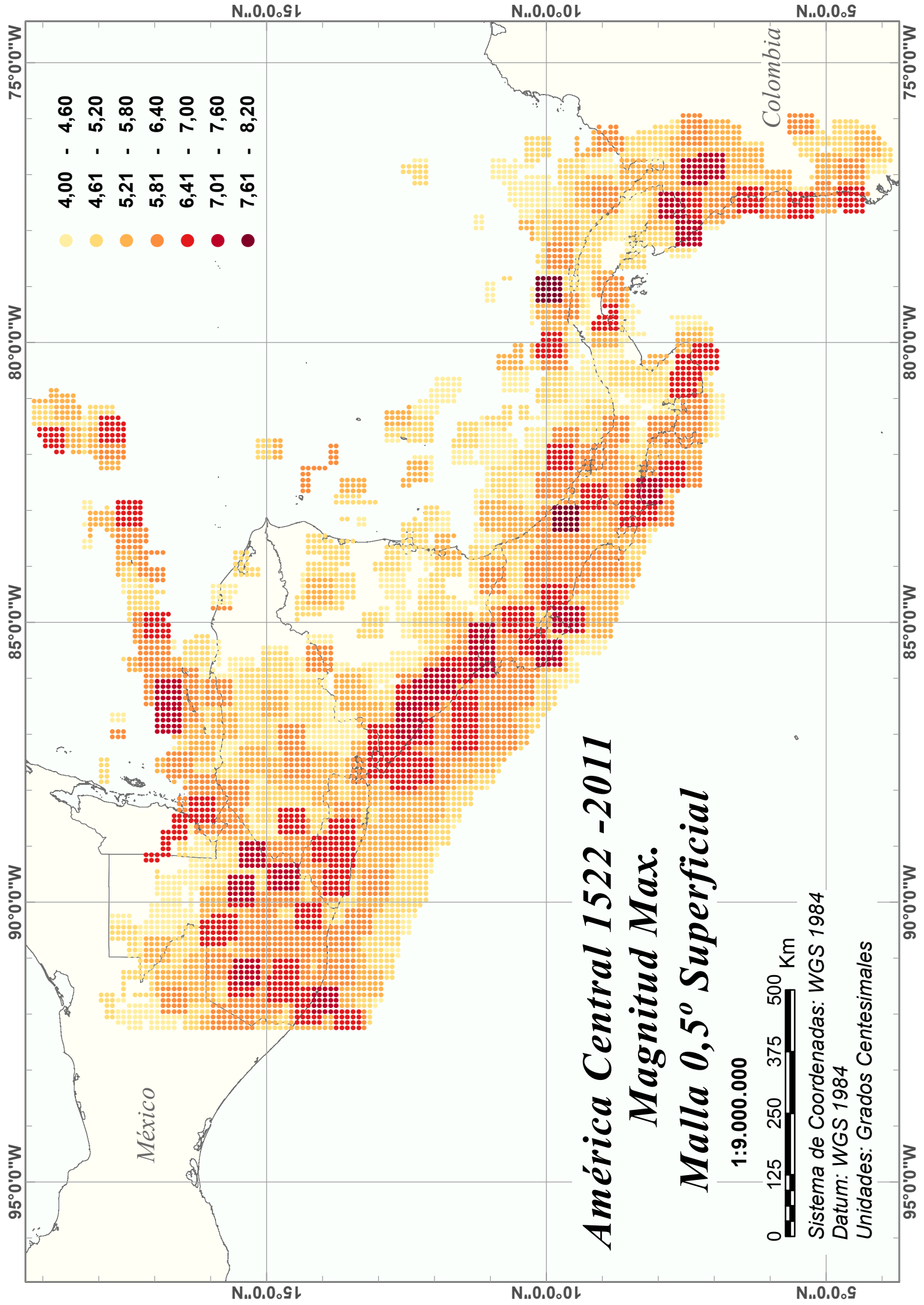












*América Central 1522 -2011*  
*Magnitud Max.*  
*Malla 0,5° Superficial*

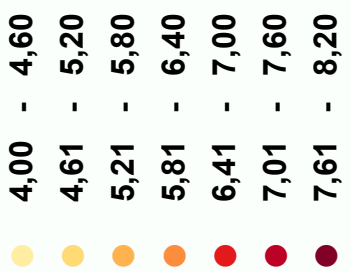
1:9.000.000



Sistema de Coordenadas: WGS 1984

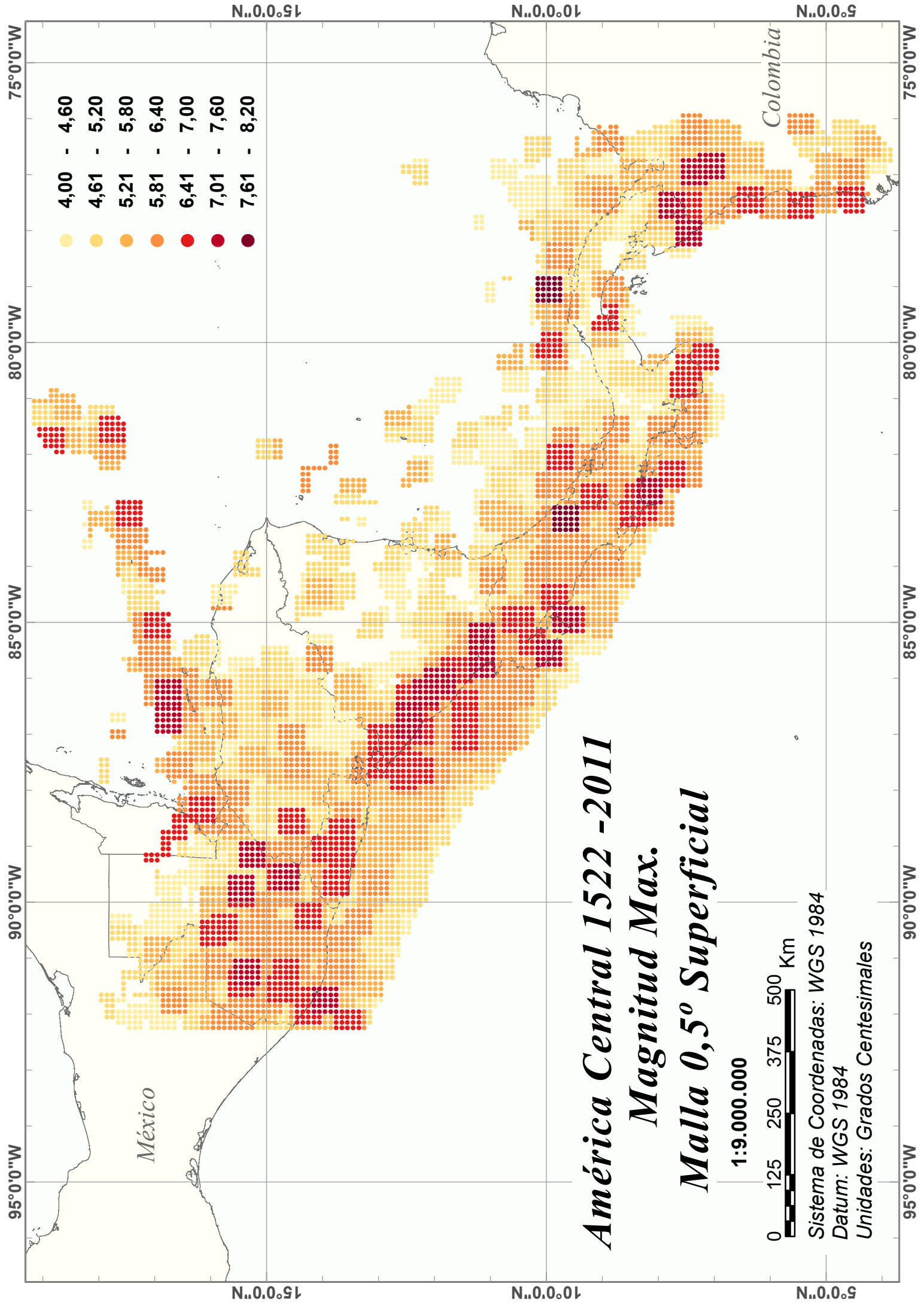
Datum: WGS 1984

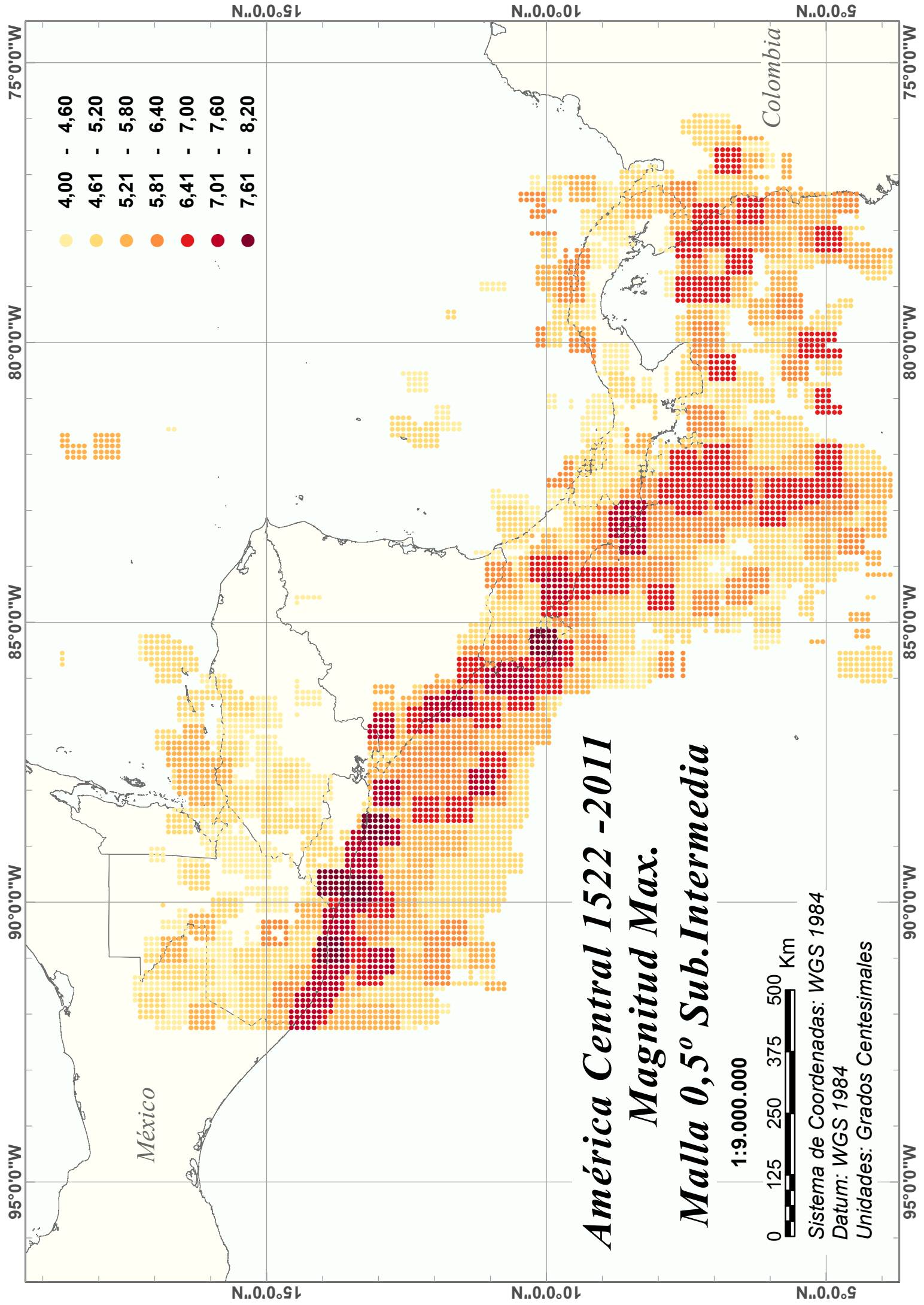
Unidades: Grados Centesimales



*México*

*Colombia*





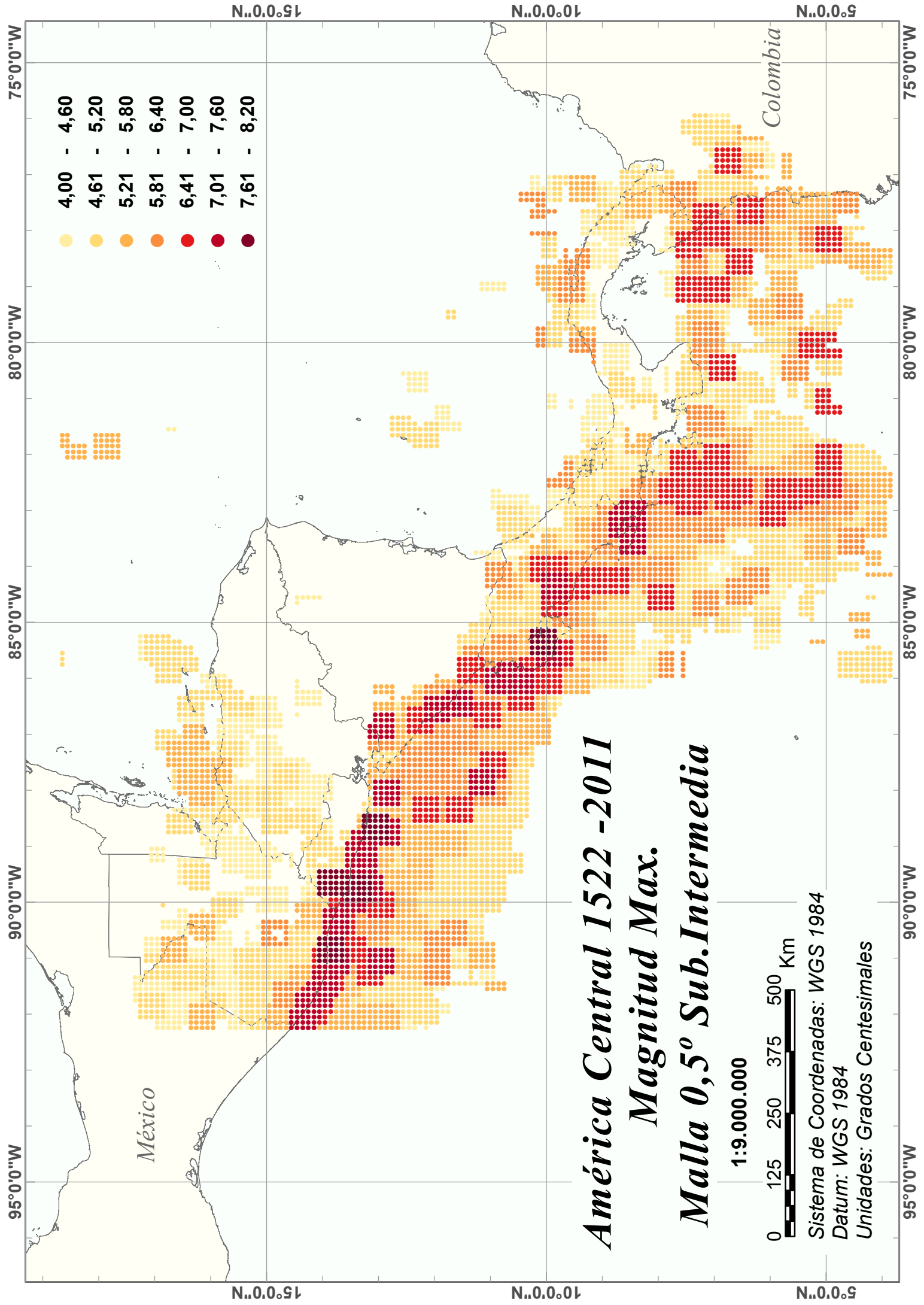
- 4,00 - 4,60
- 4,61 - 5,20
- 5,21 - 5,80
- 5,81 - 6,40
- 6,41 - 7,00
- 7,01 - 7,60
- 7,61 - 8,20

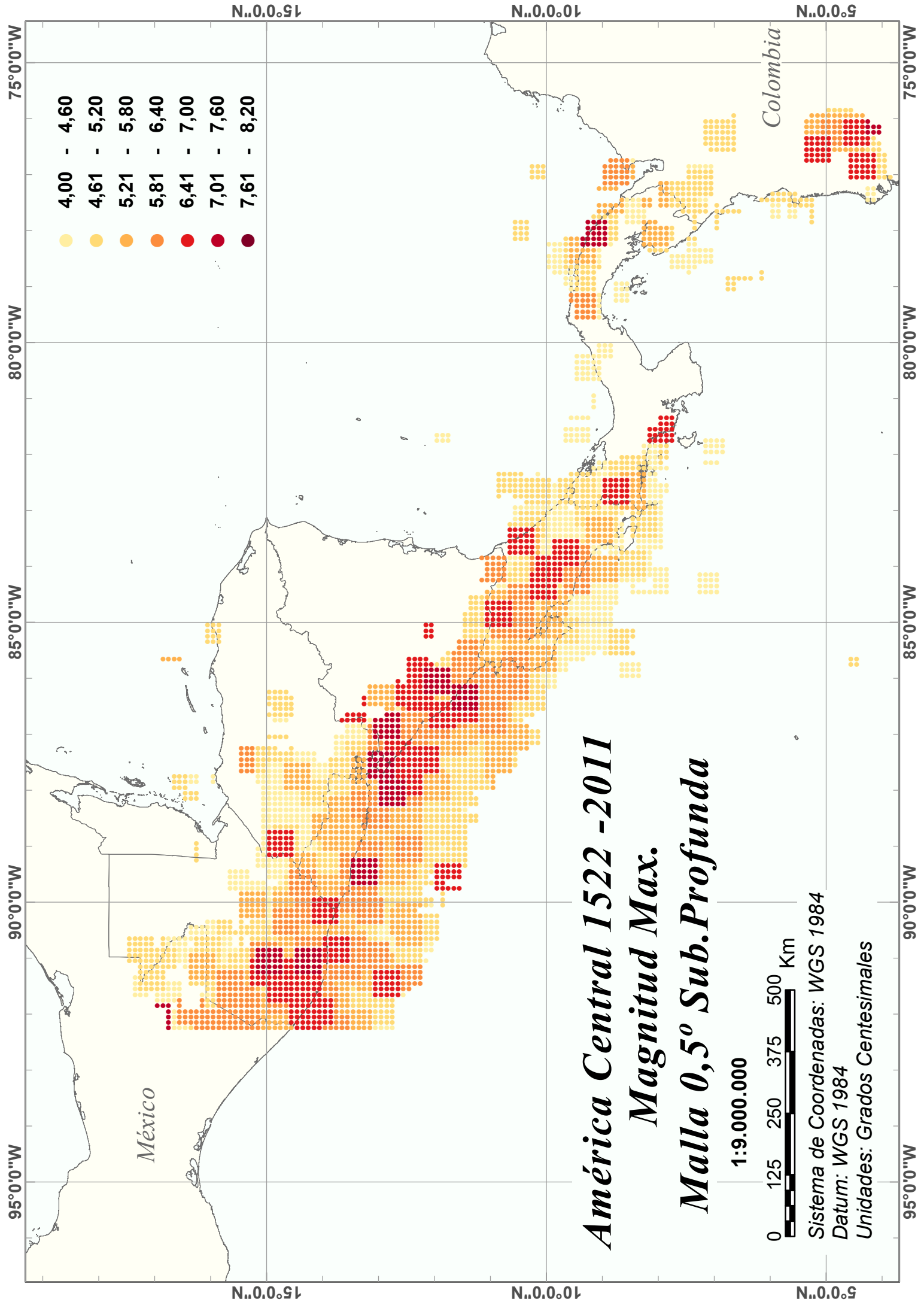
***América Central 1522 -2011***  
***Magnitud Max.***  
***Malla 0,5° Sub.Intermedia***

**1:9.000.000**  
 0 125 250 375 500 Km  
 Sistema de Coordenadas: WGS 1984  
 Datum: WGS 1984  
 Unidades: Grados Centesimales

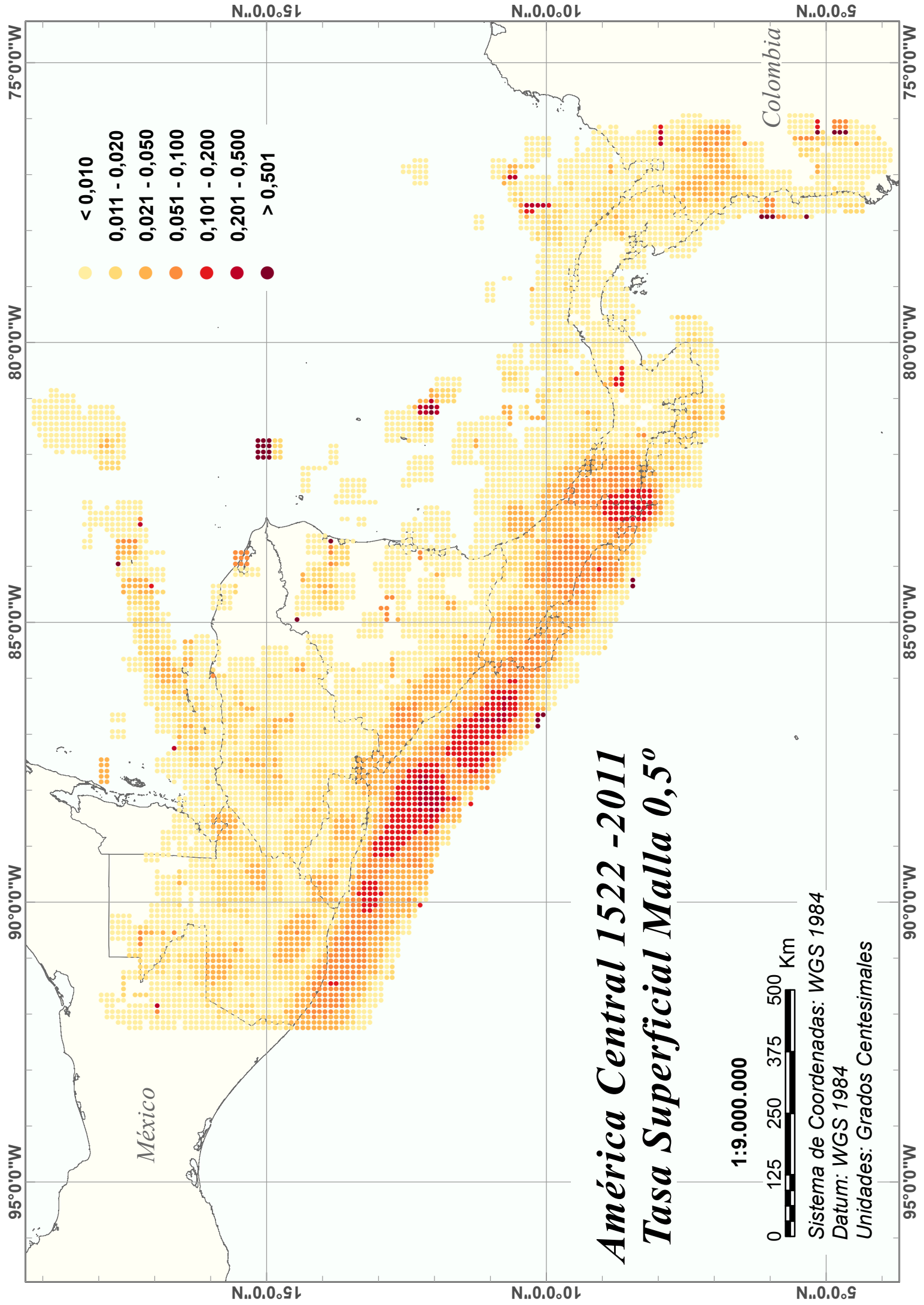
*México*

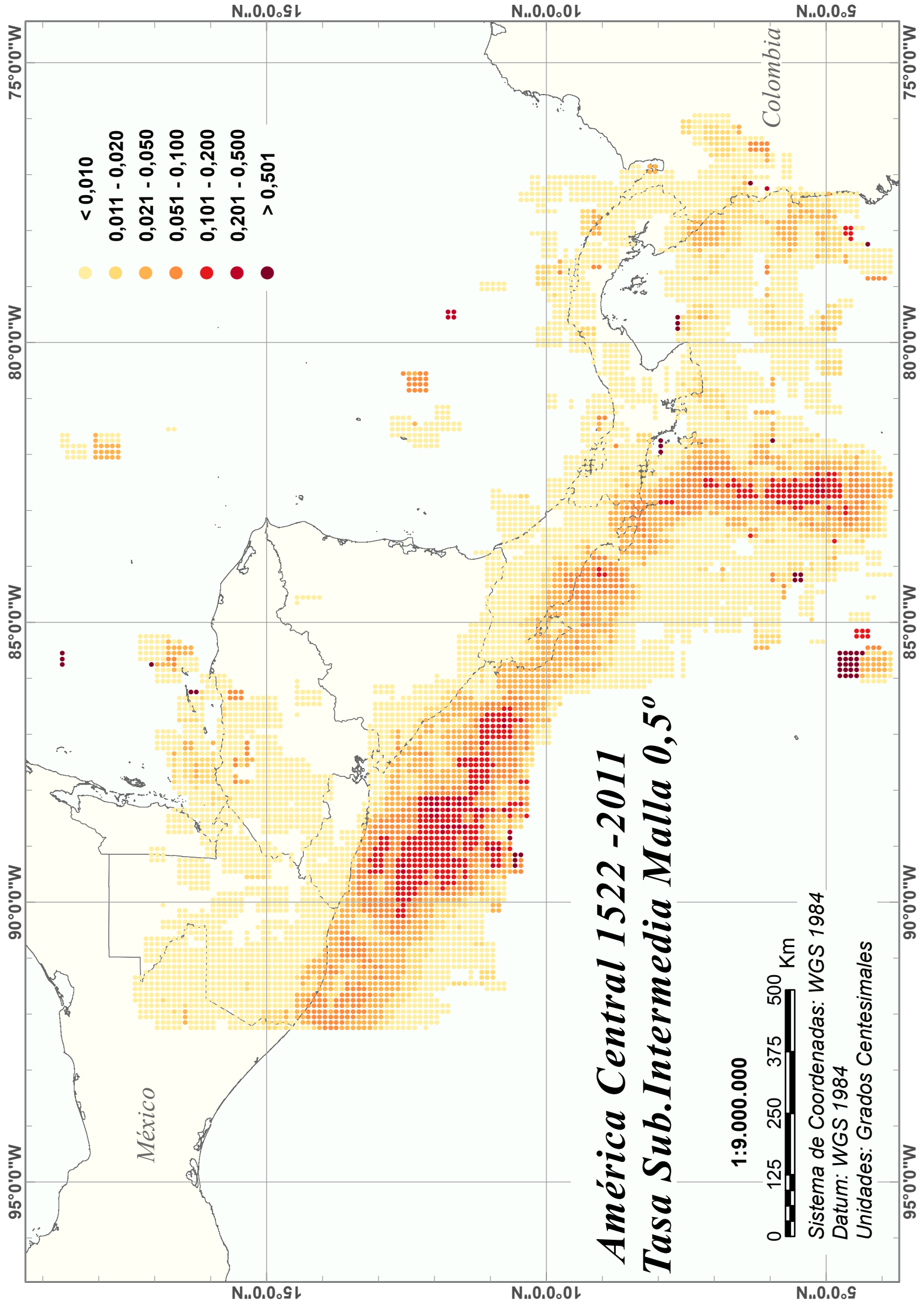
*Colombia*











- < 0,010
- 0,011 - 0,020
- 0,021 - 0,050
- 0,051 - 0,100
- 0,101 - 0,200
- 0,201 - 0,500
- > 0,501

*América Central 1522 - 2011*  
*Tasa Sub.Intermedia Malla 0,5°*

**1:9.000.000**

0 125 250 375 500 Km

Sistema de Coordenadas: WGS 1984  
 Datum: WGS 1984  
 Unidades: Grados Centesimales

México

Colombia

