



Capítulo 1

Capítulo 1



Mapas del Sector Agrícola

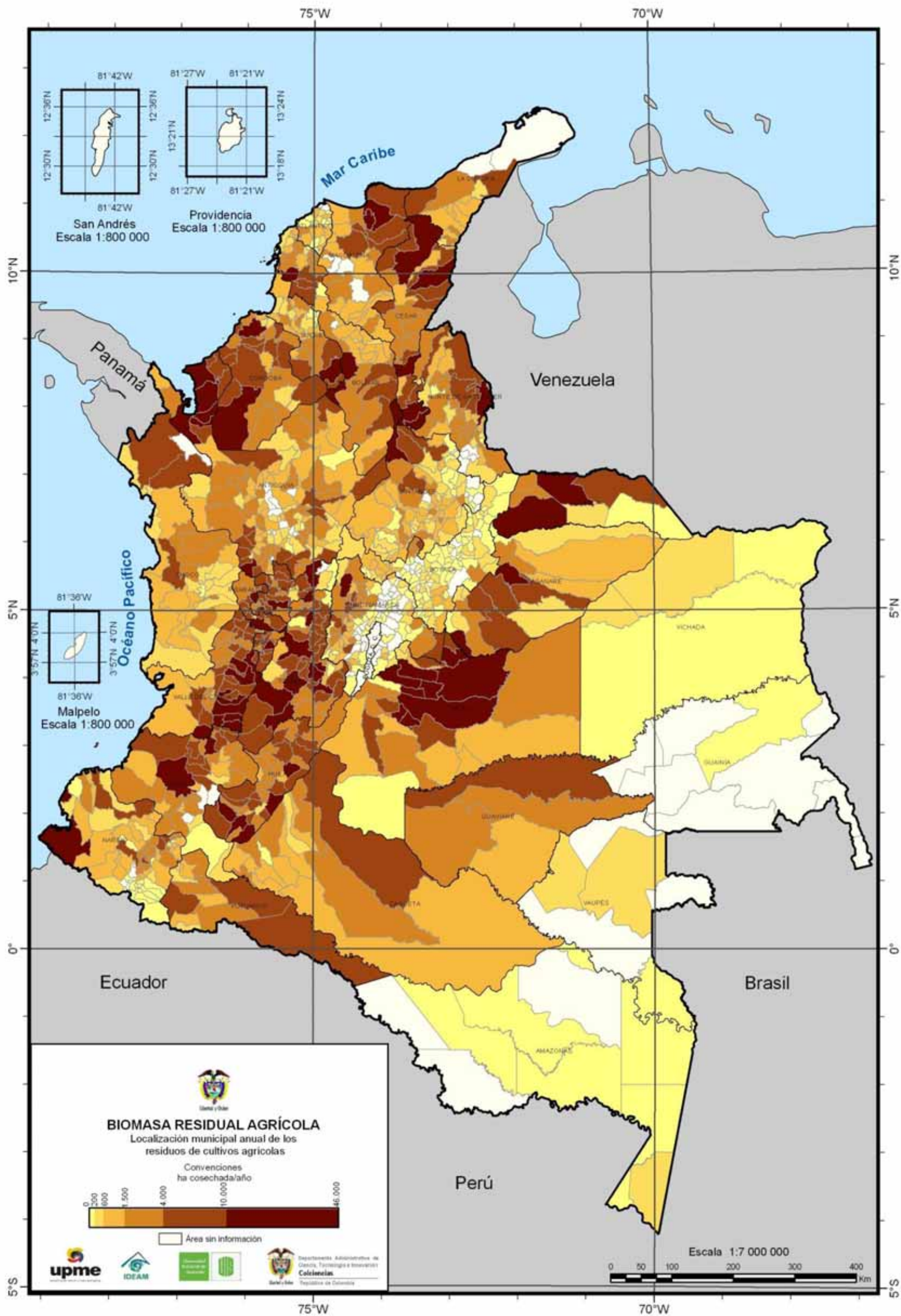
El capítulo muestra en un compendio de 52 mapas las zonas de producción, el área cultivada, la cantidad de biomasa residual, el potencial energético y el rendimiento neto de energía, con datos anuales en el nivel municipal de manera global para todo el sector, discriminado por cultivos transitorios y permanentes, y de manera individual, para los siguientes ocho cultivos: arroz, maíz, banano, café, caña de azúcar, caña panelera, palma de aceite y plátano.

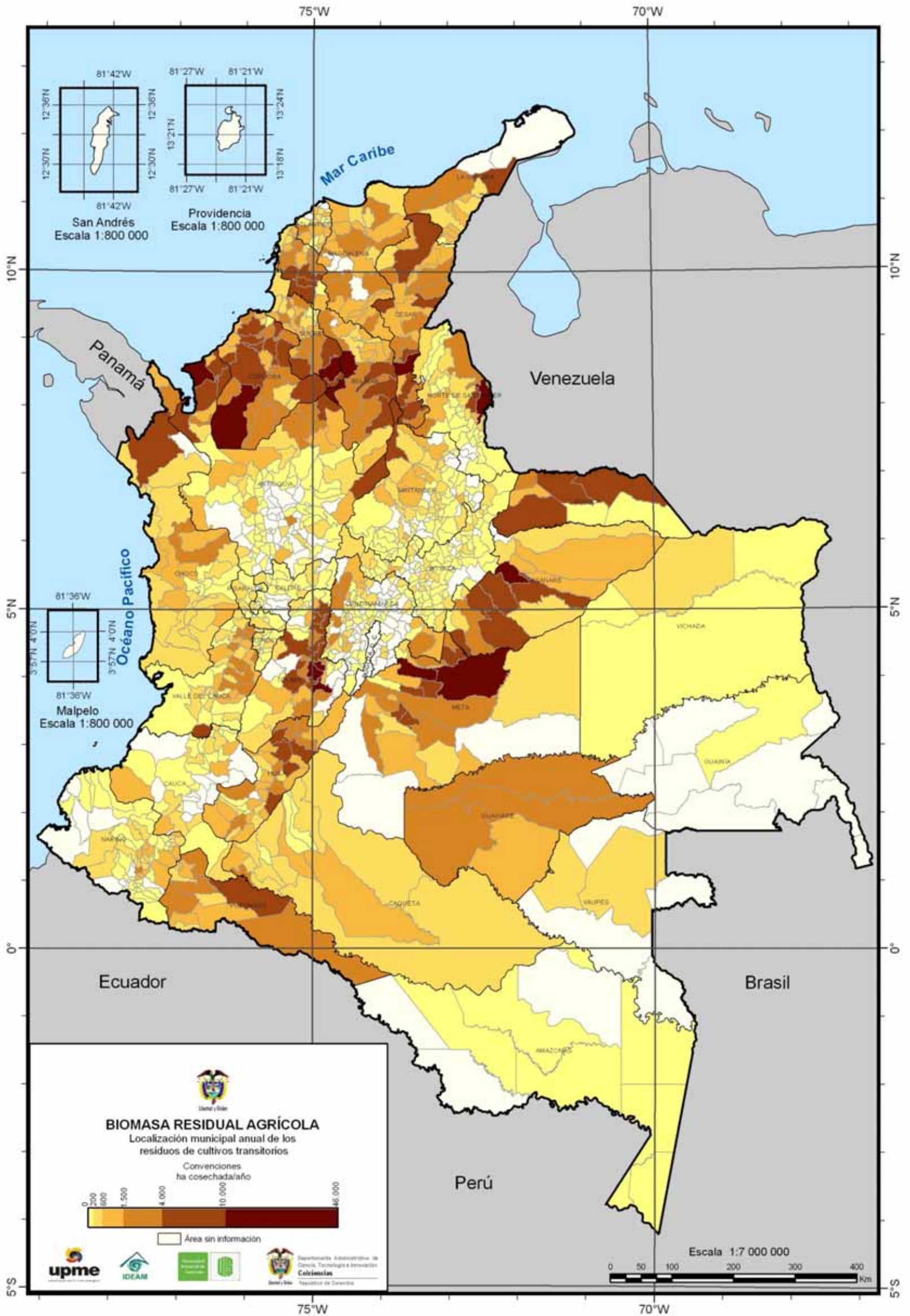
En el mapa de localización, la variable *área cultivada* corresponde a información del año 2006 y se representa con la gama de colores que van del amarillo al marrón. La variable *cantidad de biomasa residual* se calculó a partir de los factores de generación de residuo. Esta variable se representa en los mapas con la gama del color verde. El *potencial energético* se identifica con los tonos naranja y por último, el rendimiento neto de energía con las tonalidades rosa.

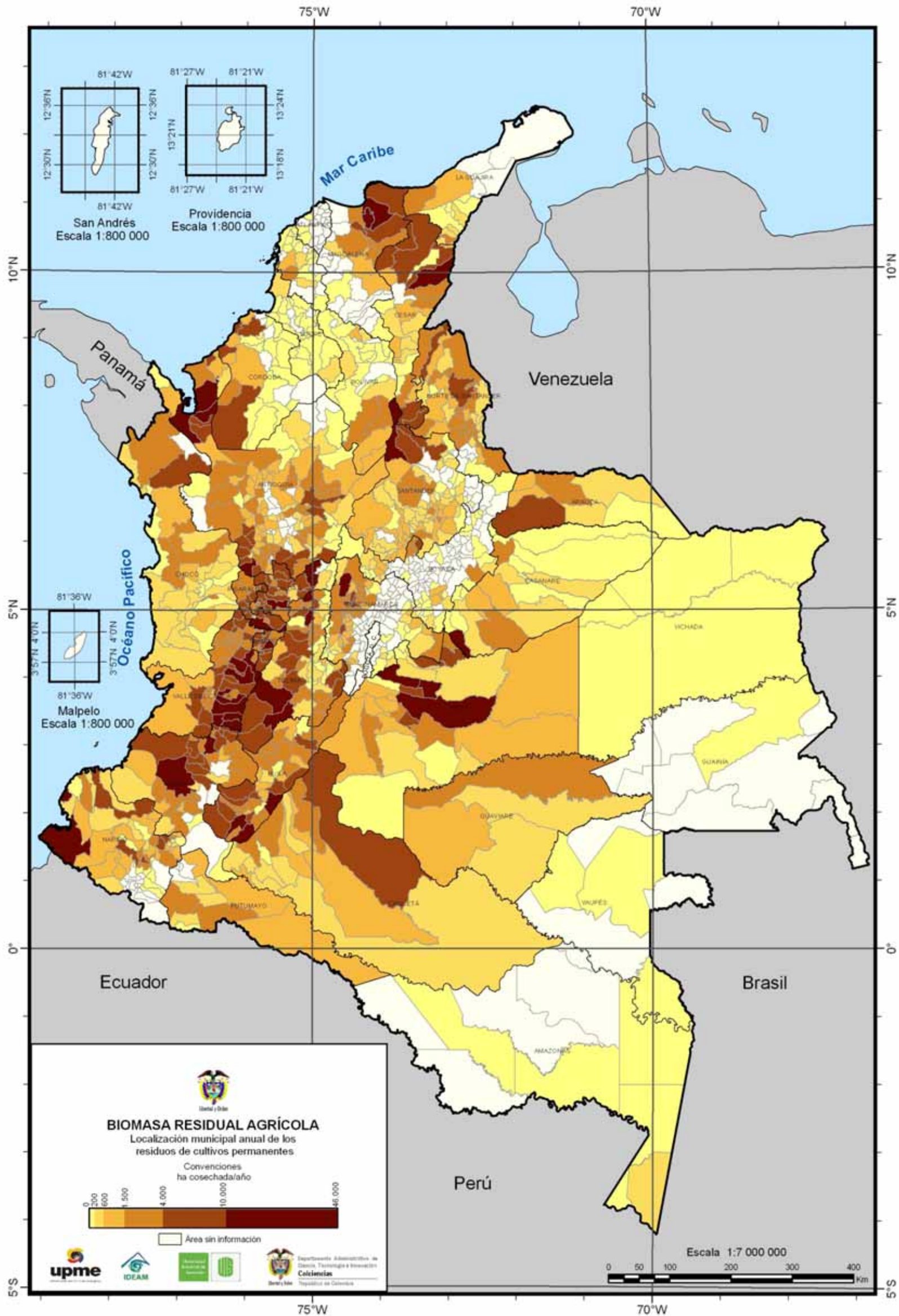
Para la interpretación de los resultados se recomienda hacer uso del conjunto de mapas que describen las cuatro variables de estudio. Como información adicional se presentan, en forma tabulada, los valores promedio de la caracterización fisicoquímica de cada tipo de biomasa residual.

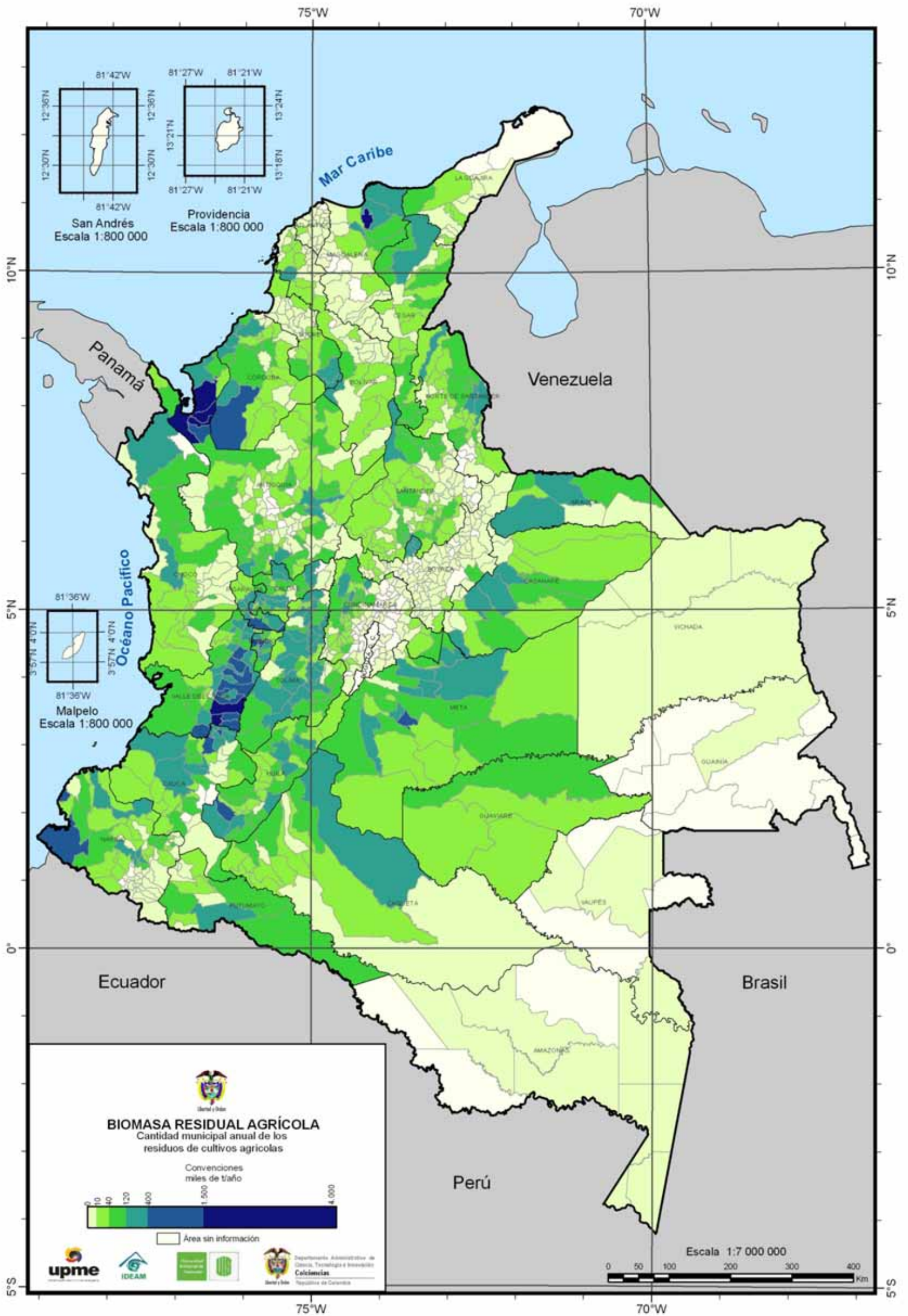
La información sobre áreas sembradas, ubicación de los cultivos, rendimientos y cantidades de residuos generados, se obtuvo del Anuario Estadístico del Sector Agropecuario del año 2006 y de los gremios y/o centros de investigación del sector, como por ejemplo Cenipalma, Cenicaña, Cimpa, Cenicafé, Augura, Fedearroz y Fenalce. Estos mapas se elaboraron tomando como base la cartografía oficial de la división político administrativa y de fronteras de Colombia, IGAC 2006.

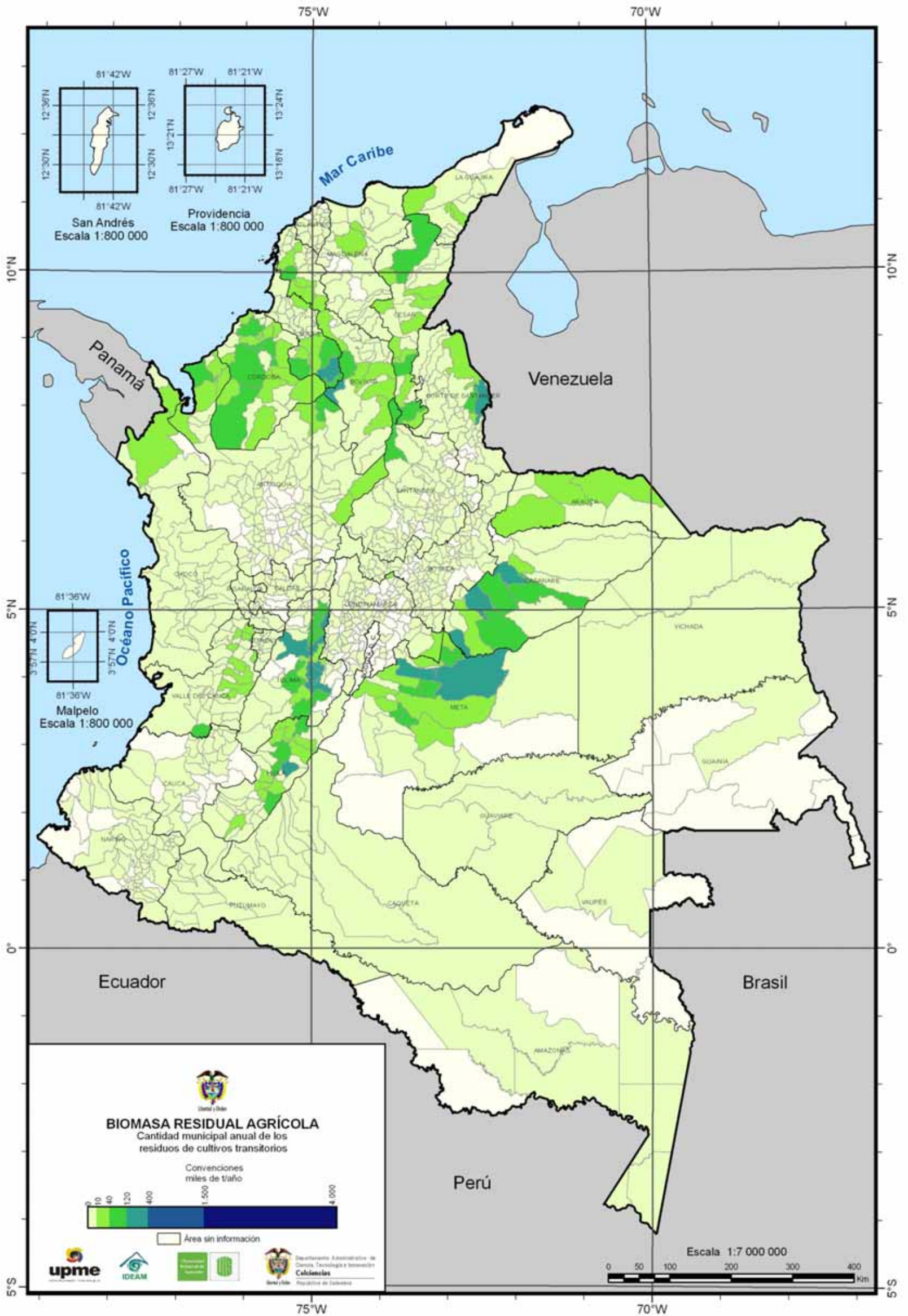
Para la correcta interpretación de los mapas es necesario tener en cuenta las descripciones de cada uno de ellos, presentadas en “Generalidades”, al comienzo de éste libro.





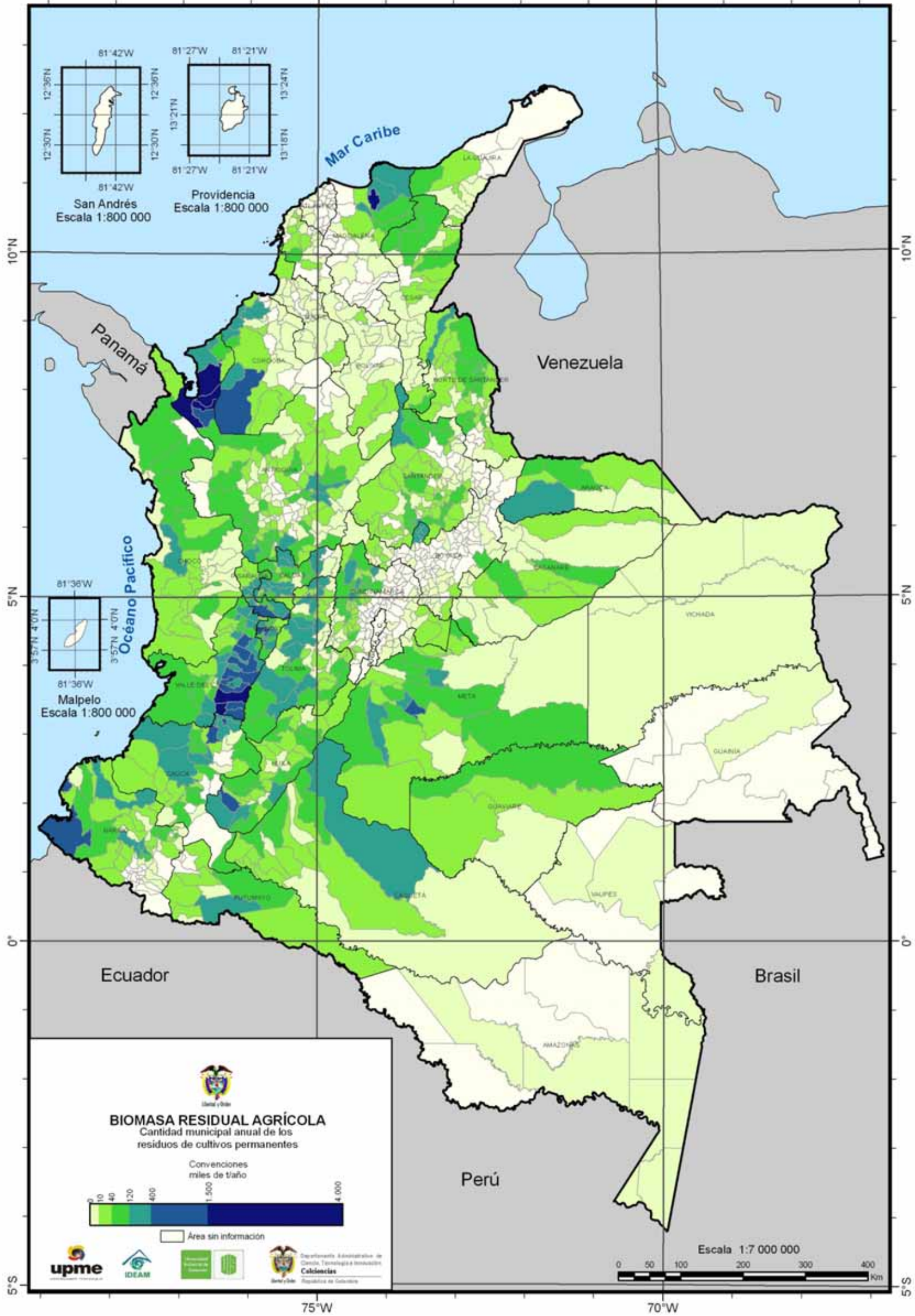


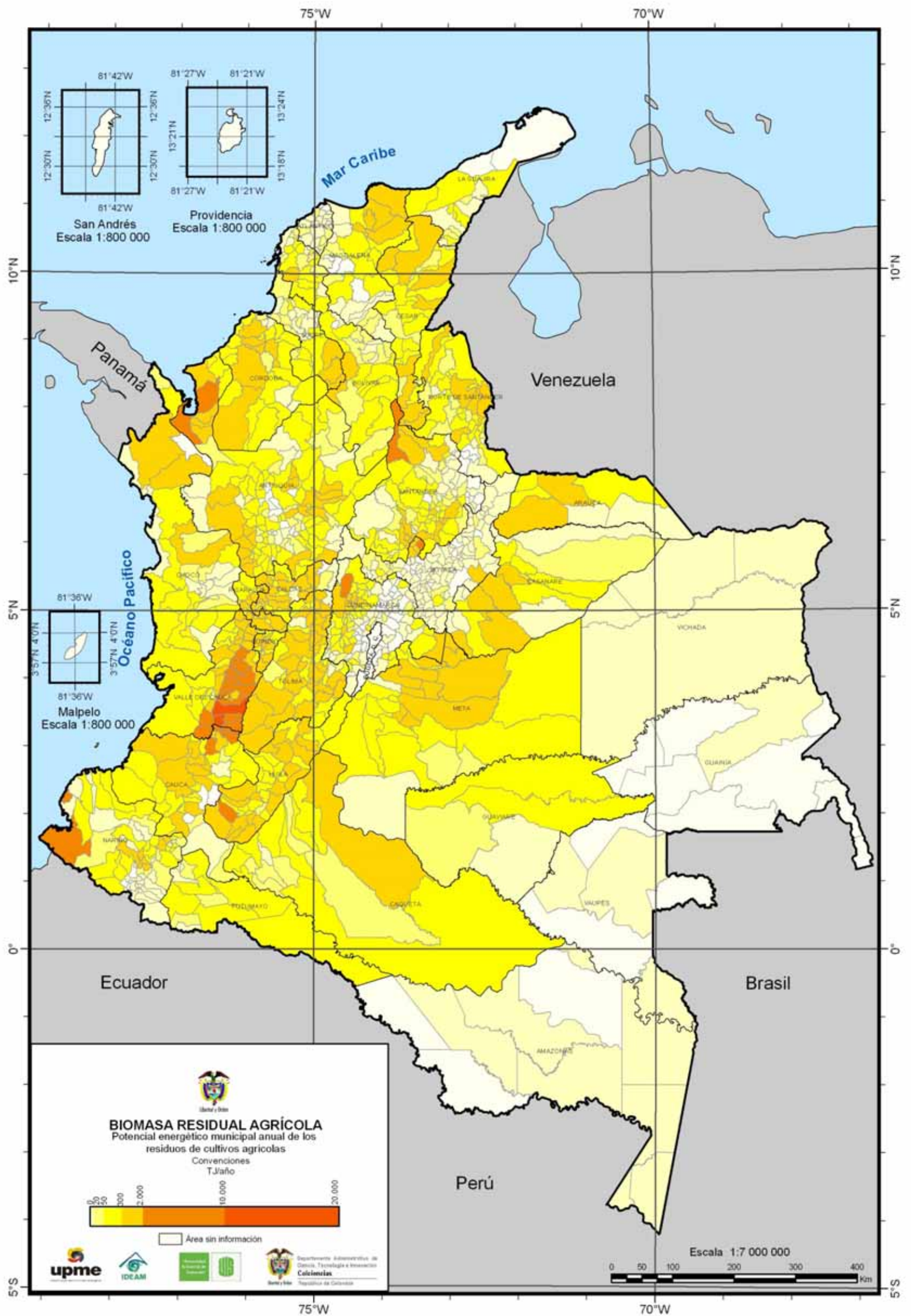


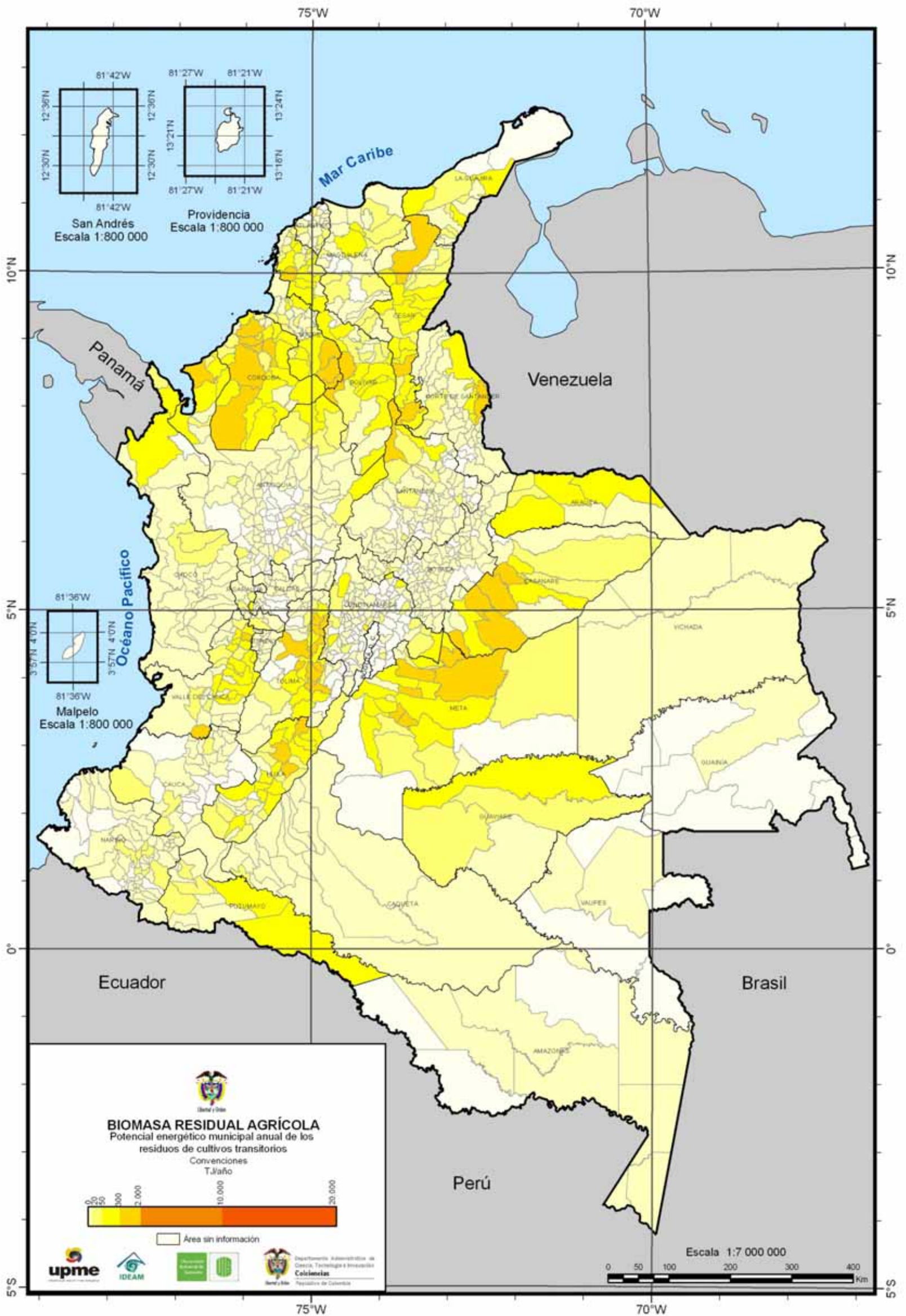


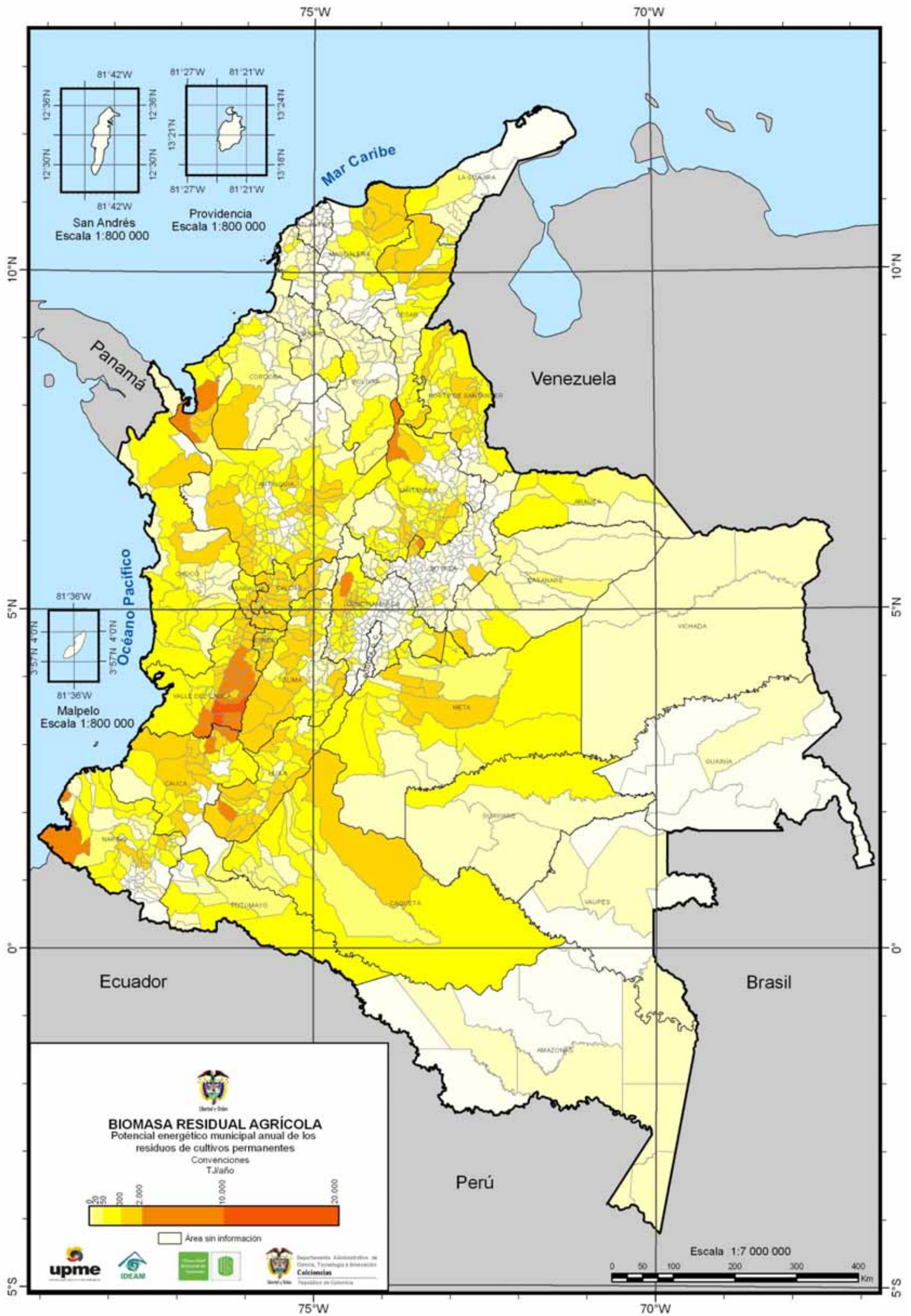
75°W

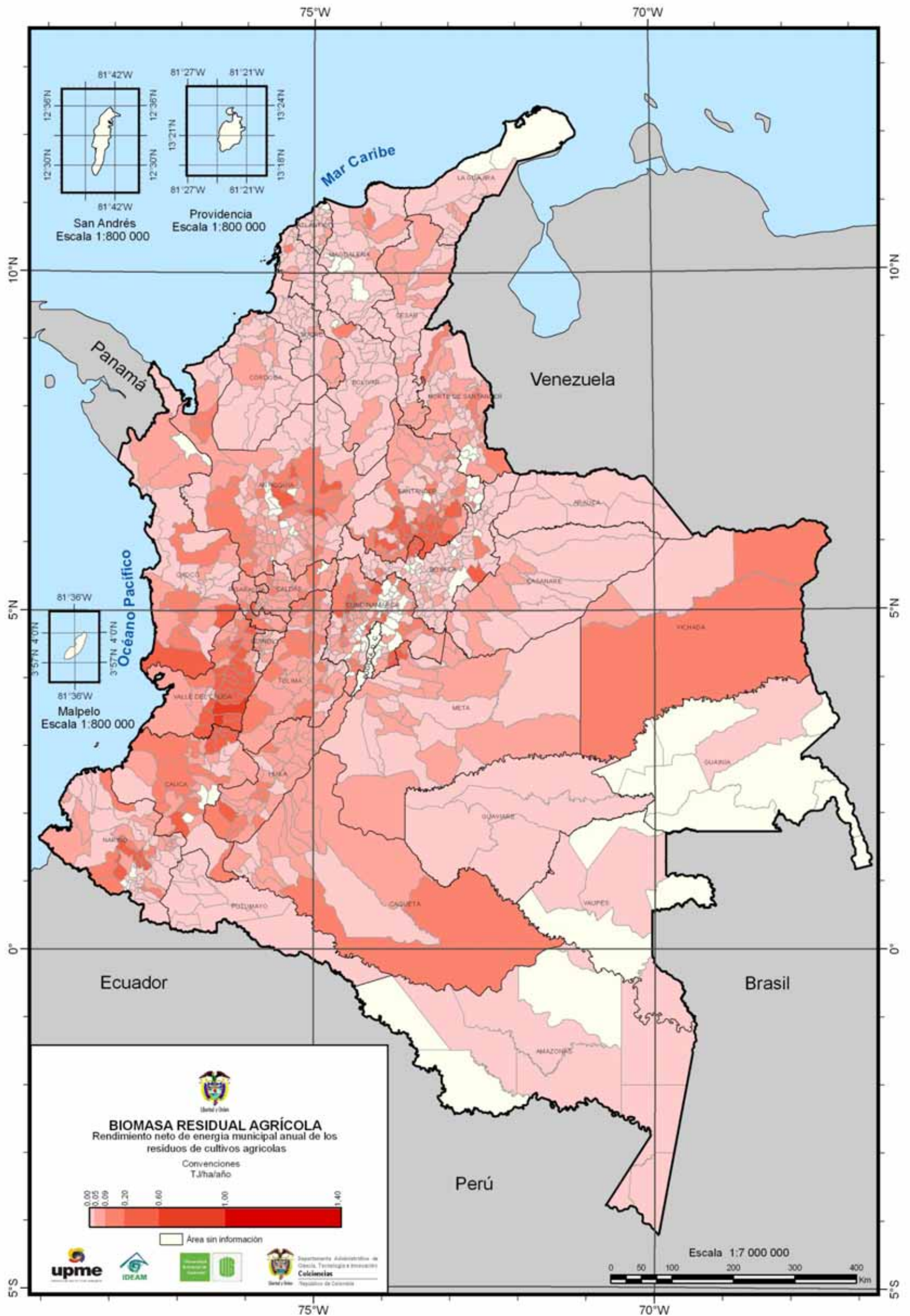
70°W

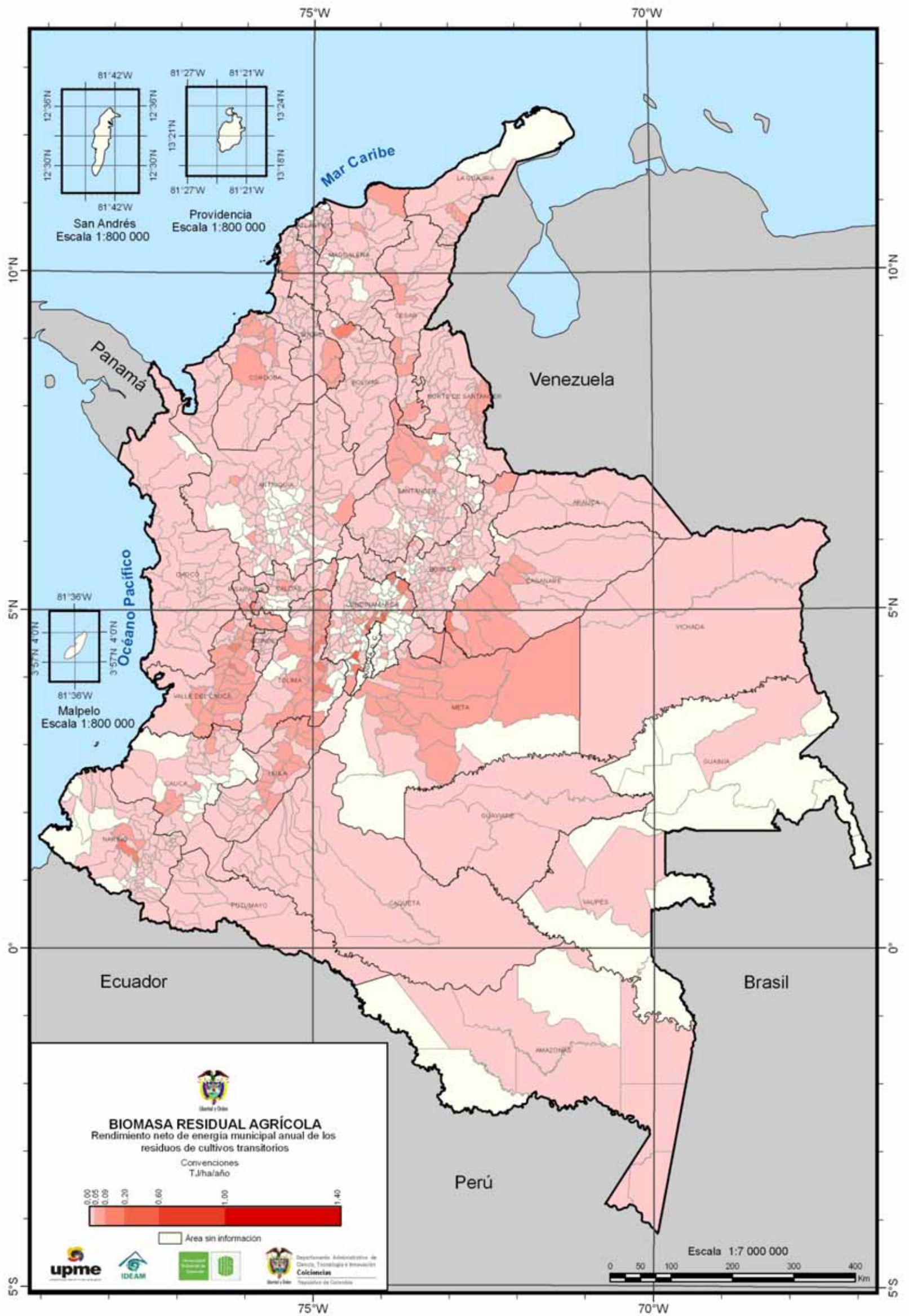


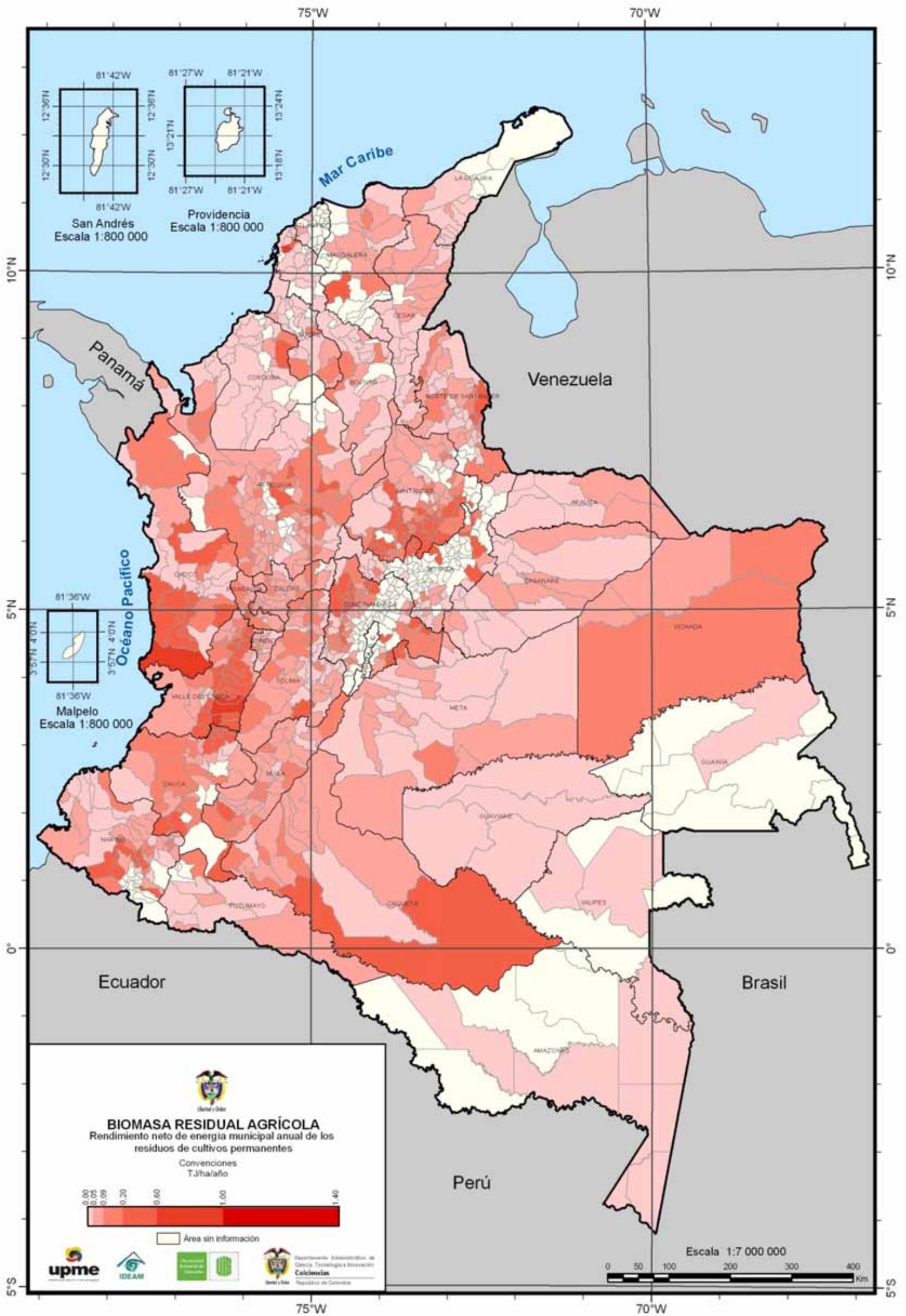




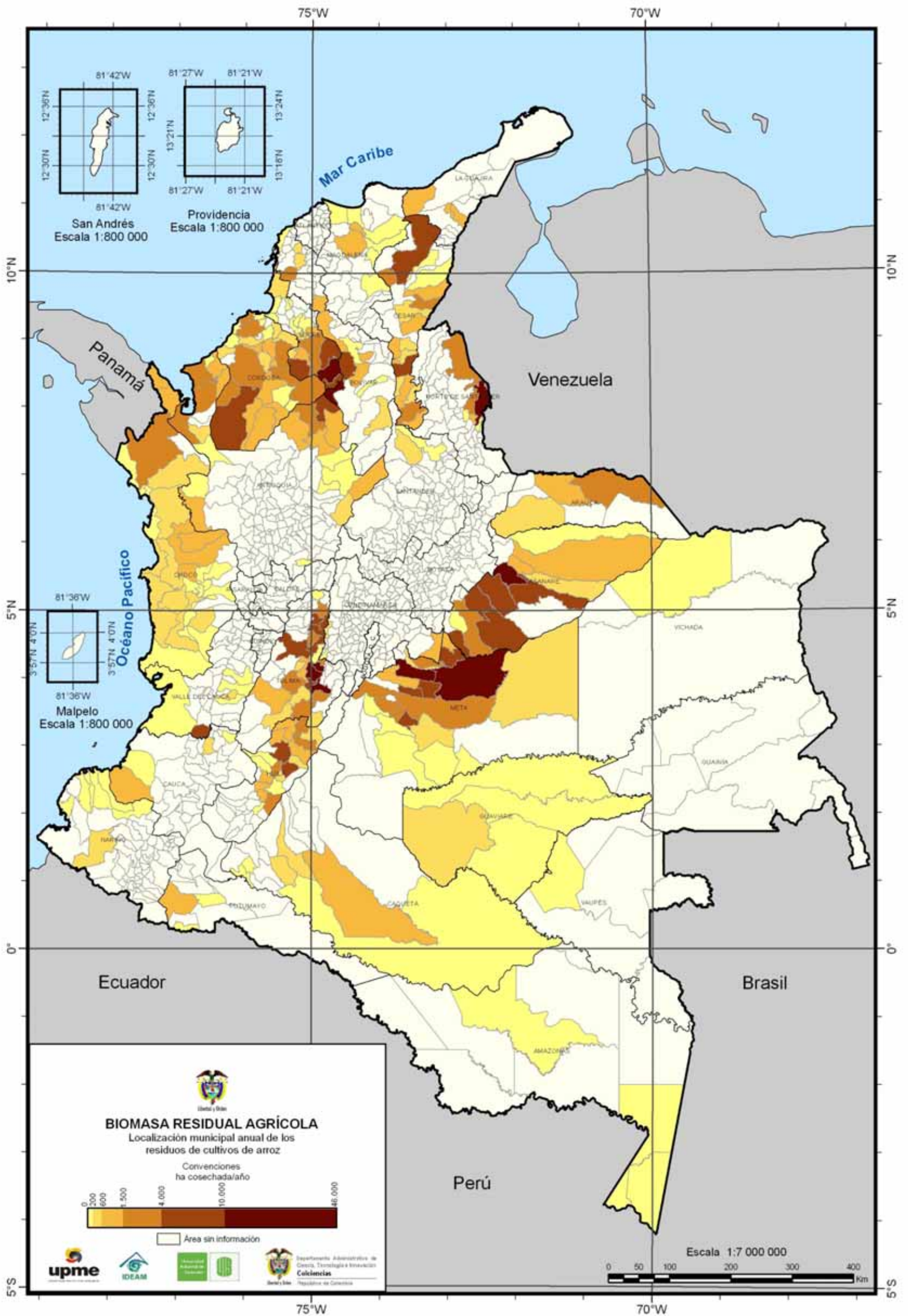


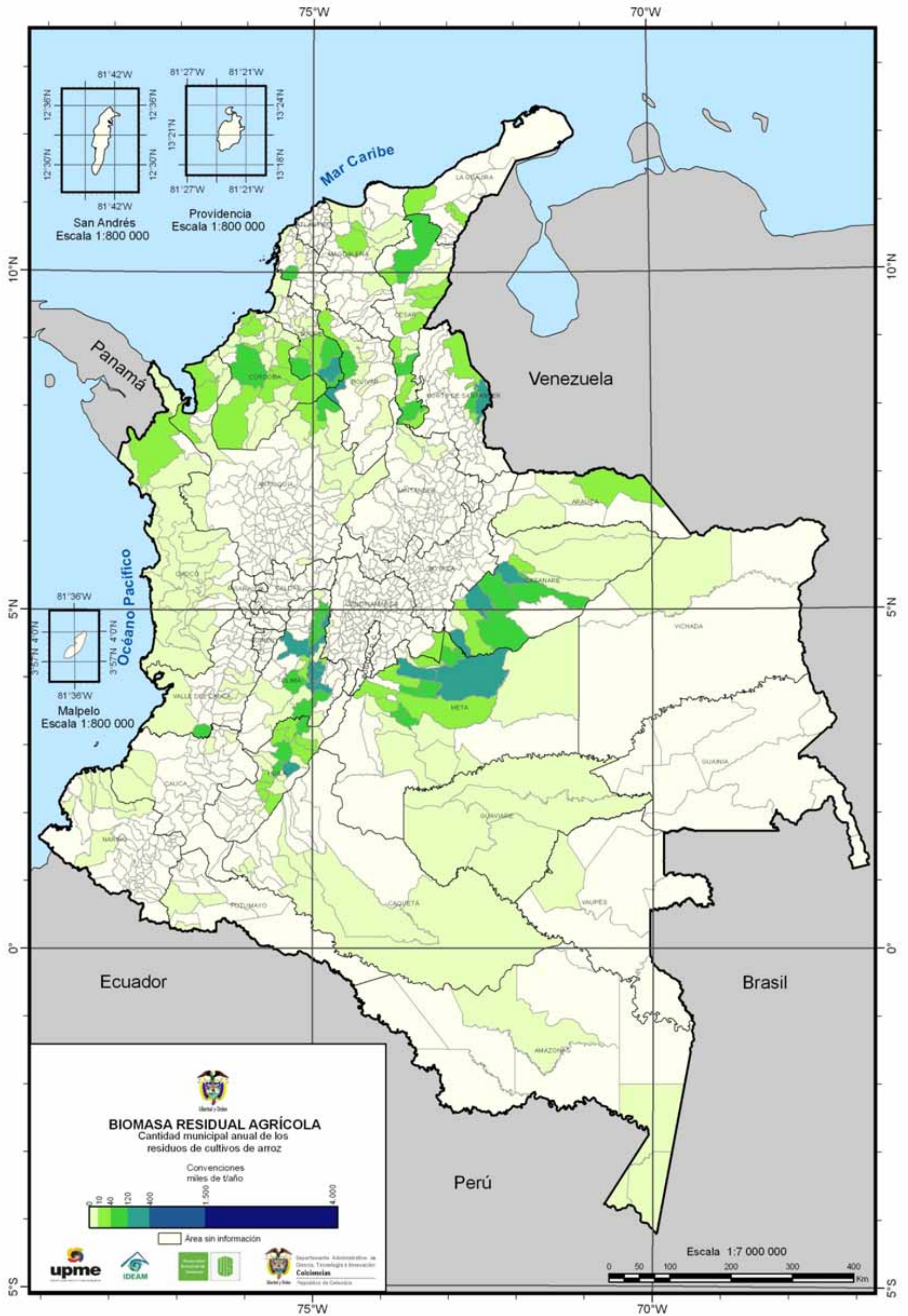


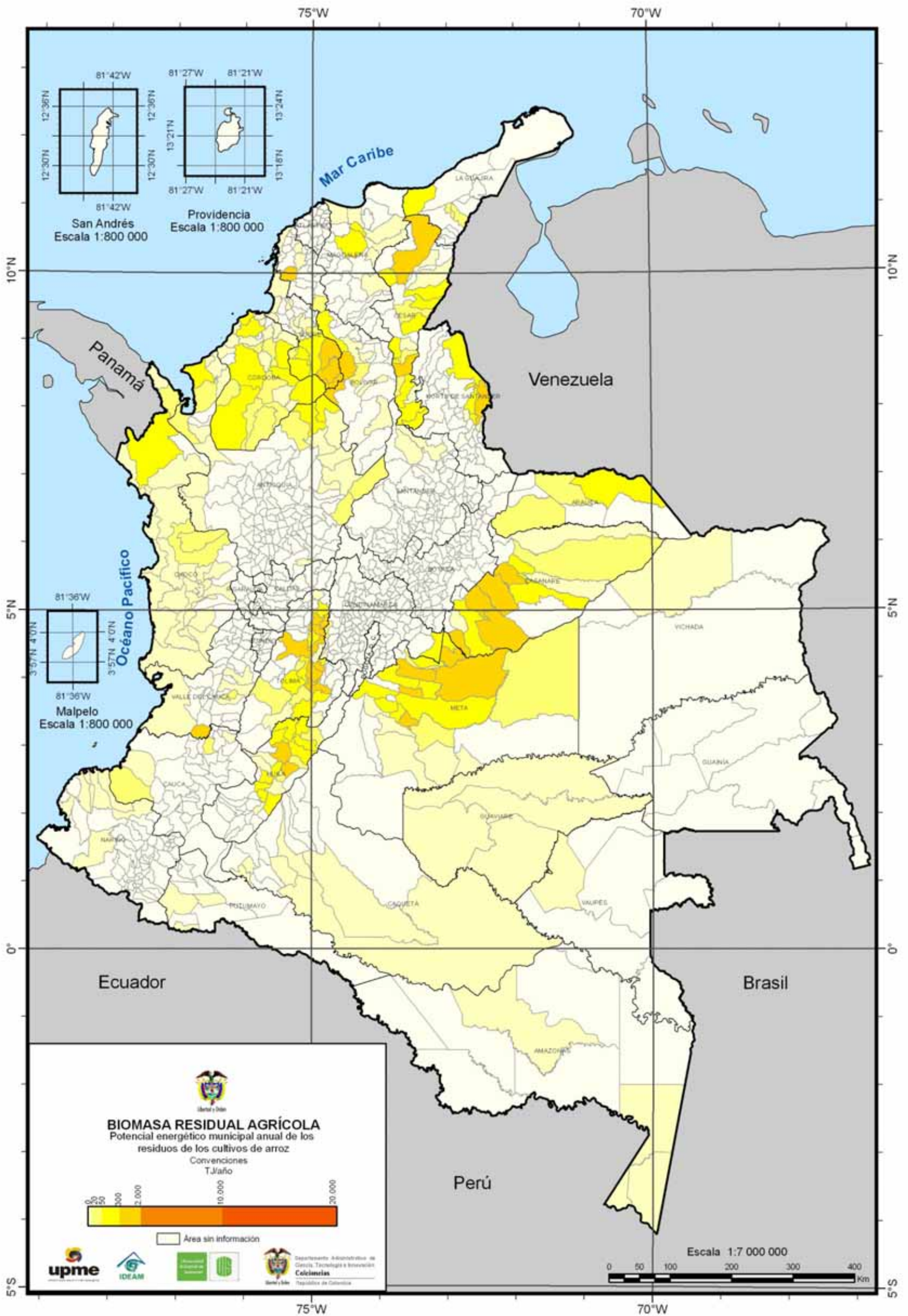


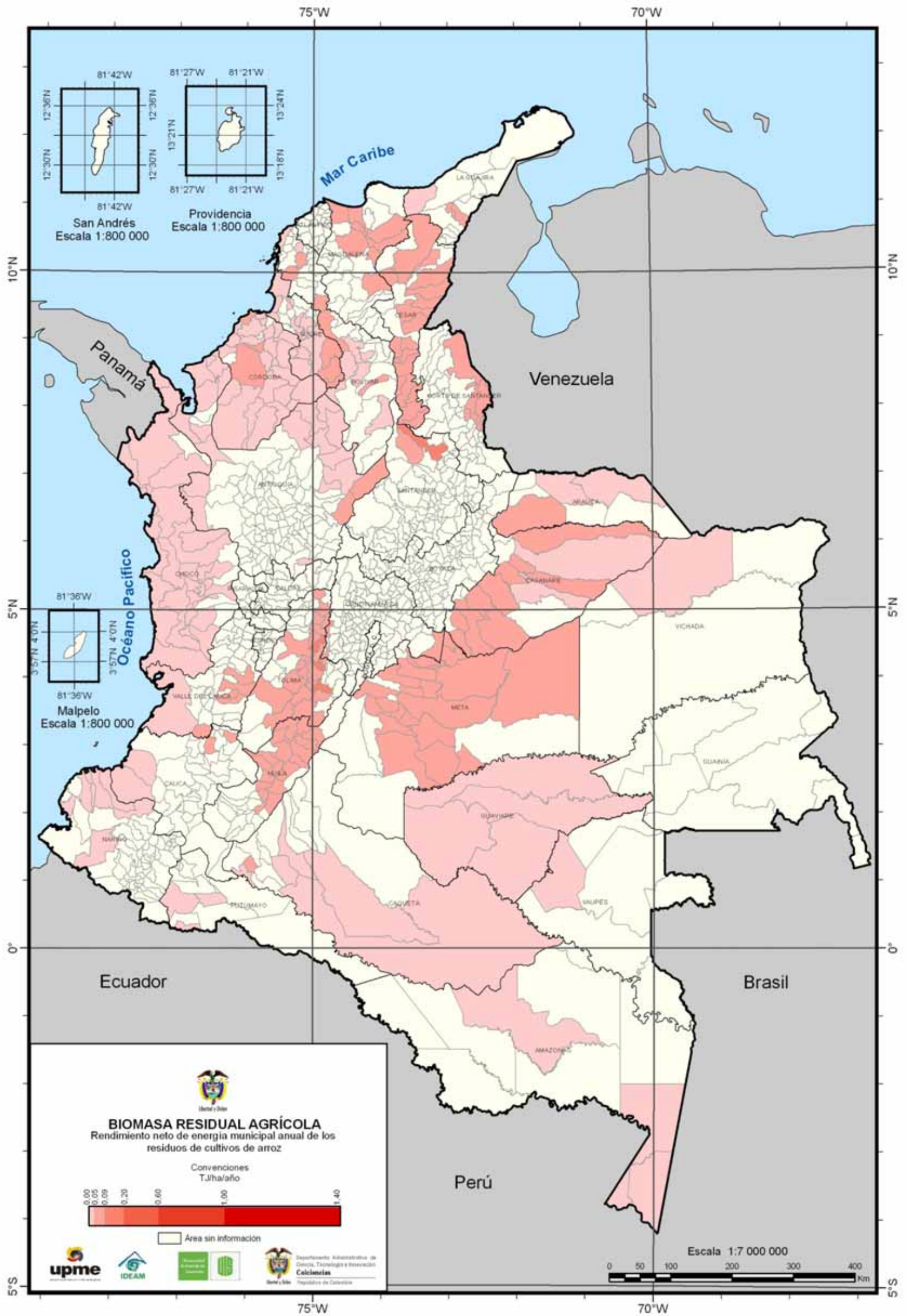


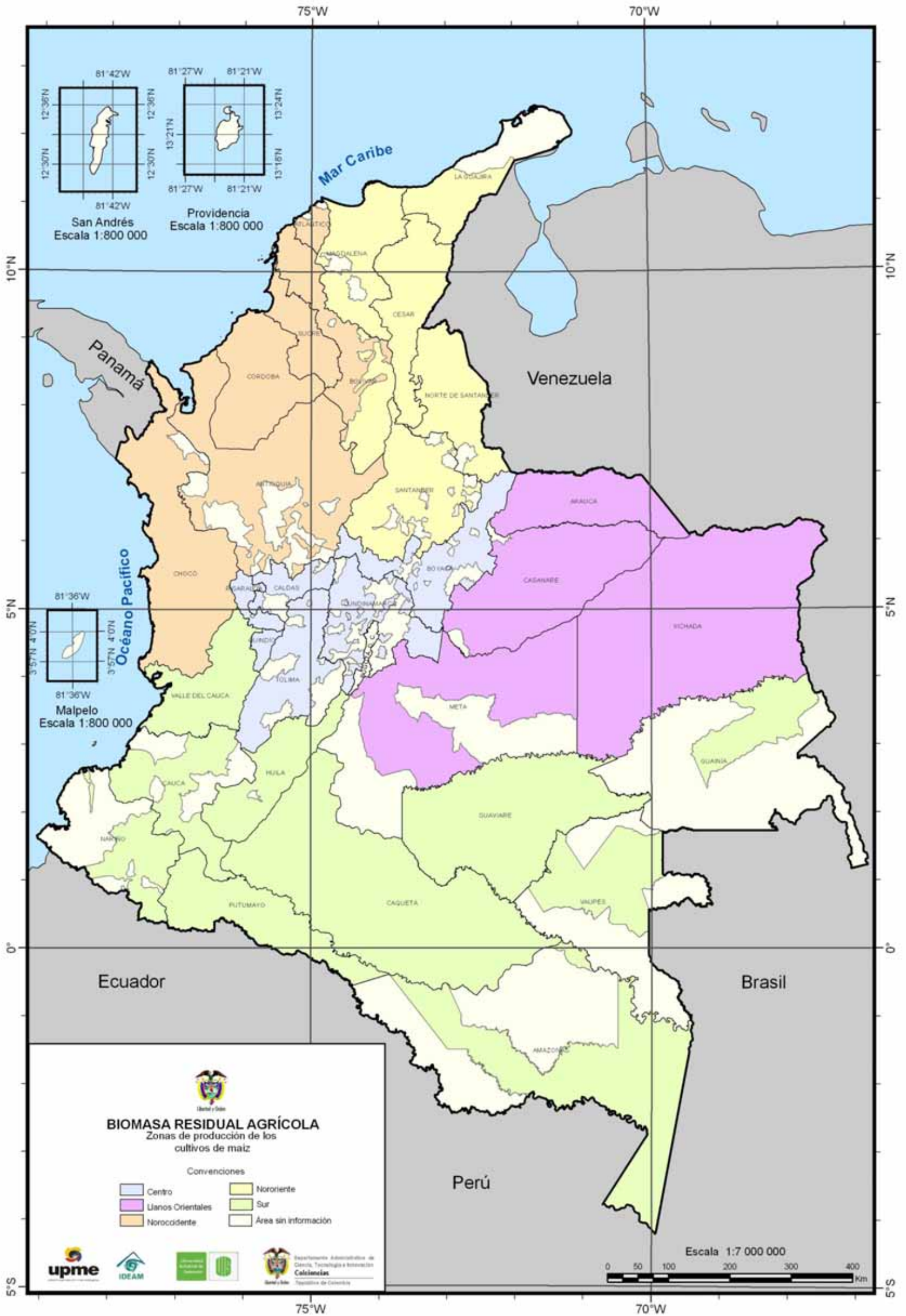


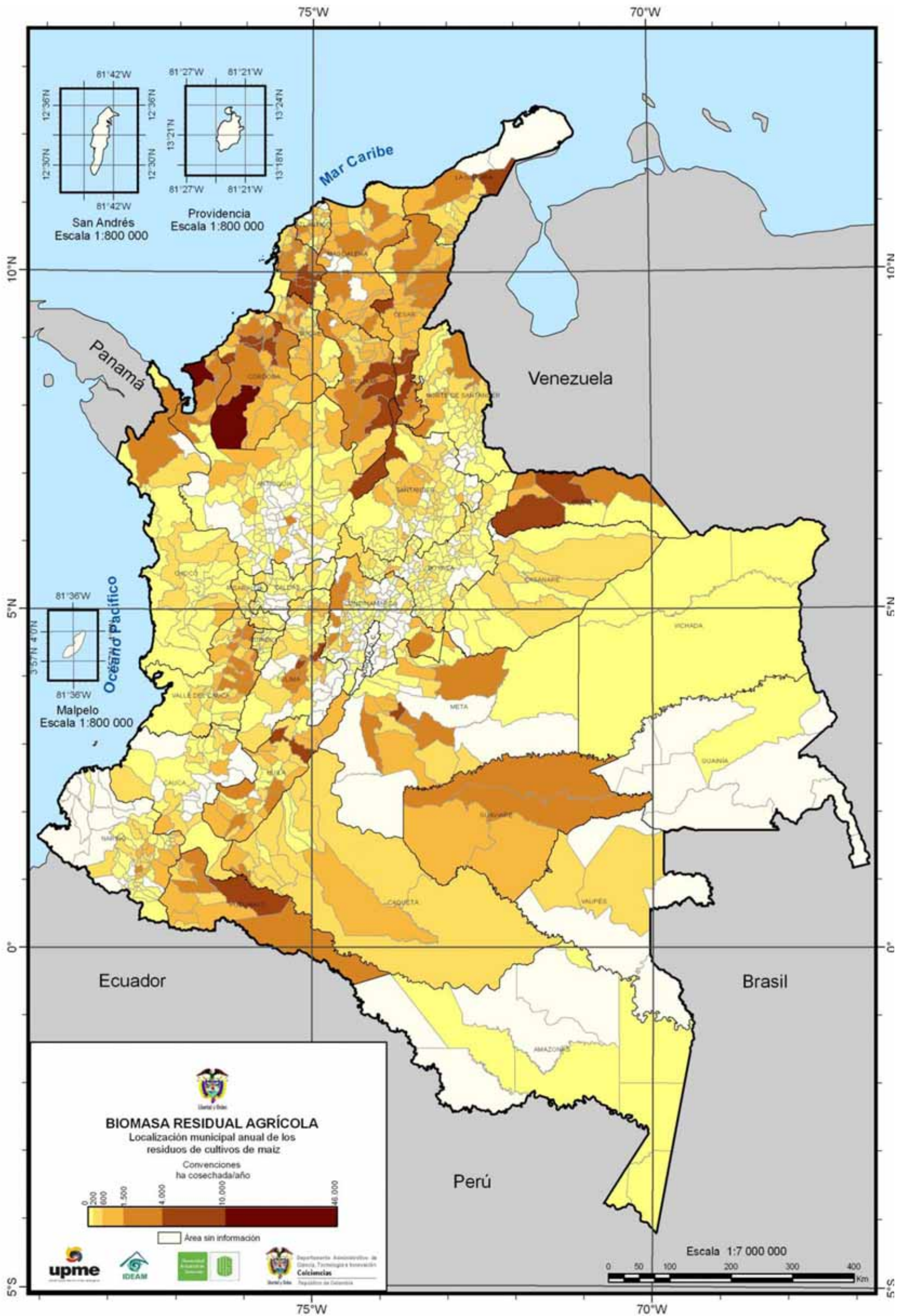


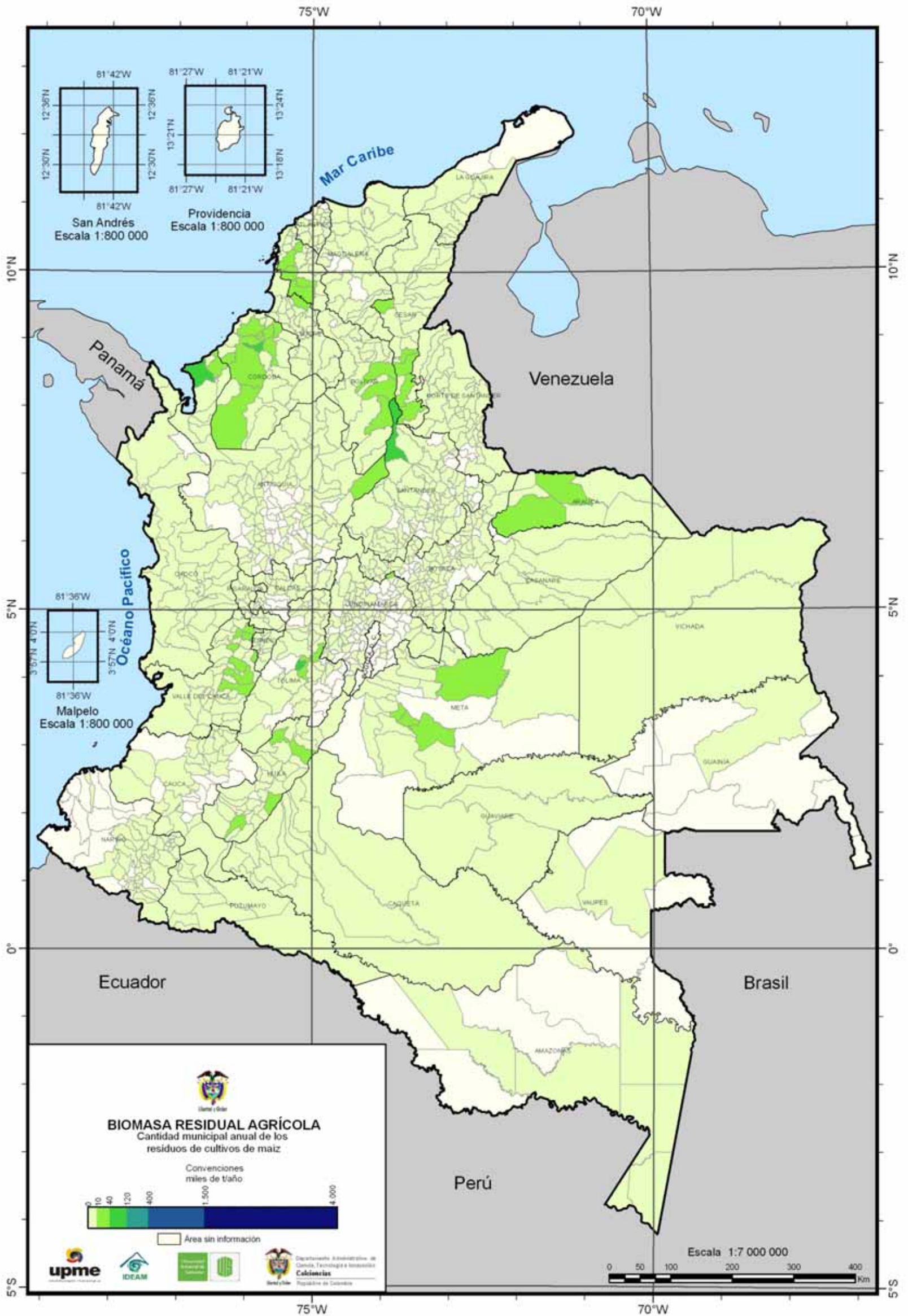


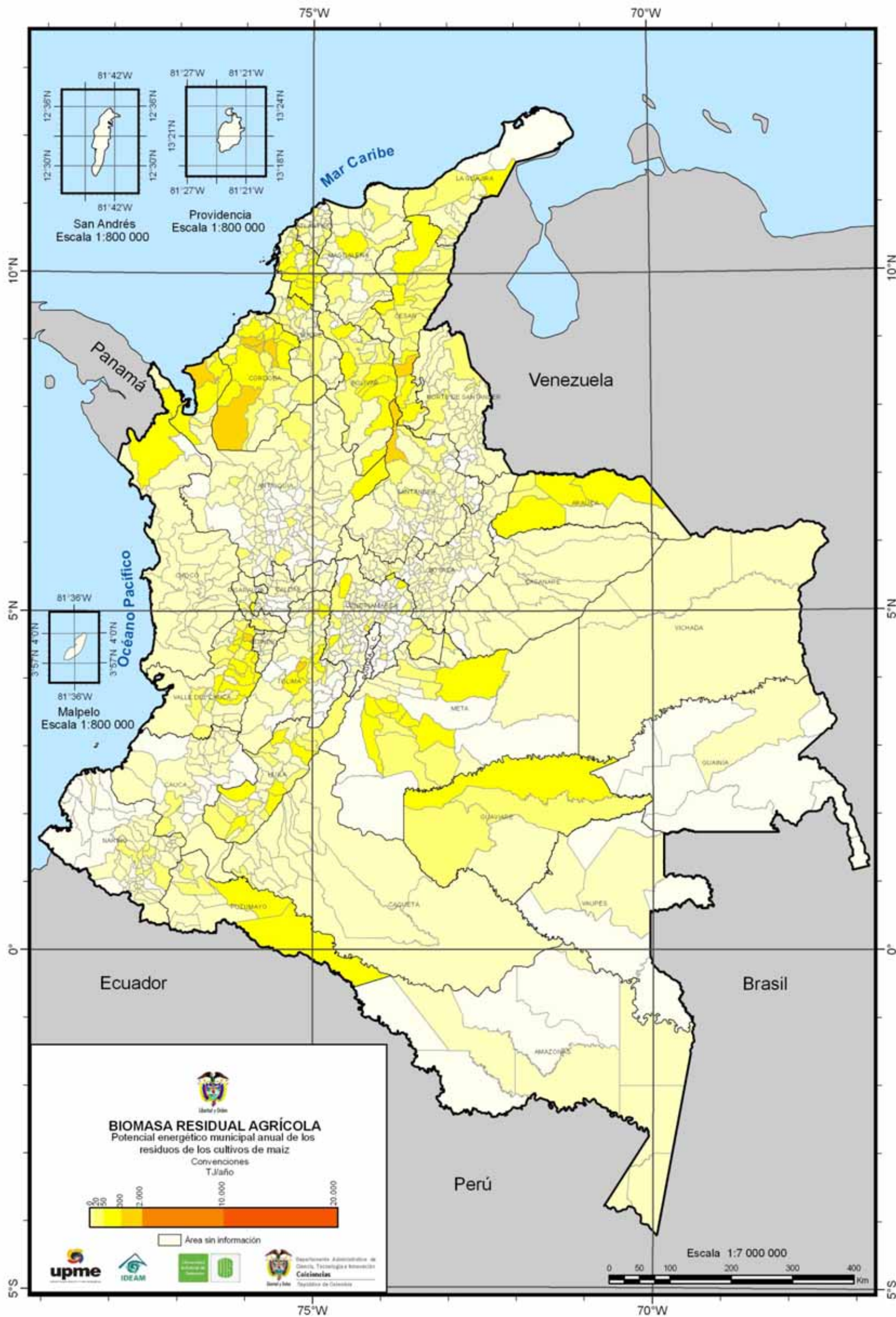


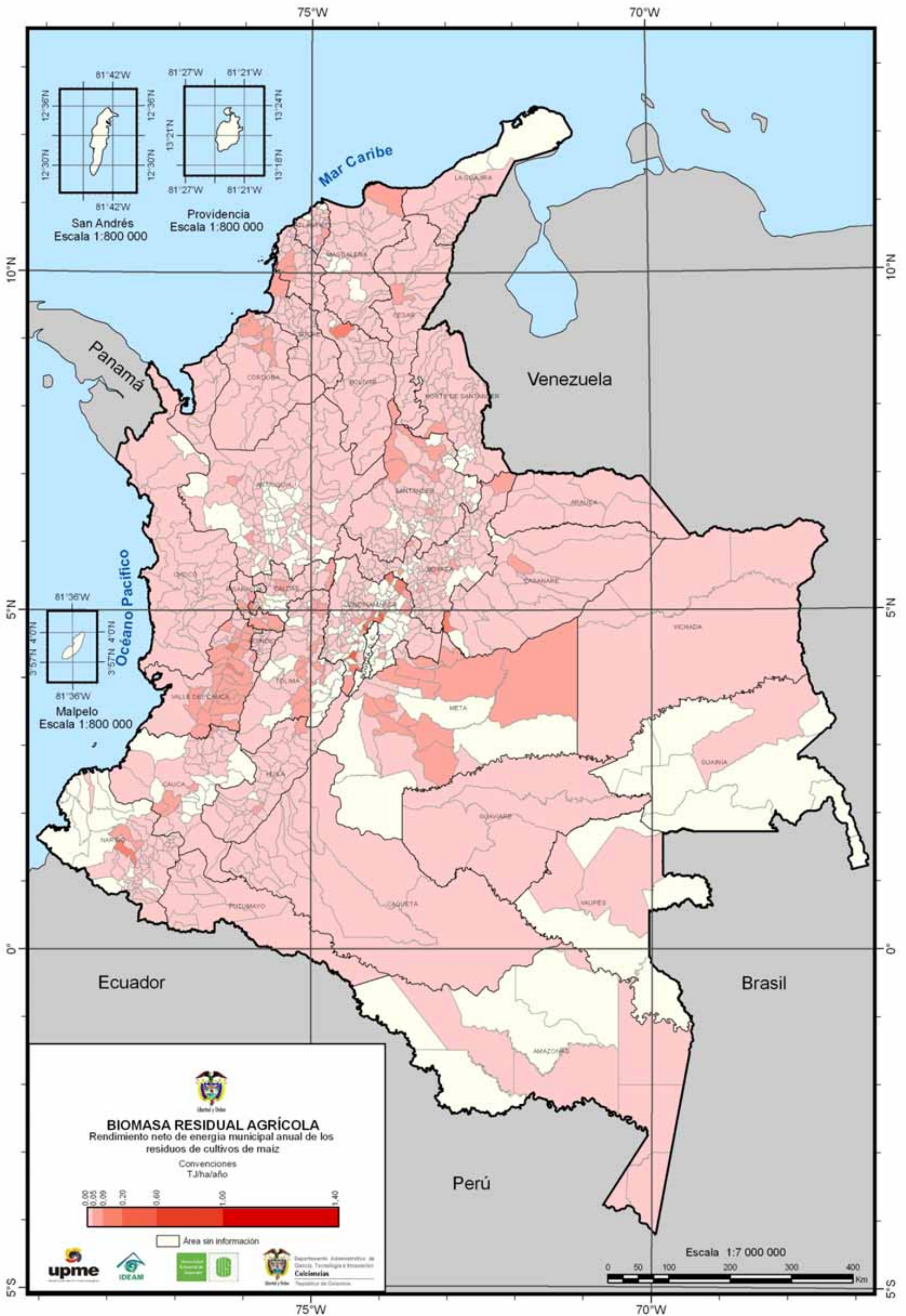


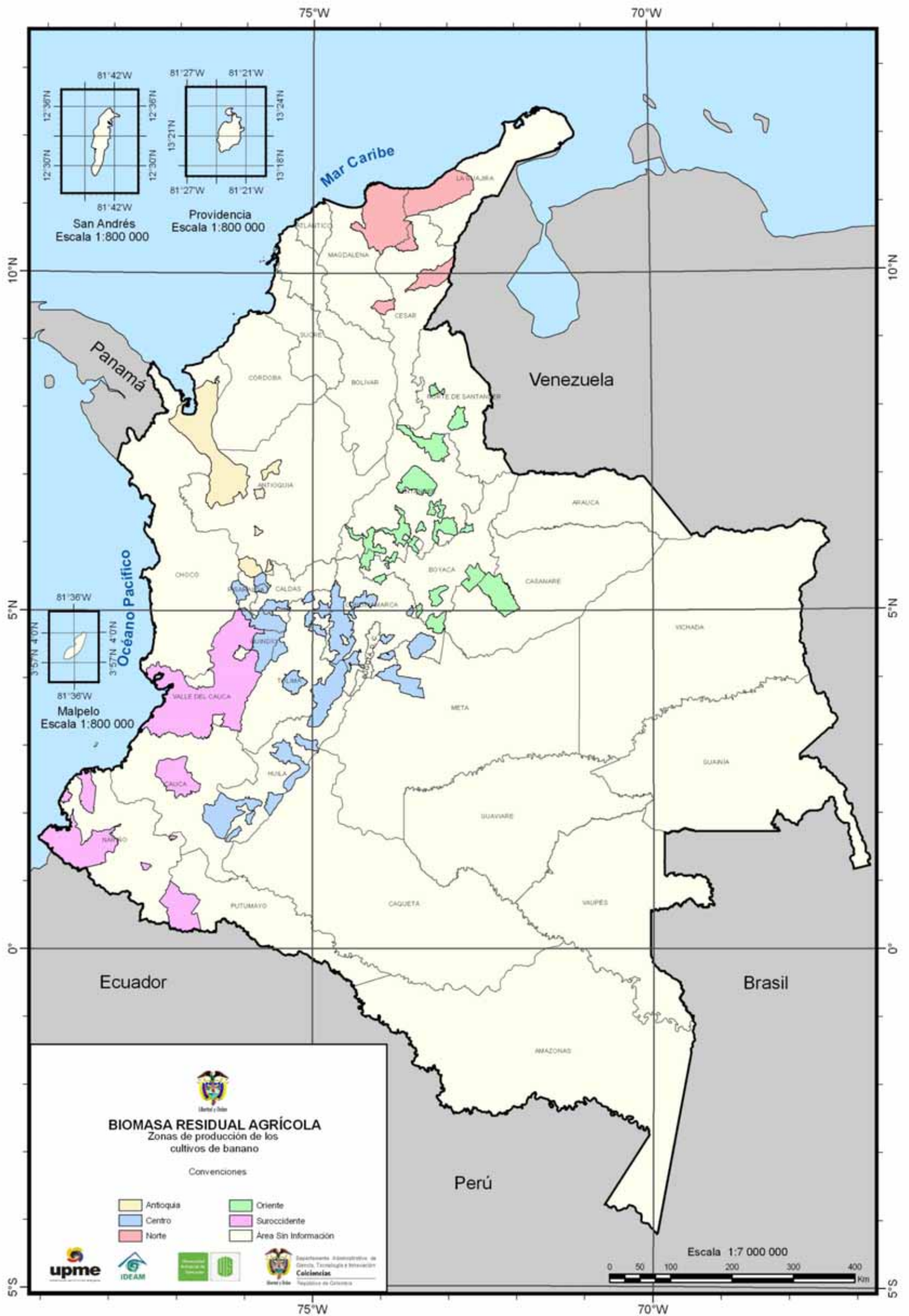


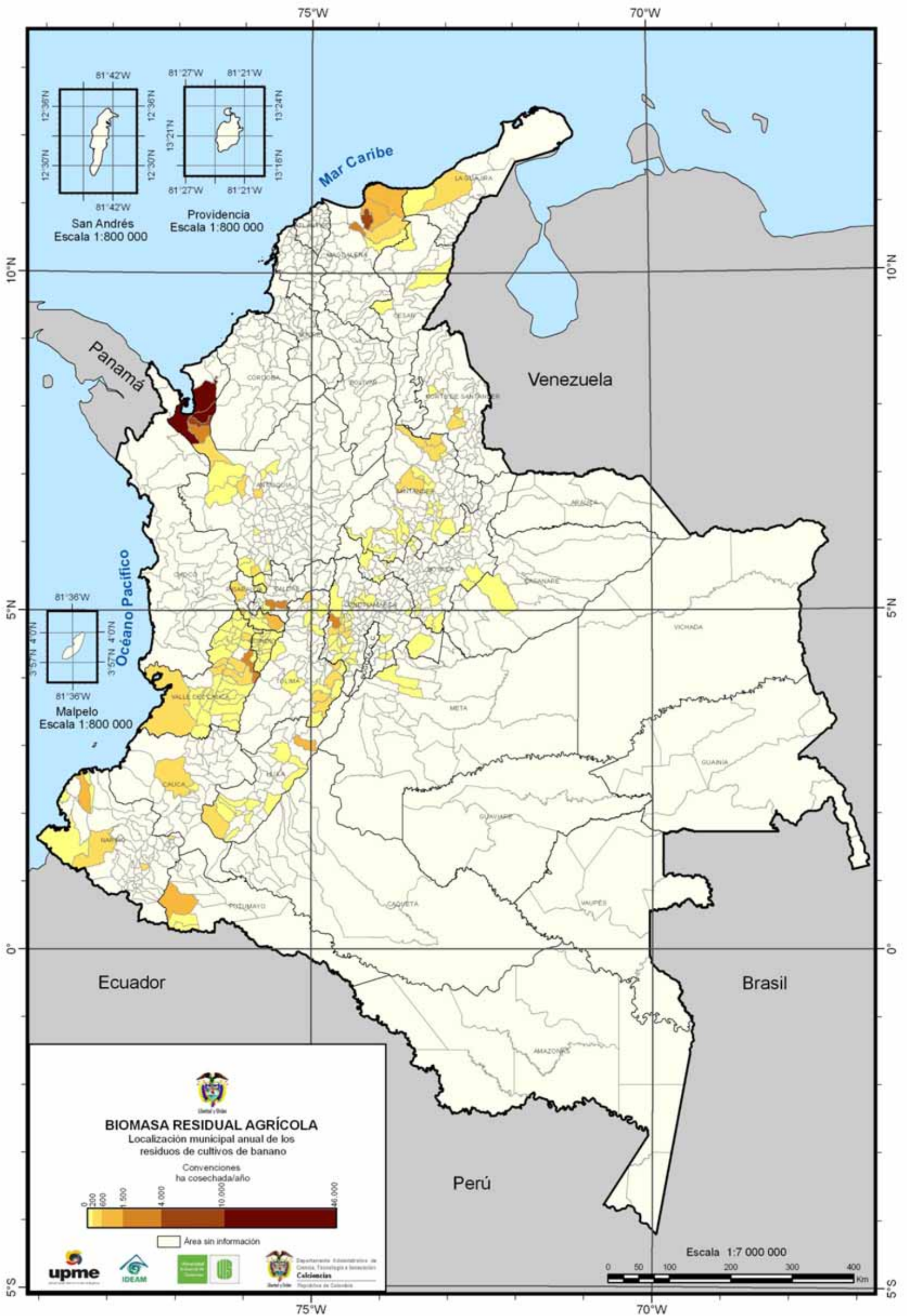


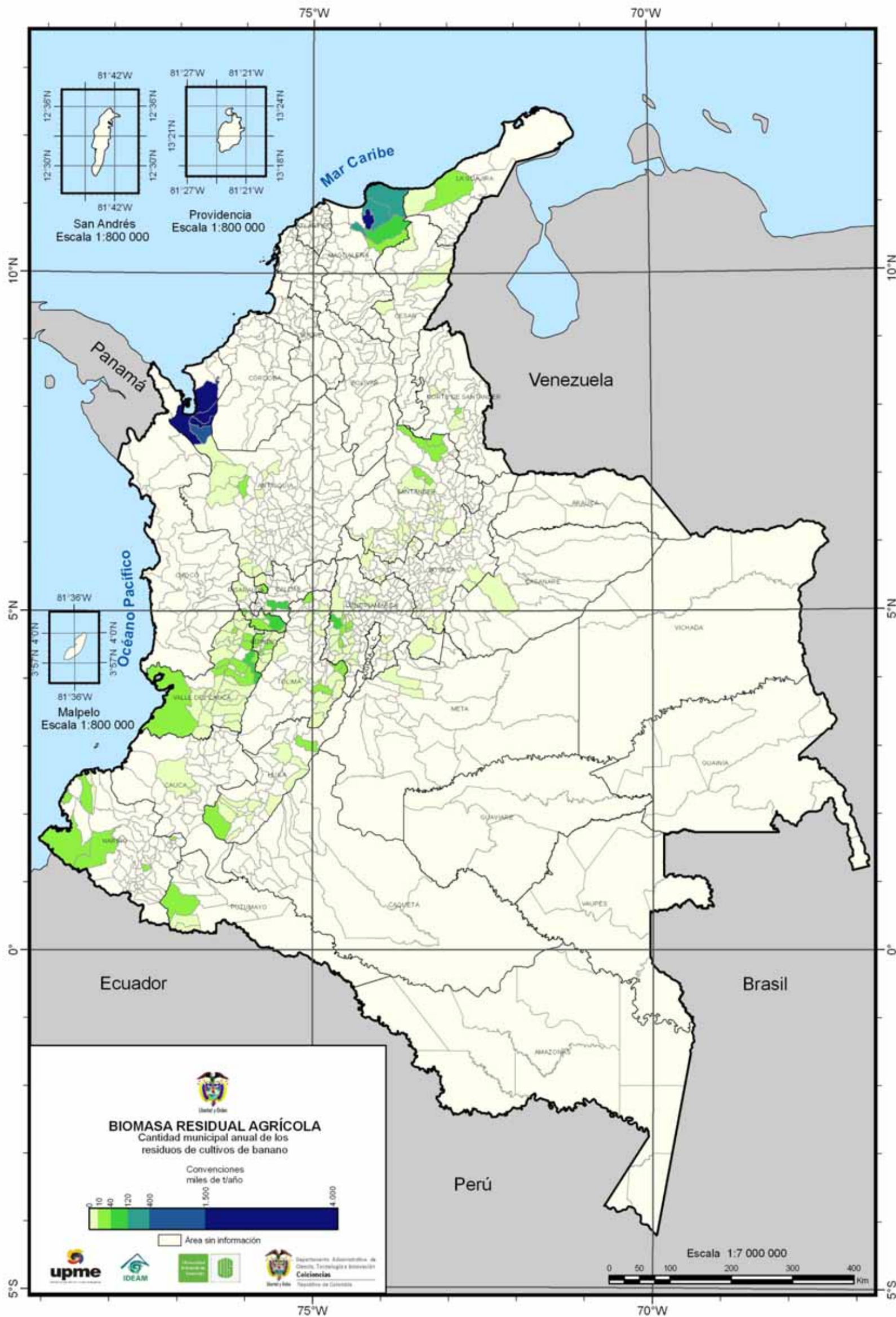




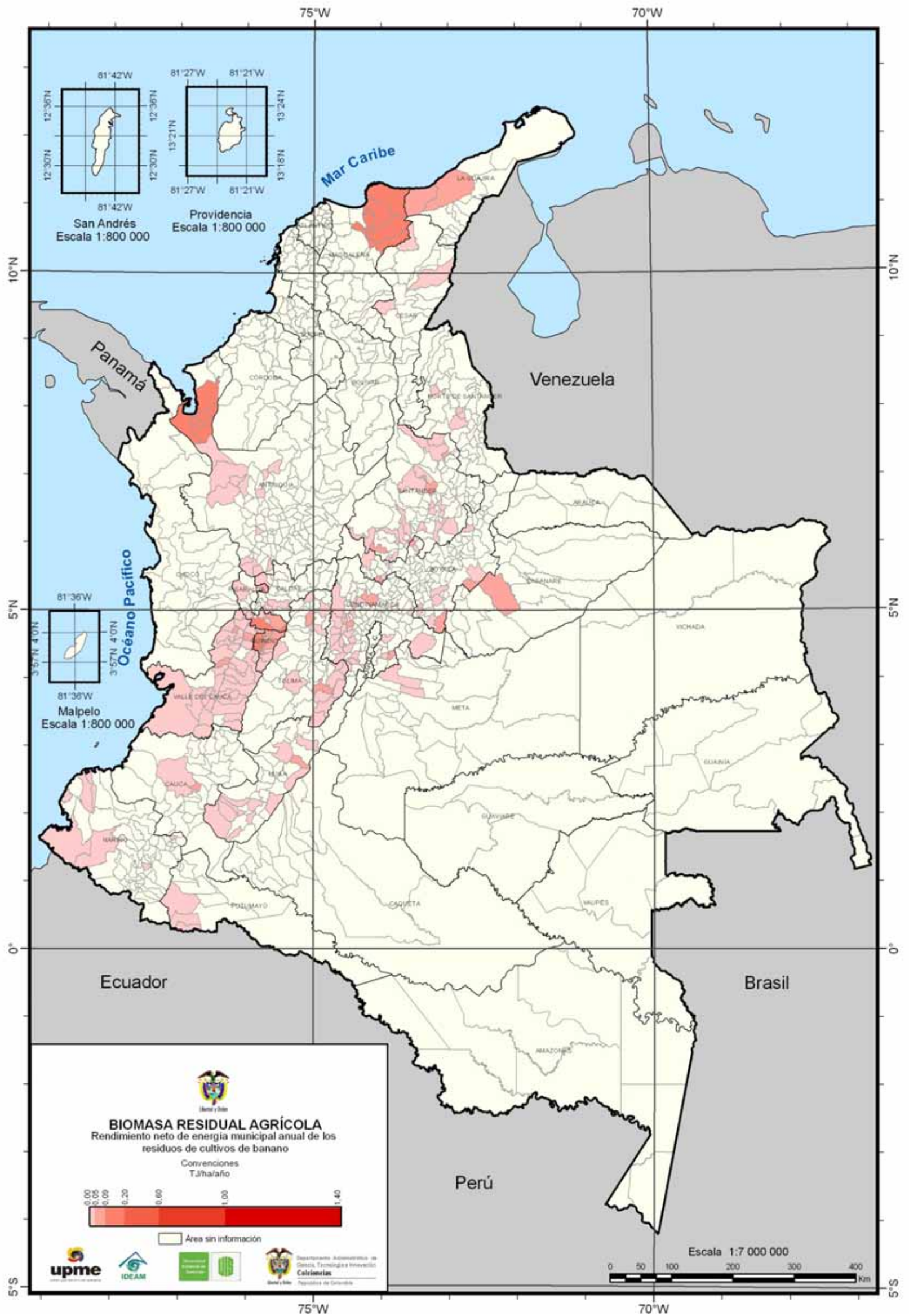


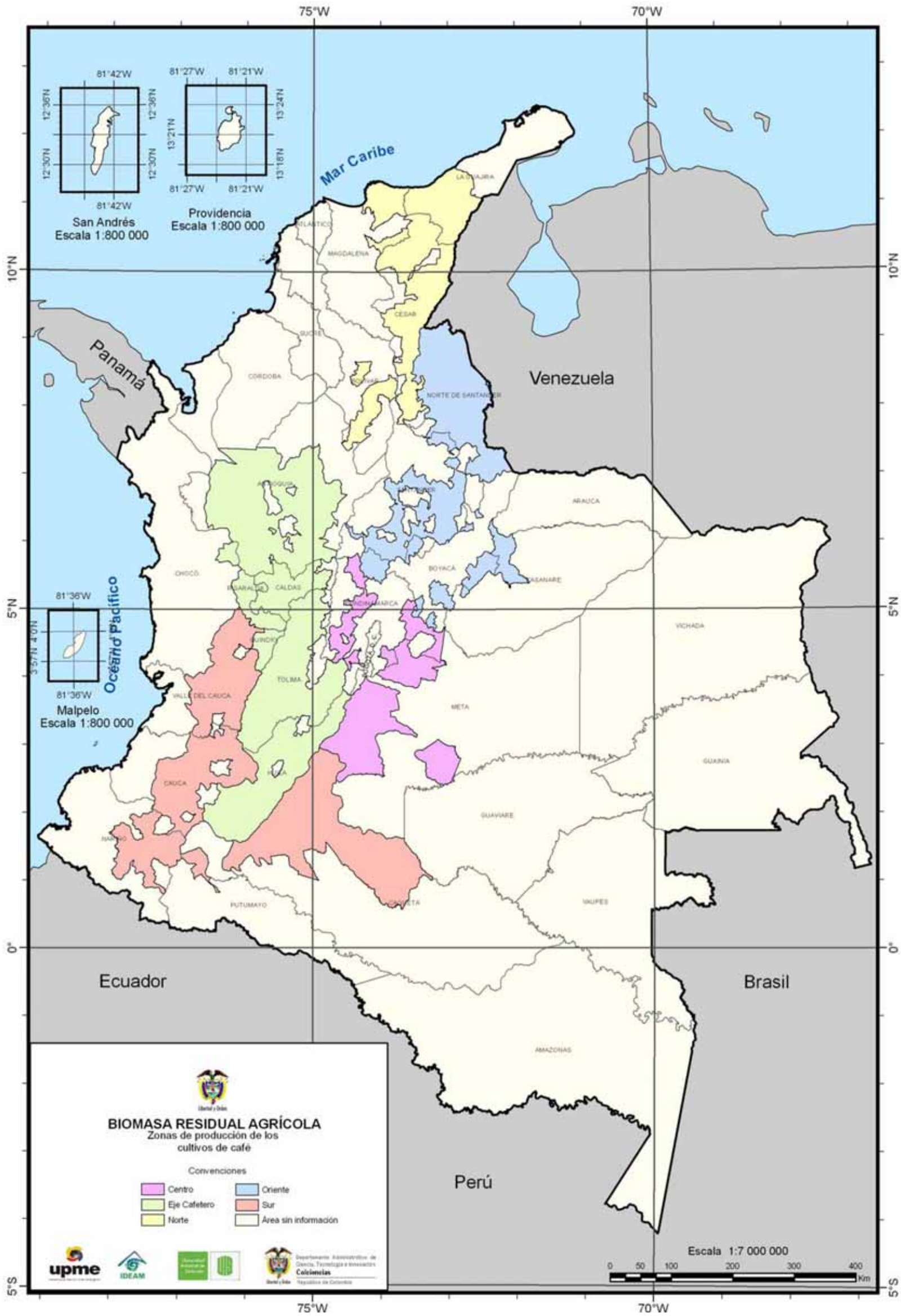


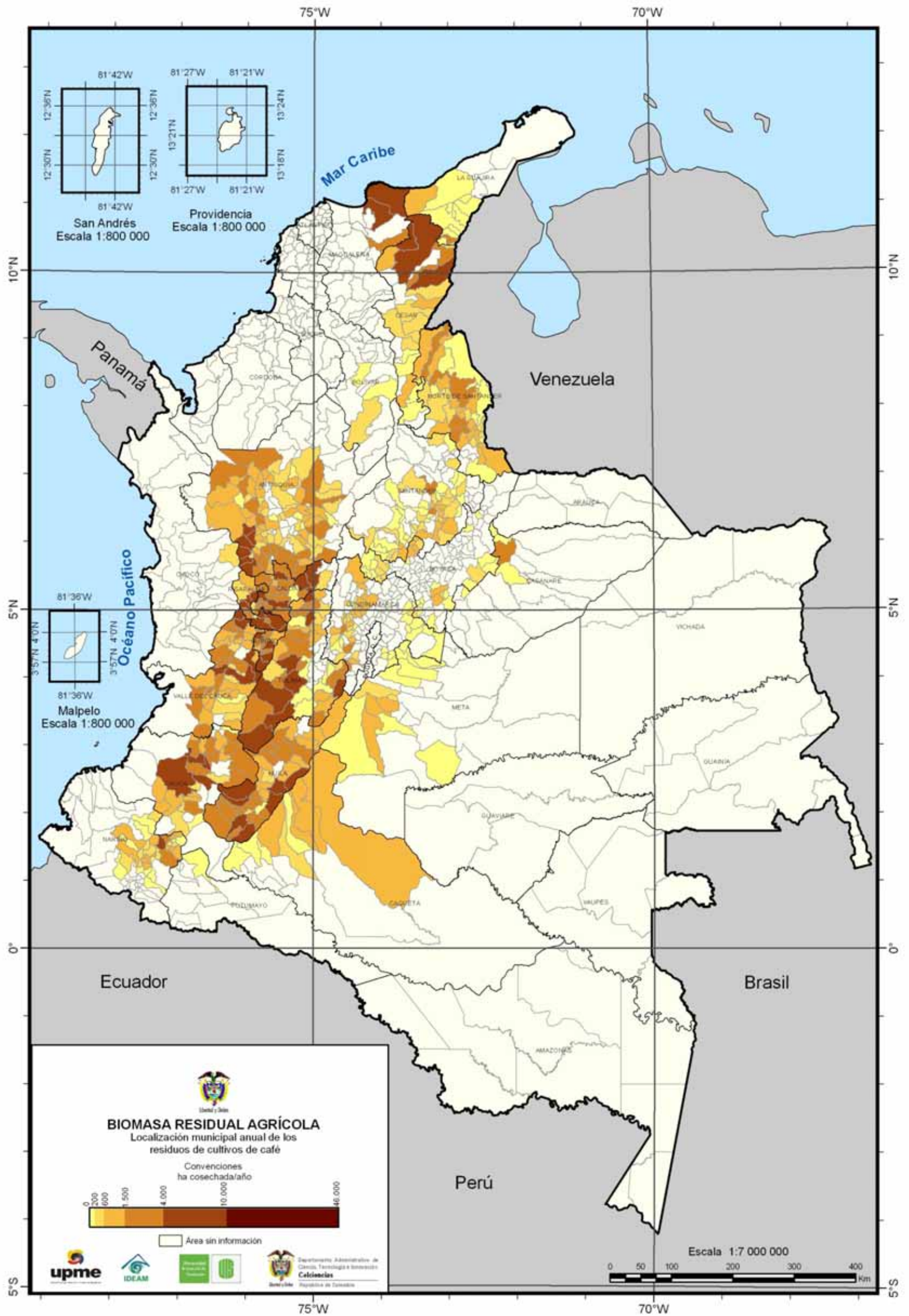


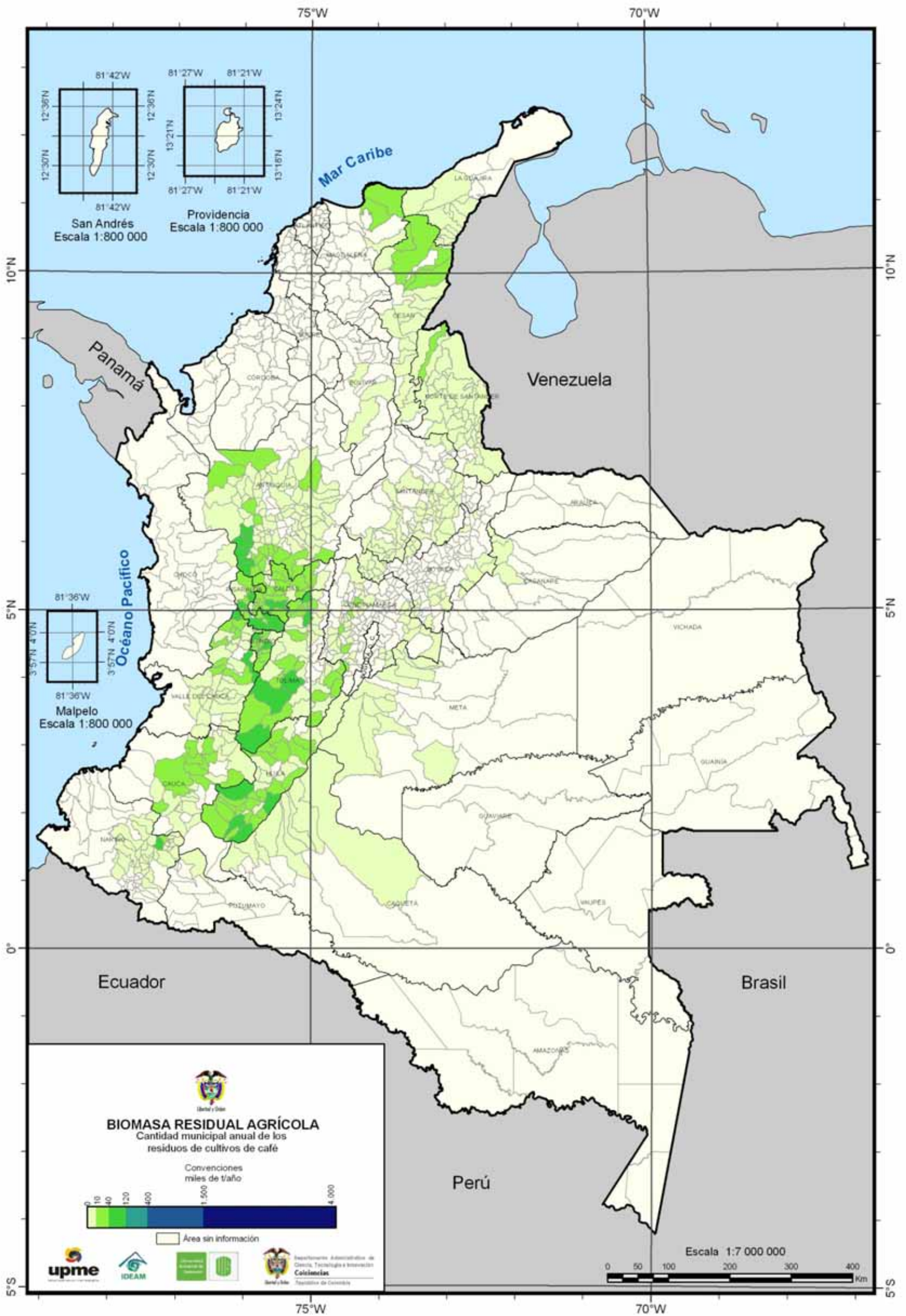


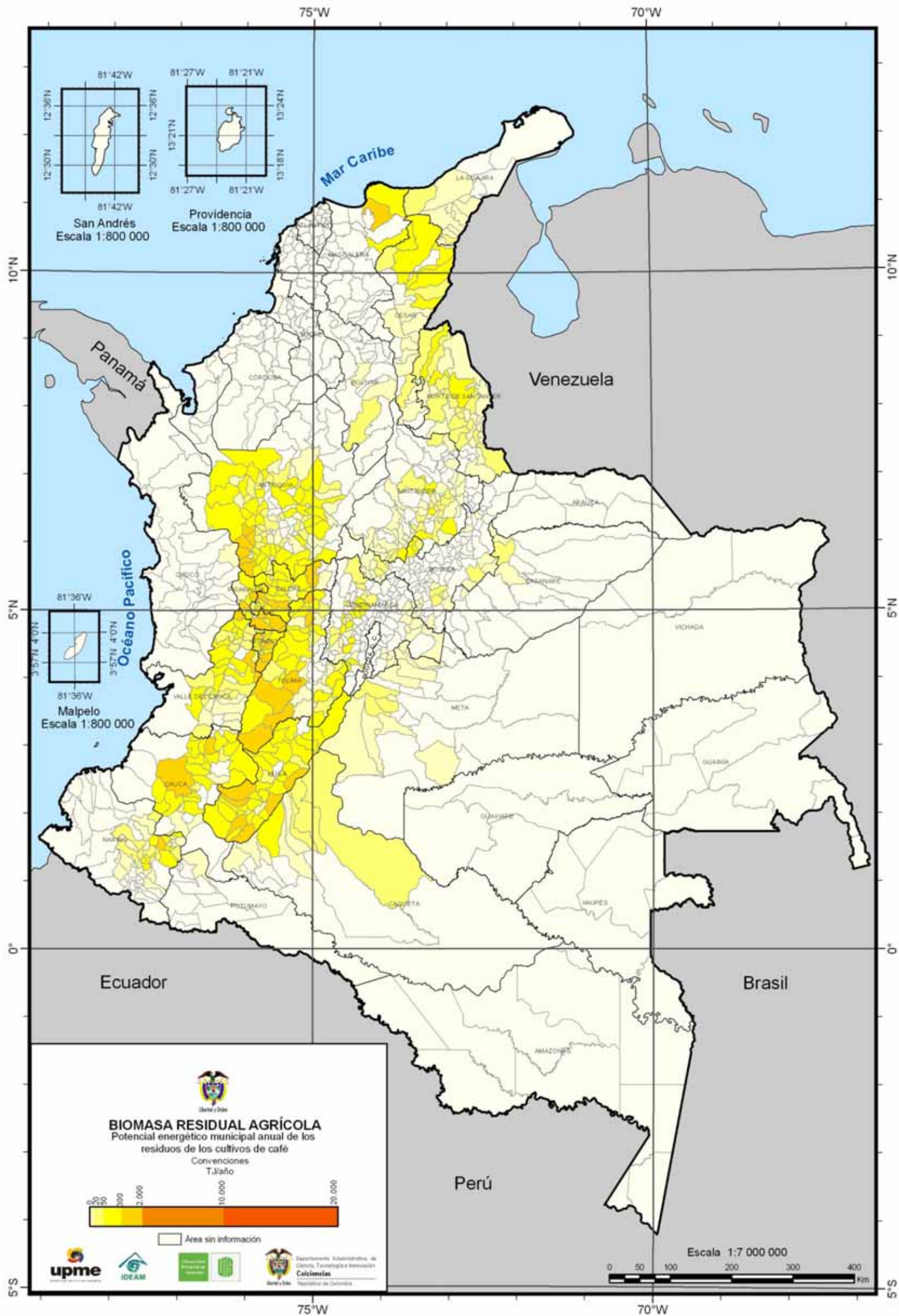


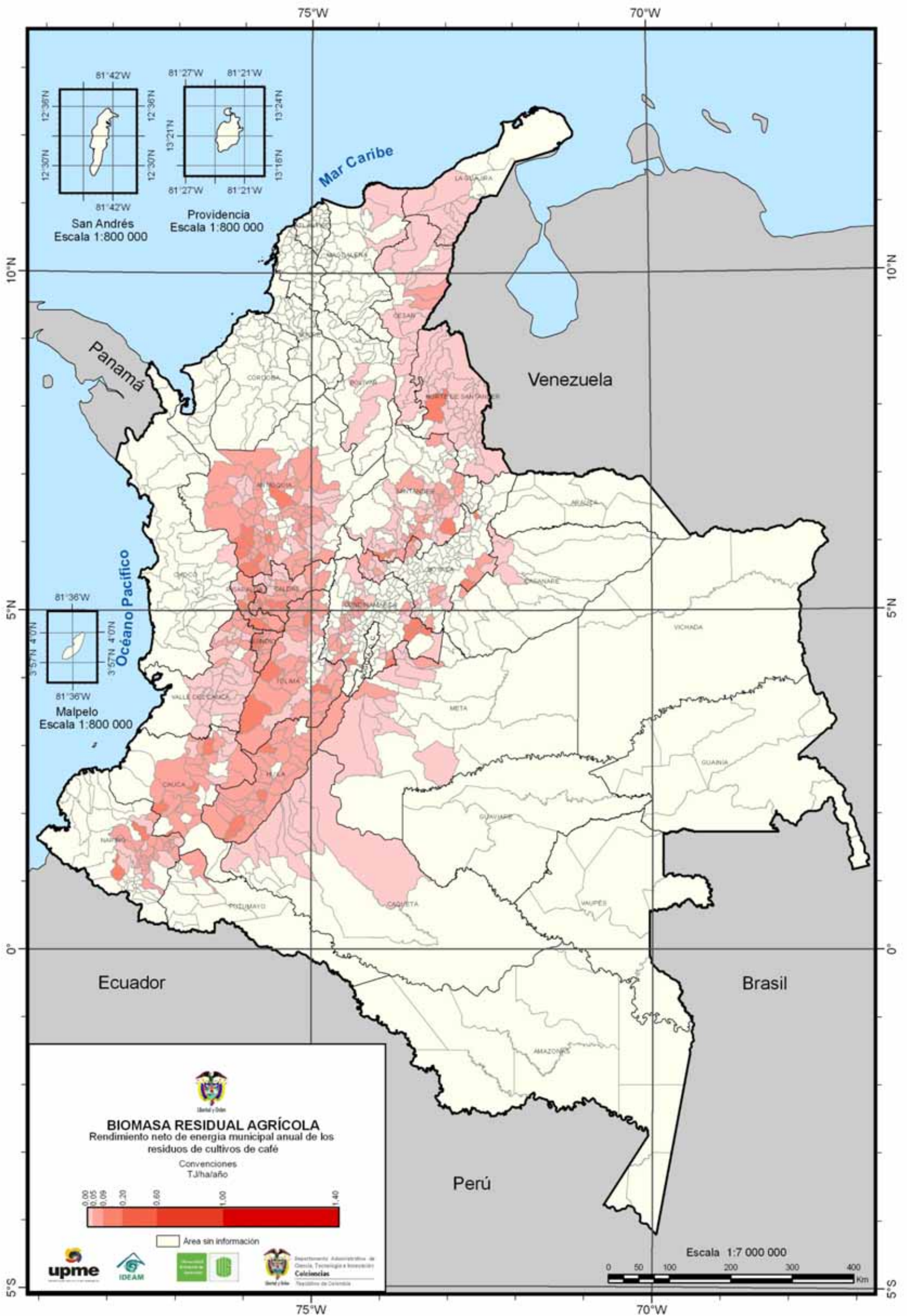
















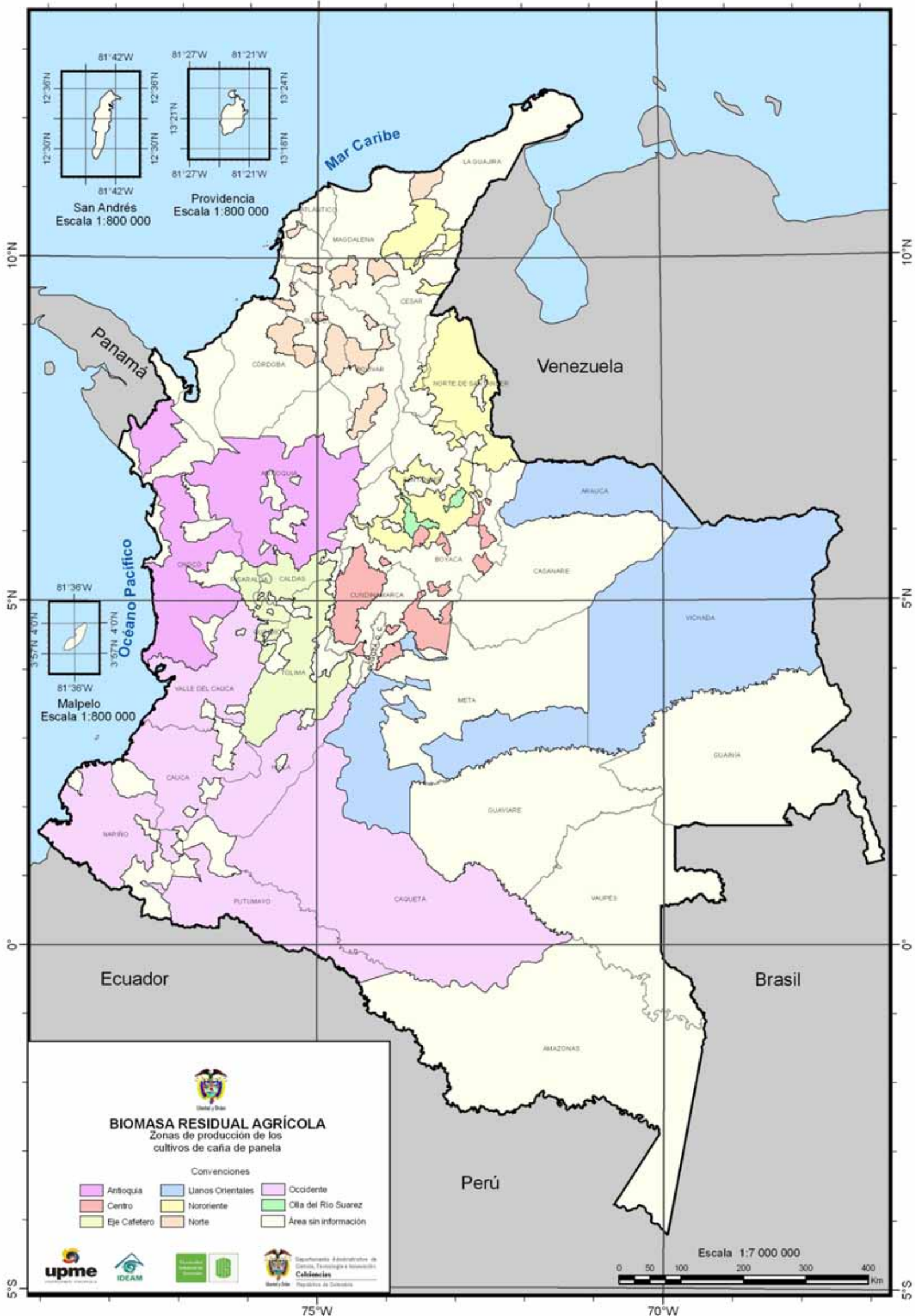






75°W

70°W



BIOMASA RESIDUAL AGRÍCOLA
Zonas de producción de los cultivos de caña de panela

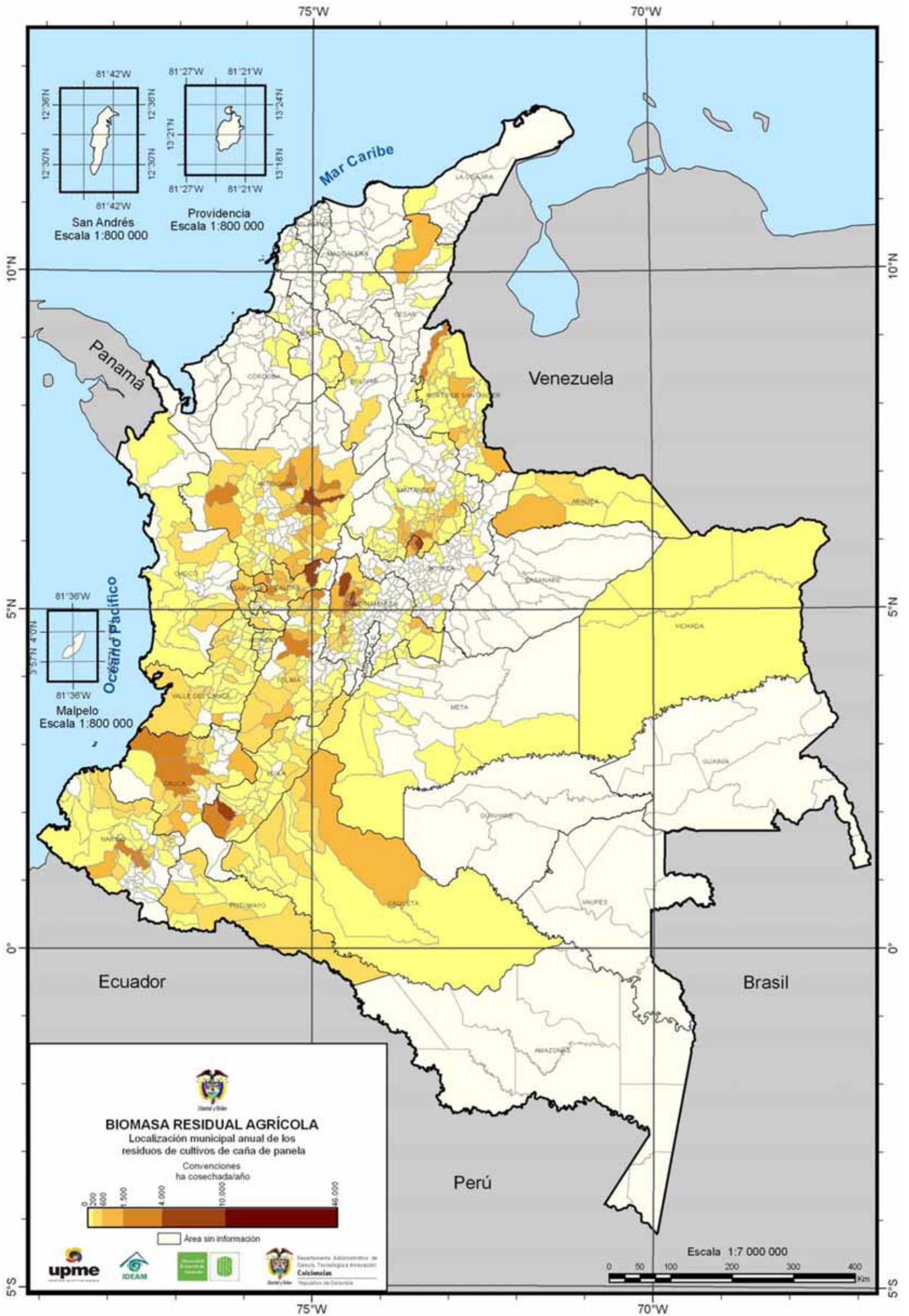
Con convenciones

- | | | |
|--|---|--|
| Antioquia | Llanos Orientales | Occidente |
| Centro | Nororiente | Cilia del Rio Suarez |
| Eje Cafetero | Norte | Área sin información |



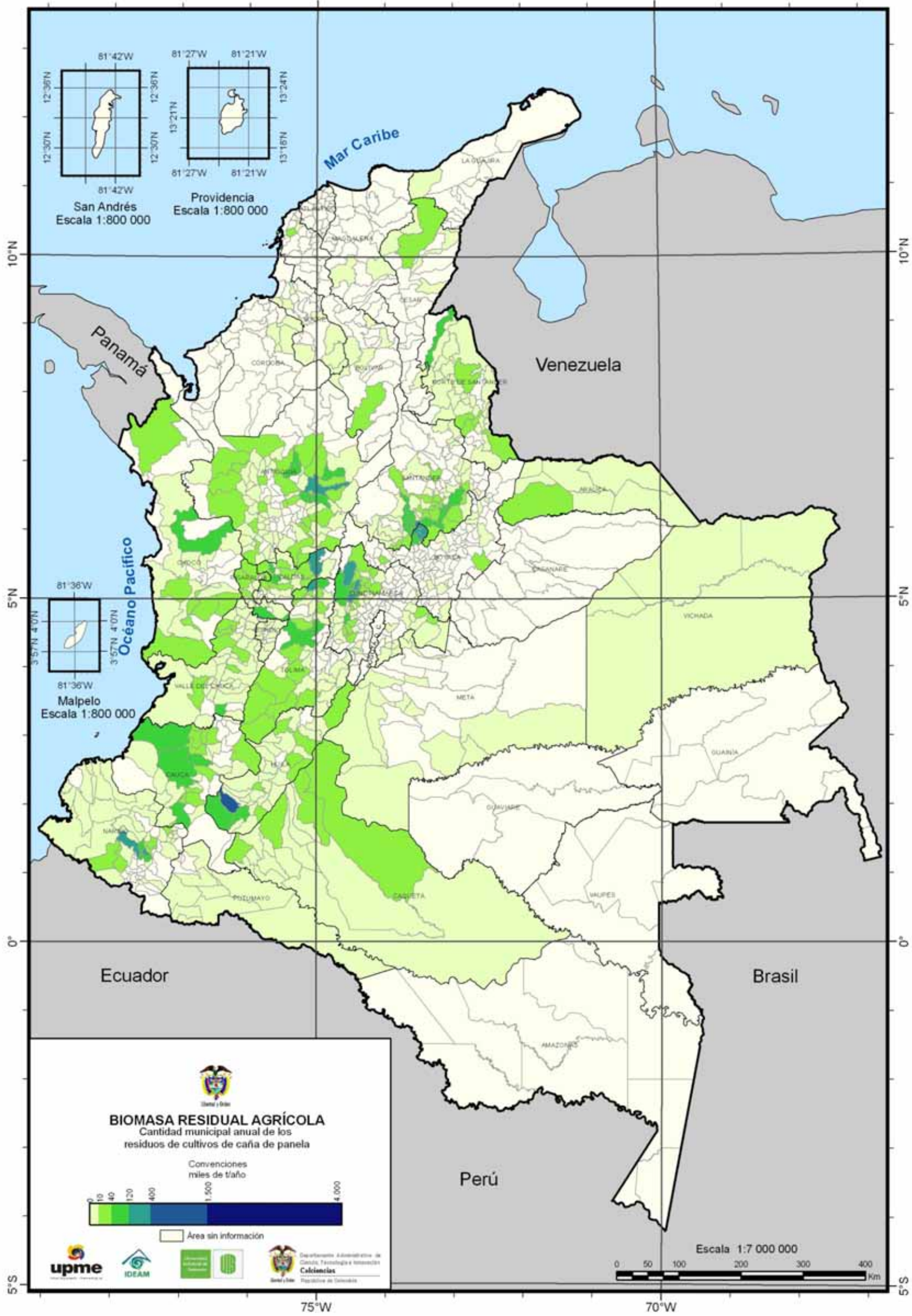


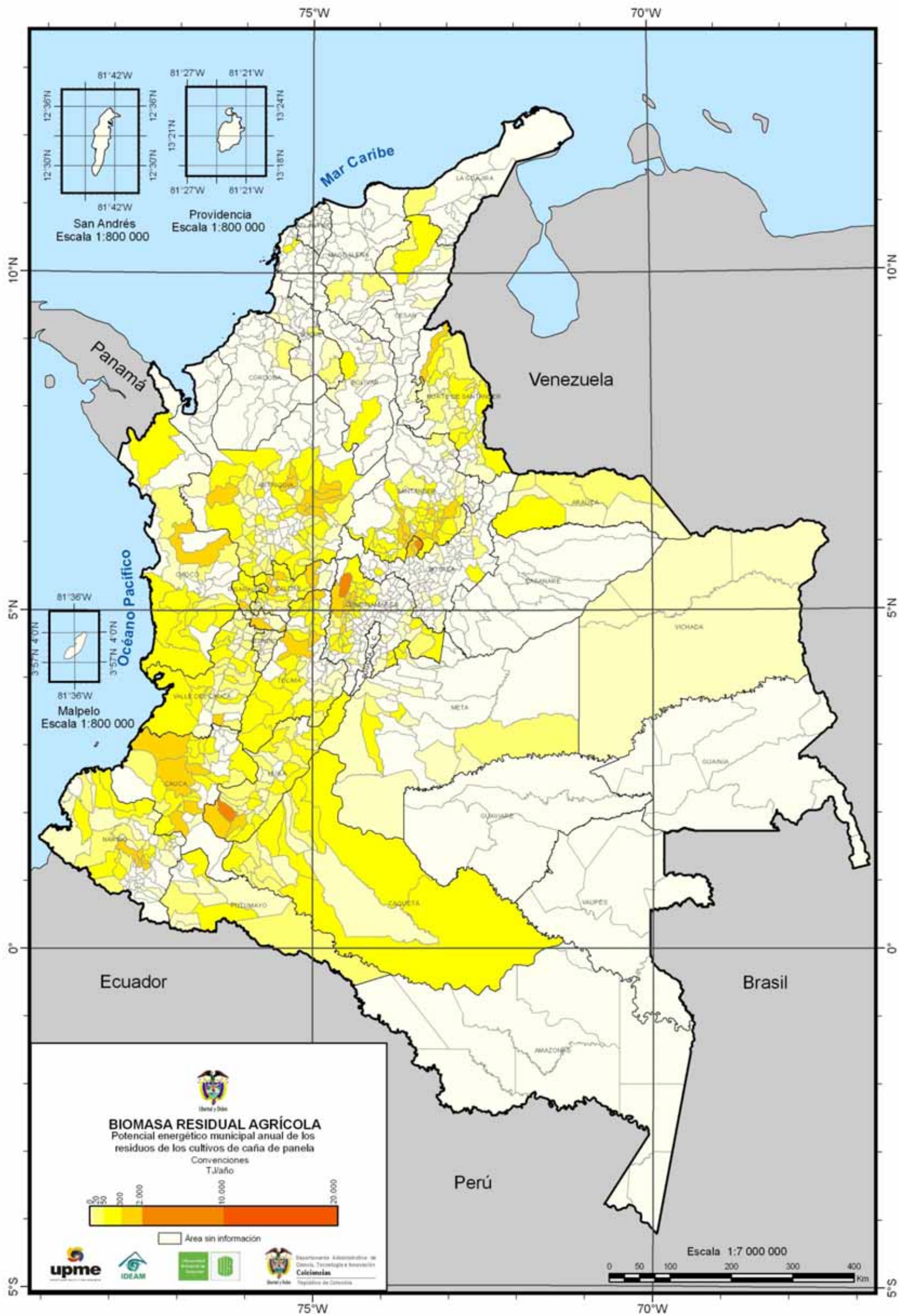

Escala 1:7 000 000

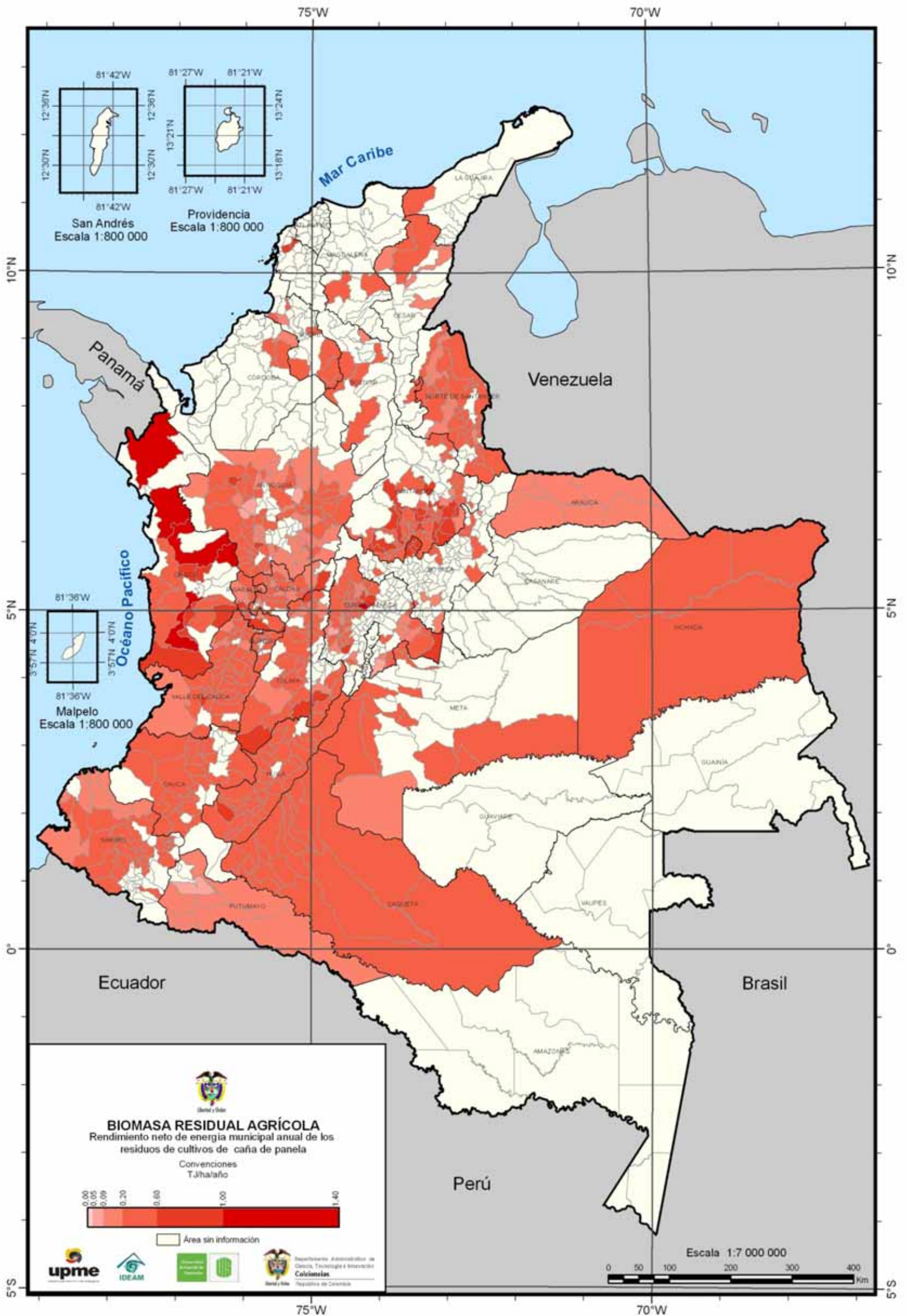



75°W

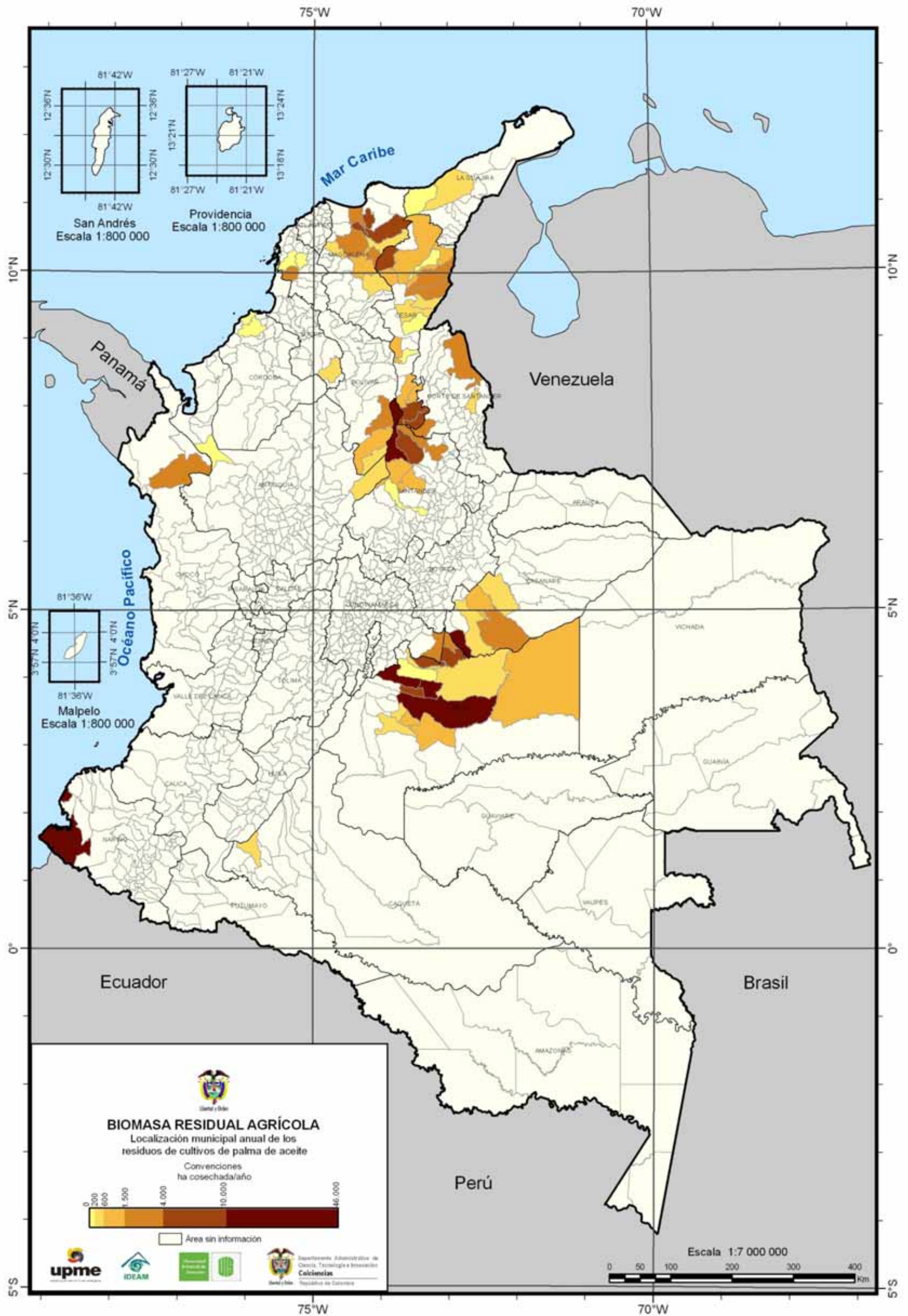
70°W

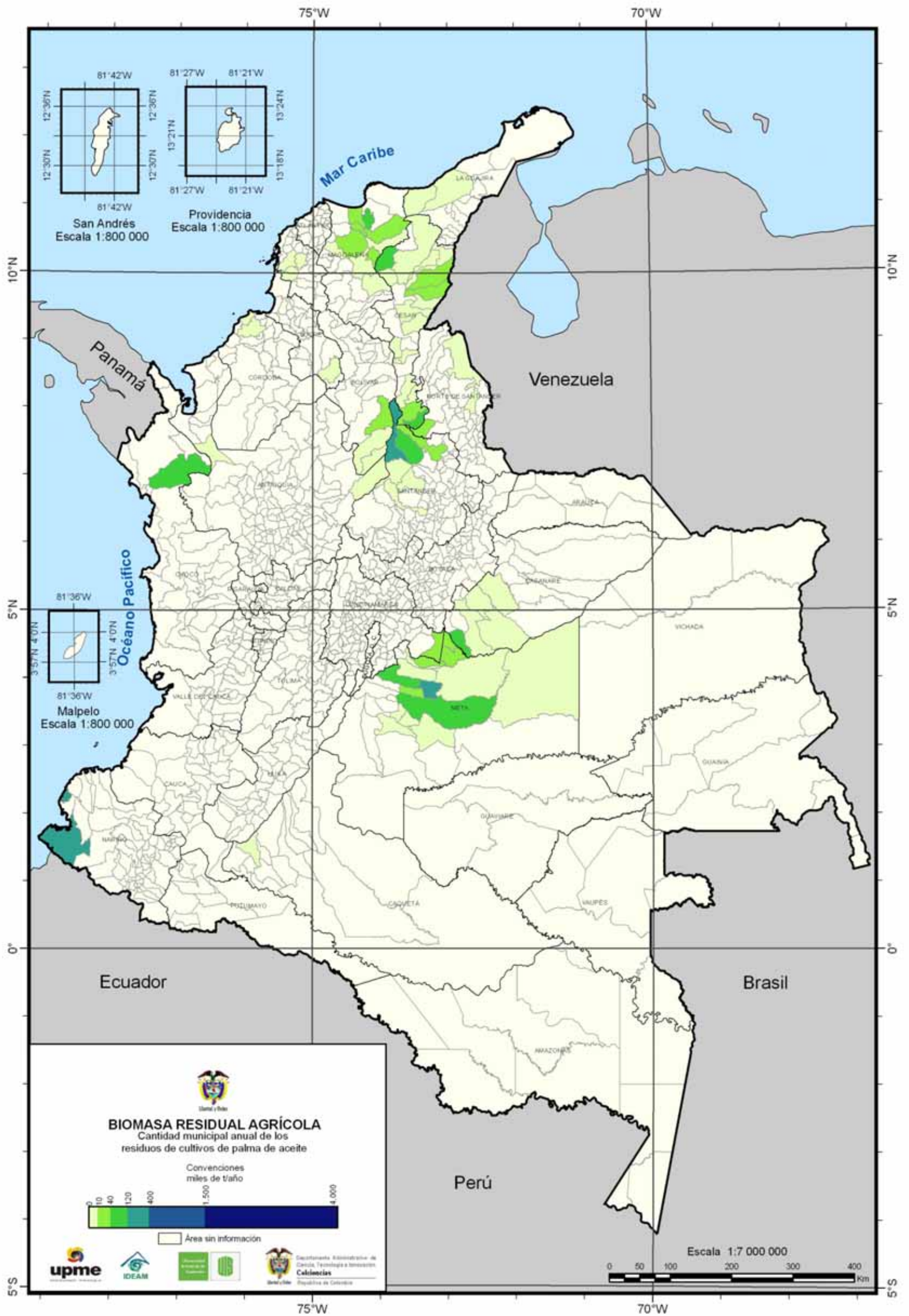






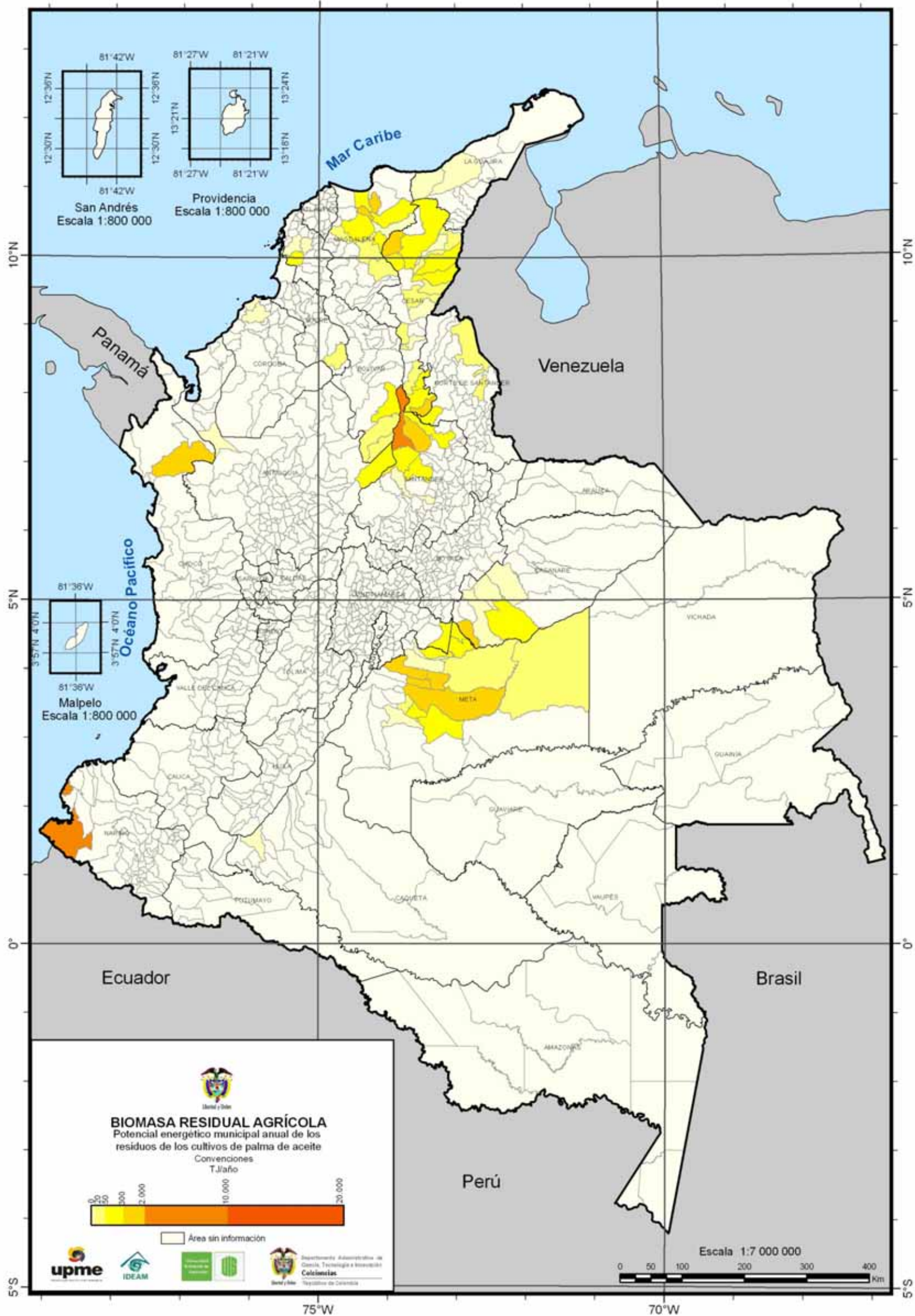




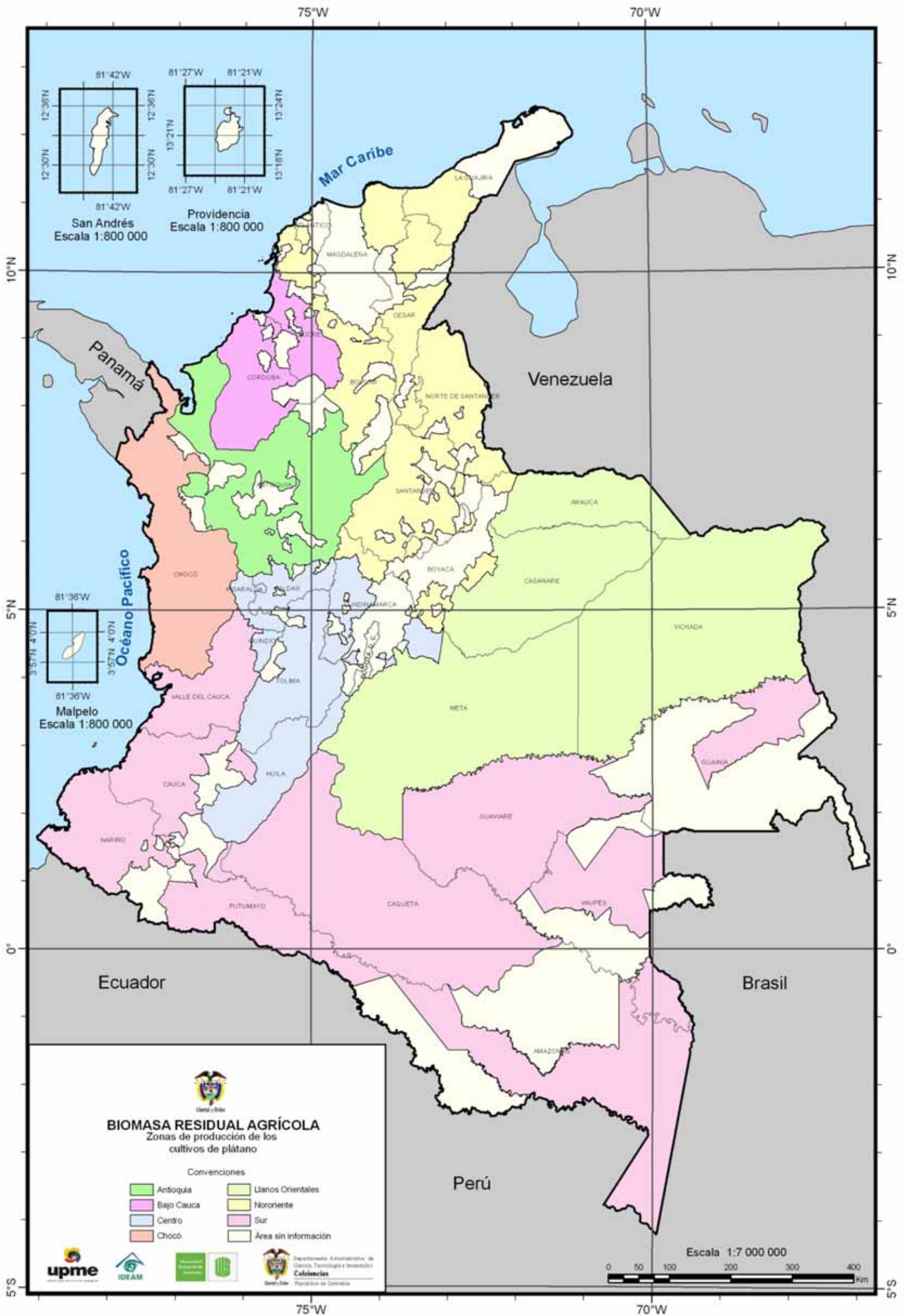


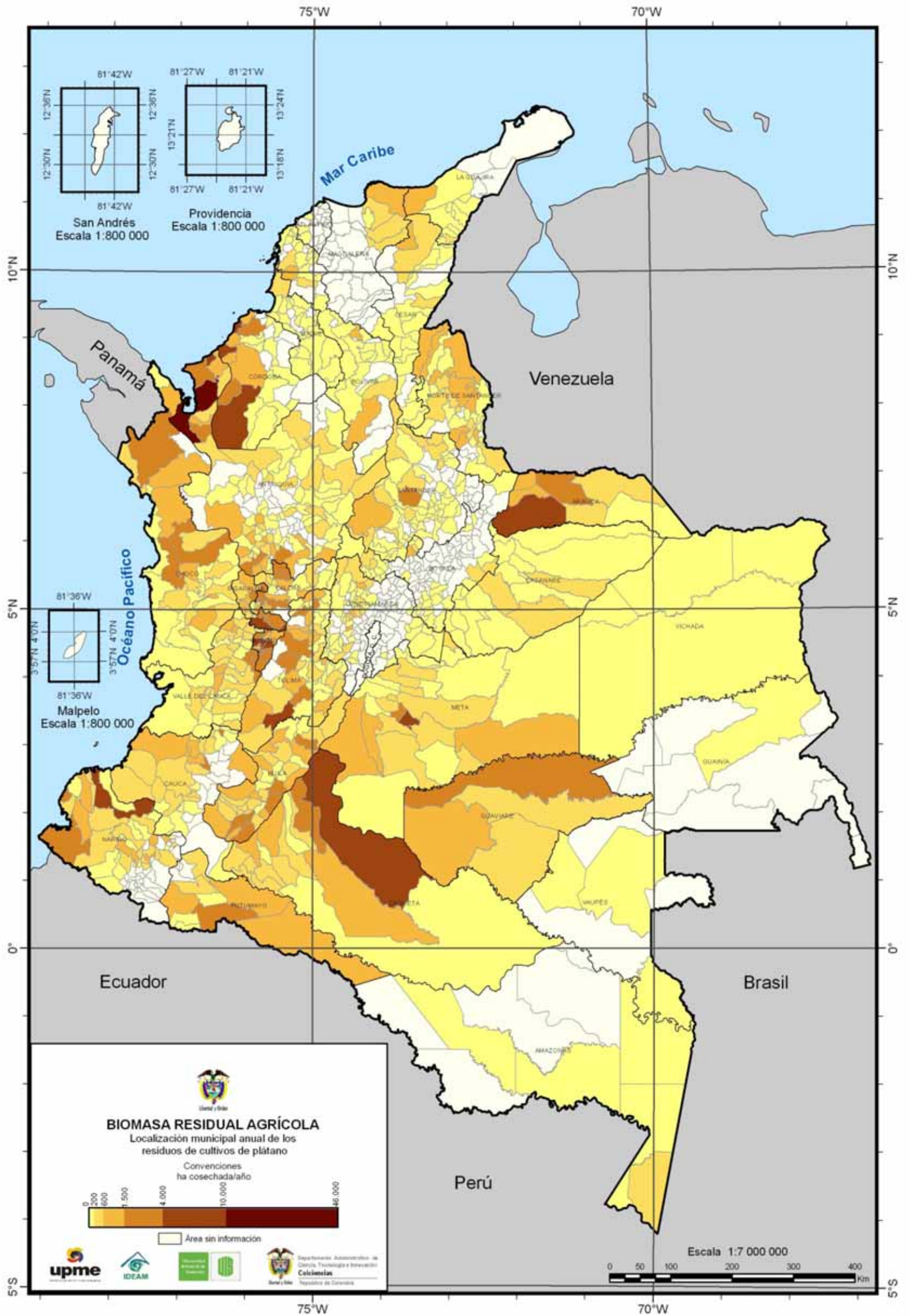
75°W

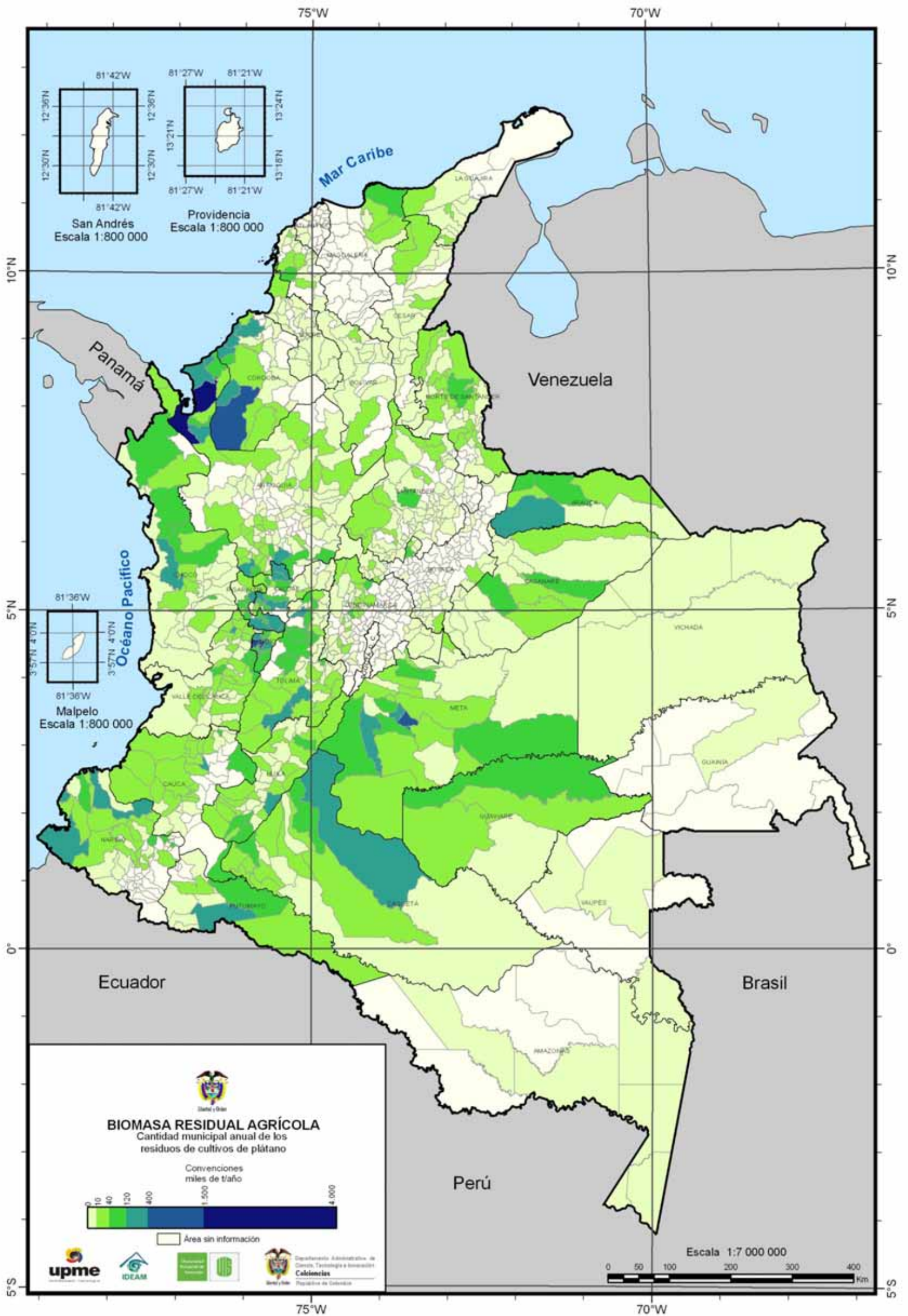
70°W

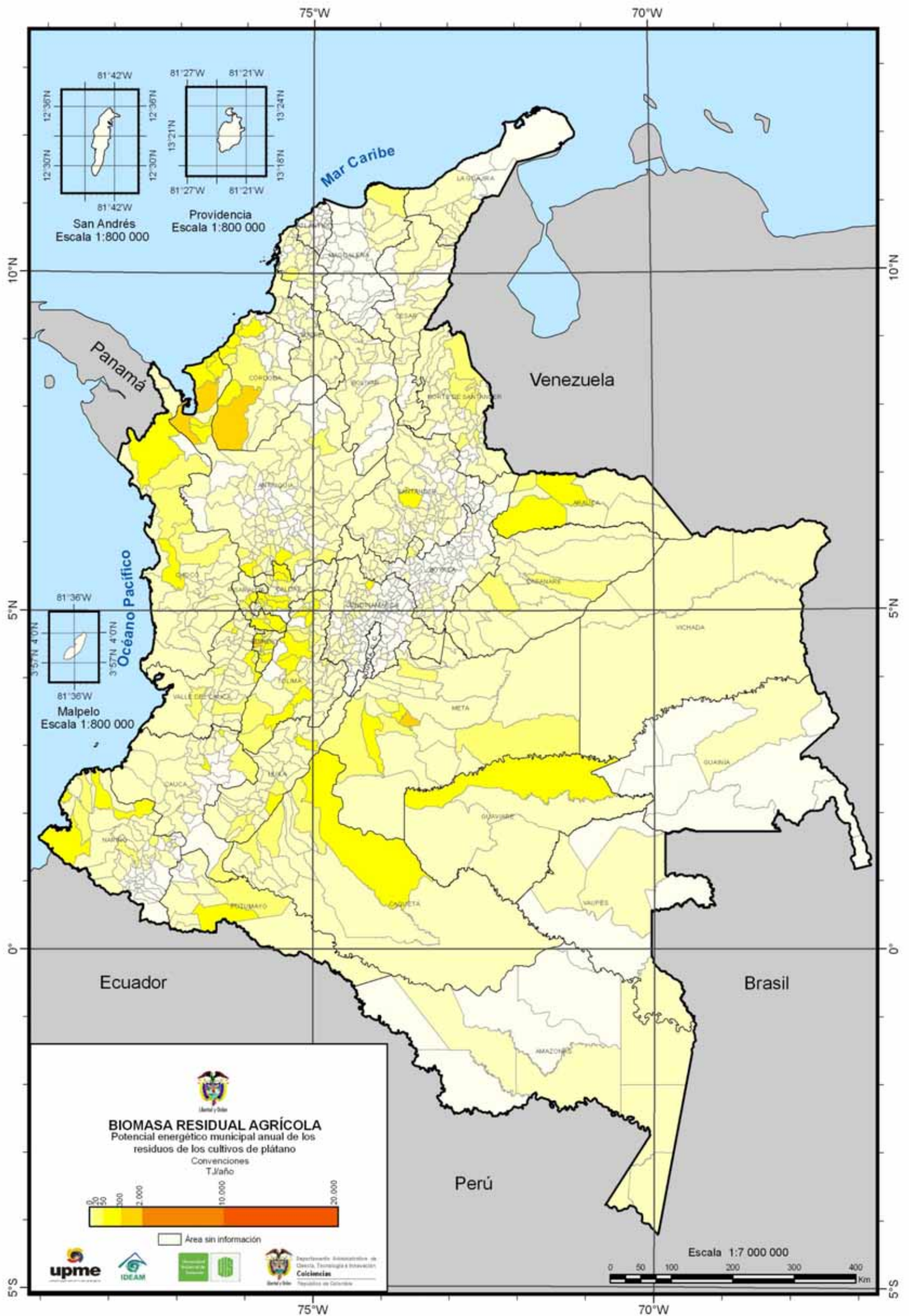


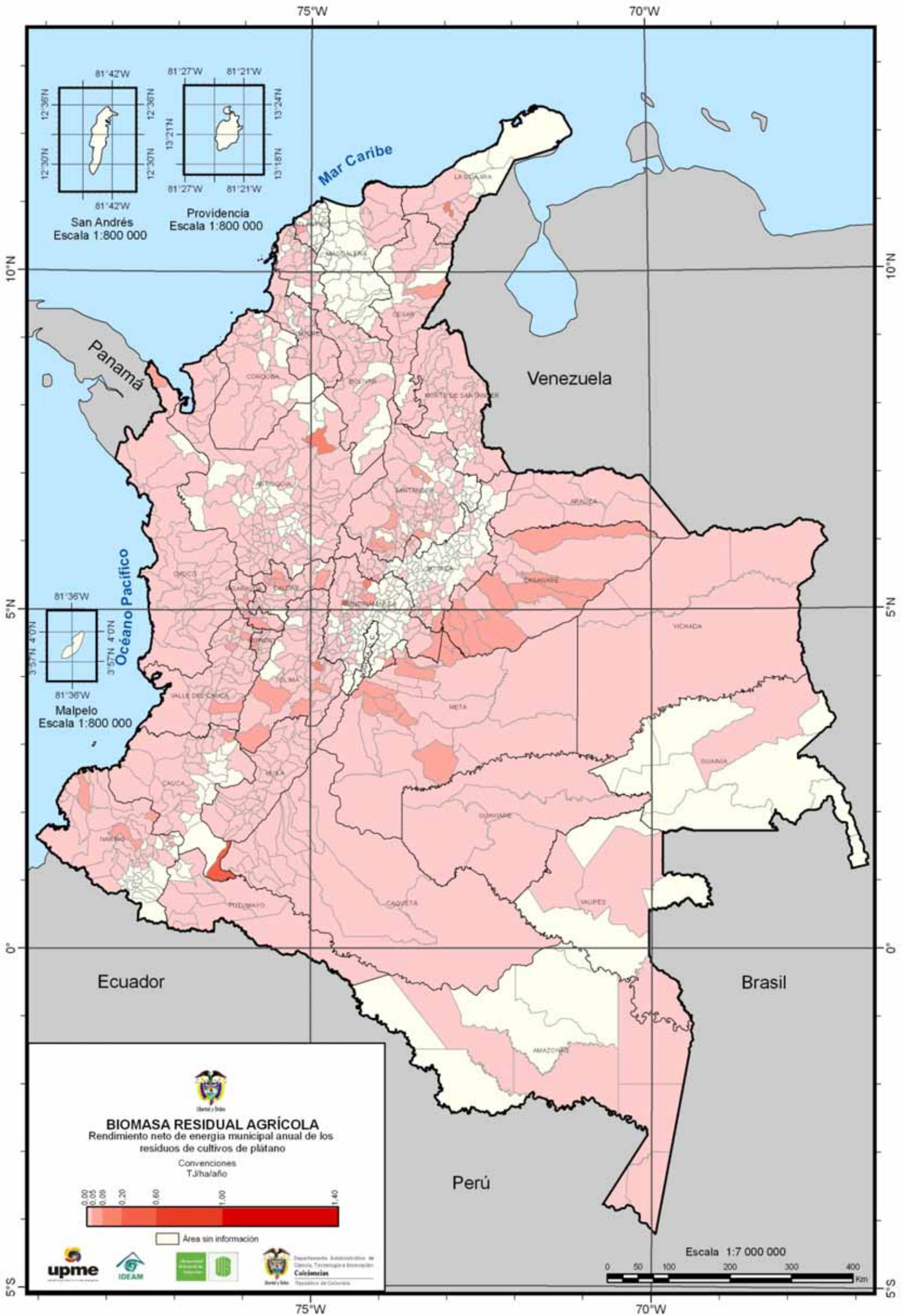














Anexo B

Anexo B



Muestreo y caracterización de la biomasa residual en Colombia

INTRODUCCIÓN

La composición fisicoquímica y el potencial energético de la biomasa residual son aspectos importantes a considerar cuando se está evaluando una posible tecnología para su aprovechamiento. Las características químicas y físicas de la biomasa determinan el tipo de combustible o subproducto energético que se puede generar. Por ejemplo, los desechos animales producen altas cantidades de metano, mientras que la madera puede producir el denominado gas pobre, mezcla rica en monóxido de carbono (CO). Adicionalmente para la selección de una tecnología de aprovechamiento energético de la biomasa, es importante conocer sus características físicas para definir el tipo de tratamiento previo que es necesario aplicar (*Biomass Users Network Centroamérica - BUN-CA, 2002*).

En este trabajo se realizó un muestreo de biomasa residual en el nivel nacional, que incluyó la recolección de 96 muestras en diferentes puntos del país. En la caracterización de la biomasa se evaluaron dos variables físicas, 17 químicas, seis microbiológicas y el contenido energético en todas las muestras.

Las principales propiedades que se evalúan en un residuo son la humedad, el carbono fijo, las cenizas, los metales alcalinos, la relación celulosa/lignina y el contenido energético. Para la conversión energética de la biomasa que presente un contenido de agua superior al 30%, las variables humedad y la relación celulosa/lignina son las más importantes a tener en cuenta para seleccionar el proceso de aprovechamiento.

Para garantizar el correcto procedimiento en la toma, preservación, transporte y análisis de las muestras se siguieron los protocolos establecidos por el laboratorio de Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales de la Universidad Industrial de Santander (ver Anexo C).

Los análisis físicos, químicos y microbiológicos se realizaron en el Ceiam, con el apoyo de Laboratorios Calderón de la ciudad de Bogotá. El análisis del contenido energético se realizó en el Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la UIS.

El estudio de la composición de la biomasa residual se llevó a cabo en las siguientes etapas:

- a. Definición de la población objeto de estudio.
- b. Selección de los puntos de muestreo.
- c. Recolección de muestras a nivel nacional.
- d. Caracterización físicoquímica, microbiológica y energética de las muestras.

1. POBLACIÓN BASE DE ESTUDIO

Como se observa en la siguientes tablas, en el estudio se identificaron 25 tipos de biomasa residual de las cuales 22 corresponden al sector agrícola (cascarilla, bagazo, pulpa, cisco, etc.), uno al sector pecuario (estiércol) y dos a los residuos sólidos orgánicos urbanos (residuos de poda y residuos de centros de abasto y plazas de mercado).

2. PUNTOS DE MUESTREO

En las Tablas 17, 18 y 19 se indica para los tres sectores las especies incluidas, los tipos de biomasa residual y los sitios donde se tomaron las muestras, los cuales

corresponden a 35 puntos localizados en diferentes regiones a nivel nacional.

La localización de los sitios de muestreo se realizó con base en el análisis de los aspectos que pueden influir en la composición de la biomasa residual. En los sectores agrícola y pecuario se tuvo en cuenta el sistema de producción, la ubicación geográfica y las condiciones climáticas. Con respecto a los residuos sólidos orgánicos urbanos se consideró la influencia de las costumbres alimenticias por regiones.

Teniendo en cuenta los diferentes tipos de biomasa residual y el número de sitios seleccionados se recolectaron las 96 muestras, para el análisis físicoquímico, energético y microbiológico.

Tabla 17. Población de estudio y sitios seleccionados para la toma de muestras de la biomasa residual del sector agrícola

Subsector	Tipo residuo		Localización			N° de muestras
	Agrícola de cosecha	Agroindustrial	Zona de producción	Departamento	Municipio	
Maíz	Rastrojo, capacho, tusa	-	Nororientes	Santander	Sabana de Torres y Floridablanca	6
Arroz	Tamo	Cascarilla	Sur	Tolima	Guamo	4
Caña azúcar	Hojas	Bagazo	Valle del Cauca	Valle del Cauca	Palmira	4
Palma de aceite	-	Raquis, fibra, cuesco	Central	Santander	Puerto Wilches	6
Plátano	Raquis y vástago	Plátano rechazo	Noroccidente	Antioquia	Turbo	6
Café	Tallos	Pulpa, cisco	Eje cafetero	Antioquia Caldas	Andes Chinchiná	6
Caña panelera	RAC, hoja seca	Bagazo	Hoya del Río Suárez	Santander	Barbosa	4
Banano	Raquis, Vástago	Banano rechazo	Noroccidente	Antioquia	Apartado	6

3. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA

La caracterización de la biomasa residual agrícola, pecuaria y de los residuos sólidos orgánicos urbanos contempló la determinación de los parámetros que describen la composición de la materia orgánica (Castells *et al.*, 2005); correspondiente a un análisis fisicoquímico y de contenido energético.

Como variables físicas se evaluaron la densidad aparente, la densidad real, la humedad y los sólidos totales. En cuanto a las variables químicas están incluidas en el análisis último, el análisis próximo y el análisis estructural.

El contenido energético se evaluó mediante el Poder Calorífico Inferior (PCI). Por otra parte,

a las muestras del sector pecuario, teniendo en cuenta el tipo de residuo y los potenciales riesgos en su manipulación, se les realizó un análisis microbiológico, que incluyó la valoración de coliformes fecales y totales, mesófilos aeróbios, mohos y levaduras.

Los ensayos se realizaron por duplicado. Los resultados se presentan en porcentaje peso a peso en base seca, a excepción del poder calórico inferior que se expresa en unidades de energía. Los resultados de la caracterización se presentan, en Tablas adjuntas a los mapas para cada tipo de biomasa, en los capítulos 1 (Tablas 2 a la 9), 2 (Tablas 10 a la 12) y 3 (Tablas 13 y 14).

Tabla 18. Población de estudio y sitios seleccionados para la toma de muestra de la biomasa residual del sector pecuario

Subsector		Localización			N° de muestras
		Zona de producción	Departamento	Municipio	
Bovino	Leche	Andina	Antioquia	San Pedro	12
		Andina	Cundinamarca	Mosquera	
	Carne	Caribe	Córdoba	Tierra Alta	
		Suroriental	Meta	Puerto López	
	Doble propósito	Andina	Caldas	Pensilvania	
		Caribe	Cesar	Aguachica	
Porcino	Tecnificado	Central	Valle	Palmira	10
		Antioquia	Antioquia	Santa Rosa de Osos	
		Oriental	Santander	Piedecuesta	
	No tecnificado	Antioquia	Antioquia	Santa Rosa de Osos	
		Oriental	Santander	Piedecuesta	
Avícola	Ponedoras	Santanderes	Santander	Bucaramanga	8
		Central	Cundinamarca	Guaduas	
	Engorde	Santanderes	Santander	Bucaramanga	
		Antioquia y Eje cafetero	Cundinamarca	Cajicá	

3.1 ANÁLISIS FISICOQUÍMICO

La caracterización fisicoquímica de un material involucra realizar a la muestra un análisis último y un próximo. Estos análisis se expresan en base seca, razón por la cual se requiere previamente evaluar el contenido de humedad.

Con el análisis elemental se determina el contenido de compuestos simples que se gasifican y que aportan energía en las reacciones de combustión. Este análisis incluye cuantificar en la muestra el porcentaje en peso de carbono (C), hidrógeno (H), azufre (S) y nitrógeno (N) (Castells; *et. al.*, 2005).

El análisis próximo abarca determinar en la muestra el contenido de cenizas, material volátil y carbono fijo. Sin embargo cuando se desea valorar una aplicación industrial de un residuo, como fuente energética,

es recomendable incluir en el análisis la cuntificación del contenido de proteínas, las grasas y aceites, la densidad aparente y un análisis estructural; que incluye determinar celulosa, lignina y hemicelulosa.

- Densidad aparente. Se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico en que se presenta en condiciones dadas. Los combustibles con alta densidad aparente favorecen la relación de energía por unidad de volumen, requieren equipos de menor tamaño y permiten aumentar los períodos entre cargas. Por otro lado, los materiales con baja densidad aparente necesitan mayor volumen de almacenamiento y transporte y presentan problemas para fluir por gravedad, lo cual complica el proceso de combustión y eleva los costos del proceso. (*Biomass Users Network Centroamérica - BUN-CA*, 2002).

Tabla 19. Sitios seleccionados para la toma de muestras de la biomasa residual del sector de los residuos sólidos orgánicos urbanos y de podas

Subsector	Localización			N° de muestras
	Zona de producción	Departamento	Municipio	
Plazas - Centros de acopio	Norte	Atlántico	Barranquilla	12
	Oriental	Santander	Bucaramanga	
	Occidental	Antioquia	Medellín	
	Central	Cundinamarca	Bogotá	
	Centro Oriental	Meta	Villavicencio	
	Sur	Valle del Cauca	Cali	
Podas de zonas verdes	Norte	Atlántico	Barranquilla	12
	Oriental	Santander	Bucaramanga	
	Occidental	Antioquia	Medellín	
	Central	Cundinamarca	Bogotá	
	Centro Oriental	Meta	Villavicencio	
	Sur	Valle del Cauca	Cali	

- Humedad (Hu). Es la cantidad de agua presente dentro de una muestra de materia. Es usual expresar la humedad como una relación de masa de agua por masa de materia seca.

El proceso de conversión energética de la biomasa se ve afectado por su contenido de humedad. La biomasa con una humedad inferior al 50% pueden ser aprovechadas térmicamente mediante el proceso de

combustión directa, pirólisis o gasificación. Para la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30%.

Cuando los residuos salen del proceso productivo con un contenido de humedad muy elevado es necesario, antes de ingresar al proceso de conversión de energía, implementar operaciones de secado las cuales incrementan los costos de su aprovechamiento energético (McKendry, 2002). Por lo anterior, es recomendable que una materia orgánica con porcentajes de humedad superior al 50% sea aprovechada energéticamente mediante un proceso bioquímico como la fermentación o la digestión anaerobia.

- Azúfre. Este elemento da lugar a las escorias perjudiciales y forma óxidos muy contaminantes. En la combustión de la biomasa, el nitrógeno no aporta energía, y si la cantidad es importante y la temperatura del proceso es elevada, se forma NO_x de origen térmico. La cantidad de oxígeno presente en la biomasa ayuda a reducir las necesidades de aire en la combustión, pero reduce su poder calorífico. El carbono de la biomasa puede proceder tanto de la materia orgánica como de los carbonatos presentes. Las relaciones H/C y O/C, determinan las eficiencias de conversión energética de los biocombustibles. La biomasa, en comparación con los combustibles fósiles, tiene un mayor contenido de oxígeno. El incremento del poder calorífico implica que disminuye la relación O/C y aumenta la relación H/C (Ptasinski; *et. al.*, 2007).

- Relación Carbono/Nitrógeno (C/N). Expresa las unidades de carbono por unidades de nitrógeno que contiene un material. El carbono es una fuente de energía para los microorganismos y el nitrógeno es un elemento necesario para la síntesis proteínica. La relación C/N es un índice significativo de la digestibilidad de un determinado material orgánico. Un residuo orgánico con una relación adecuada de C/N es apto para la producción de biogás mediante un proceso de fermentación. La formación de metano y de ácido puede darse con valores mínimos

de C/N de 16. Sin embargo las bacterias responsables del proceso pueden tener un excelente desempeño cuando el residuo presenta una relación C/N entre 25 y 30 (Werner; 1989).

- Cenizas (Cz). Corresponden a la cantidad de materia sólida no combustible presente en un material. Es usual expresar la cantidad de ceniza por kilogramo de muestra. El poder calorífico de un material se reduce de acuerdo a su contenido de cenizas. Un alto contenido de cenizas en un residuo biológico es perjudicial para su aprovechamiento energético por vías térmicas ya que reduce su poder calorífico. Las cenizas tienden a depositarse en las tuberías de las calderas e intercambiadores, ocasionando dificultad en la transmisión del calor. Sin embargo, la eliminación de las cenizas presentes en un compuesto, implica el uso de tecnologías complejas y costosas (Castells *et al.*, 2005, Couping; *et al.*, 2004).

- Material Volátil (MV). Está constituido por combinaciones de carbono, hidrógeno y otros elementos. El material volátil se determina calentando la muestra en un crisol tapado durante siete minutos a 950 °C; a esta temperatura se lleva a cabo un proceso de descomposición de la materia orgánica por ruptura de enlaces químicos (pirólisis). La pérdida en peso que sufre la muestra, una vez descontada su humedad, indica la cantidad de compuestos gaseosos producidos en la descomposición de la sustancia carbonosa (Castells, *et al.*, 2005). El contenido de material volátil da una idea de la longitud de la llama, en el caso que esta biomasa se utilice en un proceso de incineración.

- Carbono Fijo (CF). Es la fracción de carbono residual que permanece luego de retirar de la muestra la humedad, las cenizas y el material volátil. Por consiguiente se puede calcular el porcentaje de carbono fijo = 100 – porcentaje de humedad – porcentaje de material volátil – porcentaje de ceniza. El carbono fijo es el compuesto que no destila cuando se calienta un combustible.

Desde el punto de vista energético, no todos los volátiles presentes en el material aportan energía. La cantidad de material volátil y carbono fijo presentes en la biomasa, permiten establecer la facilidad con la cual el residuo reacciona, se oxida y se gasifica. La ocurrencia de uno u otro tipo de reacción depende del tipo de proceso utilizado para el aprovechamiento energético de la biomasa.

- Proteínas (Pr). Son compuestos de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, de estructura química compleja e inestable. Constituyen un componente esencial del protoplasma celular y de la dieta de todo animal. La formación de proteína supone el enlace de un gran número de α -aminoácidos, los cuales son sintetizables por la mayoría de las plantas y bacterias; todas contienen un grupo amino adherido al carbón alfa del aminoácido.

- Grasas y Aceites (G y A). Las grasas y aceites de origen vegetal o animal son triglicéridos denominados ésteres de la glicerina; y están constituidos por ácidos grasos de cadena larga de hidrocarburos. A temperatura ambiente a un triglicérido en estado sólido se le conoce como grasa, y en estado líquido se dice que es un aceite.

- Celulosa. Polisacárido (carbohidrato no reductor), de peso molecular elevado, insoluble en agua e insípido. La celulosa está compuesta por unidades de D-glucosa unidas entre sí por enlaces β -1,4 glucosídicos, estructuralmente consta de una parte amorfa y otra cristalina (organizada), la cual le confiere protección a la célula y constituye un impedimento estérico al ataque de reactivos.

- Lignina. Es un polímero ramificado, amorfo y heterogéneo. En los vegetales ayuda a mantener unidos la celulosa y las hemicelulosas entre sí, proporcionando rigidez a la pared celular del material y evita la acción de los microorganismos.

- Hemicelulosa. Son carbohidratos que forman una estructura polimérica compleja, ramificada compuesta por la unión de

diferentes unidades de pentosas, hexosas y ácidos de estos azúcares. La función de la hemicelulosa es brindar rigidez a la estructura vegetal.

La proporción de celulosa y lignina en una biomasa vegetal es importante para seleccionar su proceso de aprovechamiento energético. La biodegradabilidad de la celulosa es mayor que la de lignina, por lo tanto la conversión promedio de las plantas que contienen carbón como celulosa es mayor que aquellas con altos contenidos de lignina. A manera de ejemplo, la bioproducción de etanol alcanza elevados rendimientos cuando se utiliza como sustrato una biomasa que posee un alto contenido de celulosa-hemicelulosa (McKendry P., 2002).

3.2 CONTENIDO ENERGÉTICO

Corresponde a la cantidad de energía disponible en el material. Los combustibles son compuestos que poseen carbono, el cual al reaccionar con el oxígeno, en procesos térmicos o en las celdas de combustible, libera energía en forma de calor.

Algunos combustibles tienen mayor facilidad o dificultad para arder cuando son sometidos al proceso químico de oxidación. Sin embargo, la calidad de un combustible está determinada por la cantidad de energía que contiene y que puede liberar en el proceso de conversión energética. Esta cantidad de calor, referida a la unidad de masa, se denomina poder o potencia calorífica. El contenido energético de un compuesto se enuncia en unidades de energía por unidad de masa. Por ejemplo el poder calorífico se expresa en Joule por kilogramo [J/kg] o calorías por gramo [cal/g].

Existen diferentes formas de expresar el contenido energético de los combustibles; Leach y Gowent (1998) proponen los siguientes:

- Energía primaria: Indica la cantidad de energía contenida en un material en su forma natural.
- Energía entregada: Es la cantidad de

energía liberada por un combustible para su consumo. La energía entregada puede corresponder a una fracción o la totalidad de la energía primaria del combustible. Por ejemplo, la energía liberada por la leña es el total de su energía primaria, mientras que para el carbón corresponde sólo a una fracción.

- Energía útil: Es la cantidad de energía empleada en los usos finales descontando las pérdidas. La energía útil representa la cantidad de trabajo o calor que realmente fue útil en una determinada actividad.
- Intensidad energética (consumo específico de combustible): Indica la cantidad de energía utilizada en un uso final específico por unidad de PIB. En terminos globales la intensidad energética es el valor medio de la energía necesaria para generar una unidad de riqueza.

En los combustibles el contenido energético depende del poder calórico: energía liberada en forma de calor durante la reacción de oxidación para formar dióxido de carbono y agua. Para cuantificar la energía contenida en una sustancia se emplean dos tipos de unidades:

- Unidades absolutas: Se utilizan para definir la cantidad total de energía presente en una materia sin hacer referencia a su masa, es usual expresarla como Mega Joule [MJ], Pico Joule [PJ] y Tonelada Equivalente de Petróleo [TEP].
- Unidades relativas: Indican la cantidad de energía producida o consumida en un periodo de tiempo o por unidad de masa. Estas unidades se emplean en la medición de energía primaria, energía disponible y energía útil y puede ser expresada en Mega Joule por kilogramo [MJ/kg] o Tera Joule por año [TJ/año].

El contenido energético de un compuesto orgánico es proporcional a las cadenas carbono-carbono en su estructura. El

contenido energético de la biomasa es menor que el de los combustibles fósiles, debido a que en su estructura predominan las cadenas carbono-oxígeno y carbono-hidrógeno. El uso de biomasa con elevado porcentaje de humedad reduce la eficiencia de la combustión debido a que gran parte del calor liberado se usa para evaporar el agua y no se aprovecha en la reducción química del material (Biomass Users Network Centroamérica - BUN-CA, 2002).

3.3 CARACTERIZACIÓN MICROBIOLÓGICA

Las excretas animales están plagadas de enterobacterias, hongos y levaduras. Las características fisiológicas y metabólicas de los microorganismos que habitan en las excretas pecuarias los convierten en organismos versátiles, adaptables y con mayores posibilidades de supervivencia.

La carga microbiana patógena en una biomasa pecuaria se determina mediante la cuantificación de los coliformes totales y fecales. Este grupo de enterobacterias se caracteriza por habitar el tracto gastrointestinal de los vertebrados. Los microorganismos patógenos presentes en el estiércol animal lo convierten en un agente causante de enfermedades como el cólera, hepatitis, polio, fiebre tifoidea, giardiasis, amebiasis, etc.

El estiércol es un subproducto rico en carbono y se convierte en una excelente fuente de nutrición para los hongos, por esta razón este grupo de microorganismos está ampliamente distribuido en la biomasa pecuaria.

La caracterización microbiológica de la biomasa pecuaria se realizó de acuerdo al protocolo establecido por el laboratorio del Ceiam (ver Anexo C), evaluando el contenido de coliformes fecales y totales de los mohos y de las levaduras. Este análisis es importante ya que conocer los microorganismos presentes en la biomasa pecuaria y el tipo de bioproceso diseñado, es un aspecto relevante cuando se evalúa una tecnología para el aprovechamiento energético de esta

clase de residuos. Por otra parte, conocer los microorganismos presentes en el estiércol es de vital importancia para la manipulación de las muestras en campo durante su procesamiento y análisis.

Utilizar la biomasa residual pecuaria como fuente potencial de energía, ayuda a disminuir el impacto ambiental negativo generado sobre las fuentes hídricas, el suelo y la calidad del aire.

4. CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA RESIDUAL DEL SECTOR AGRÍCOLA

Las características fisicoquímicas de la biomasa agrícola de Colombia se presentan en las Tablas 2 a la 9, ubicadas en el Capítulo 1. En la Tabla 20 se presenta un reporte comparativo de las características de la biomasa residual agrícola de Colombia y la de otros estudios en el nivel mundial.

Tabla 20. Comparativo de la caracterización de la biomasa residual del sector agrícola

Parámetro	Unidad	Localización		Asia	Colombia
		Nordin 1994	So Sander 1997	Cuiping, <i>et al.</i> 2004	Este estudio 2009
C	% Peso	44,00 - 58,80	47,00 - 52,00	38,52 - 50,15	32,28 - 58,73
H	% Peso	5,70 - 6,30	5,20 - 6,40	6,13 - 8,36	4,39 - 6,75
O	% Peso	320 - 46,20	NR	39,03 - 46,66	22,83 - 49,13
N	% Peso	0,12 - 0,31	0,10 - 1,50	0,11 - 2,06	0,29 - 1,58
S	% Peso	0,009 - 0,26	0,10 - 0,20	0,02 - 0,39	0,02 - 0,38
	% Peso	NR	NR	0,89 - 15,24	0,67 - 23,80
MV	% Peso	NR	NR	61,00 - 76,00	57,38 - 98,82
PCI	MJ/kg	NR	NR	16,00 - 20,00	8,00 - 20,00

NR: No Reportado

Dado que el interés energético de la biomasa residual ha sido tema de estudio para diversos investigadores, Nordin (1994) presenta la recopilación de la caracterización de algunas fuentes de biomasa, extraída de la literatura y de algunas bases de datos relacionadas con combustibles renovables. So Sander (1997) reportó la composición para algunas fuentes de biomasa como las pajas y maderas abundantes en Dinamarca y Cuiping (2004) caracterizó residuos de biomasa forestal y agrícola para China.

Los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica y del PCI de la biomasa agrícola en Colombia coinciden con los

rangos obtenidos para cada parámetro en los estudios usados para su comparación. En algunas variables se observan diferencias significativas, las cuales pueden asociarse a las variedades de las especies vegetales, las condiciones edafoclimáticas en las cuales se desarrolla el cultivo y el manejo agronómico dado al residuo.

Los combustibles fósiles como el carbón poseen un alto contenido energético, evidenciado en su PCI de 26.805,88 kJ/kg (Rojas A., Barraza J., 2008) El elevado poder energético del carbono se debe a la presencia de abundantes enlaces C-C. El análisis último de la biomasa agrícola de

Colombia indica que estos residuos poseen altos contenidos de oxígeno e hidrógeno y bajos contenidos de carbono. El número de enlaces C-O y C-H, en la estructura molecular de la biomasa, son los responsables del valor de su PCI. La biomasa agrícola tiene valores de PCI que oscilan entre 7.862,64 y 19.374,25 kJ/kg. Aún cuando la biomasa agrícola tiene un PCI promedio de 16.000,04 kJ/kg; este valor es bastante más bajo que el PCI del carbón, lo cual indica que la cantidad de energía que pueden entregar los residuos siempre será menor que la del carbón.

La biomasa residual agrícola de Colombia presenta niveles de humedad muy variados. Los residuos de capacho de maíz, cascarilla de arroz y las hojas secas de la caña panelera poseen valores de humedad cercanos al 7,55% y energéticamente se pueden aprovechar por vías térmicas o bioquímicas. Los residuos de plátano y banano, con humedades cercanas al 94 %, son aptos para procesos de conversión bioquímicos, por ejemplo la biodigestión o la fermentación. Los demás residuos podrían ser usados en procesos térmicos, como la combustión directa, gasificación o pirólisis.

Al evaluar la biomasa agrícola como fuente de energía renovable, debe tenerse en cuenta que aún cuando presenta valores promedios de PCI bajos, sus contenidos de ceniza (0,67% a 30,14% con un promedio de 8,64%) están por debajo del 12% que posee el carbón del Cerrejón (Rojas A., Barraza J., 2008). Por otra parte, la biomasa residual agrícola analizada posee niveles elevados de material volátil los cuales oscilan en un rango de 41,07% a 98,02%; dependiendo de la especie vegetal originaria del residuo. Según Cuiping (2004) un bajo porcentaje de cenizas y un alto contenido de material volátil, son las ventajas que tiene la biomasa sobre los combustibles fósiles como el carbón. Por lo anterior, y dado su contenido de humedad, cenizas y material volátil, un alto porcentaje de la biomasa residual agrícola de Colombia es ideal para ser aprovechada energéticamente mediante procesos como la pirólisis o la gasificación.

5. CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA RESIDUAL DEL SECTOR BOVINO

Los resultados de la caracterización fisicoquímica de la biomasa residual bovina se presentan en el Capítulo 2, tabla 11. La biomasa bovina posee humedades cuyos valores oscilan entre 71,09 y 88,96 % p/p, material volátil entre 36,82 y 72,41% p/p, materia orgánica entre 60,81 y 76,75% y relación C/N entre 13,69 y 32,44%. La biomasa residual bovina está influenciada por factores intrínsecos al animal como: a) la fisiología digestiva, b) la composición de la dieta, c) la etapa de crecimiento y d) el sistema de manejo. El contenido de sólidos volátiles orgánicos (grasas, carbohidratos y proteínas) representa el material disponible para el desarrollo y reproducción de bacterias anaeróbicas. El contenido de materia volátil junto con el de carbono fijo, son los parámetros influyentes en la transformación energética de la biomasa.

El contenido microbiológico de las excretas bovinas está acorde con los valores propios para este tipo de residuo, por lo cual cualquier actividad asociada con su aprovechamiento debe realizarse tomando las medidas de prevención y control necesarias para su manipulación. El PCI de la biomasa residual bovina oscila entre 6.860 y 17.800 KJ/Kg, mientras que el carbón del Cerrejón posee valores de 26.805,88 KJ/Kg. Sin embargo, este residuo puede tener un aprovechamiento energético mediante el uso de bioprocesos (digestión anaerobia) ya que sus características fisicoquímicas lo hacen idóneo para el crecimiento y desarrollo de consorcios microbianos capaces de degradar la materia orgánica y producir biogás.

6. CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA RESIDUAL DEL SECTOR PORCINO

Los resultados de la caracterización fisicoquímica de la biomasa residual porcina se presentan en el Capítulo 2, Tabla 12. El contenido de humedad de este residuo oscila entre 67,18% y 75,13% por consiguiente, de acuerdo a las recomendaciones de

Mc Kendry (2002), su aprovechamiento energético se puede realizar mediante la aplicación de procesos bioquímicos como la fermentación o la digestión anaerobia, para su aprovechamiento energético.

El análisis próximo indica que las excretas porcinas presentan un contenido de ceniza en el rango de 17,91 a 44,79 % p/p; con valores considerables de carbono fijo y material volátil. El material volátil es un indicador del contenido de componentes orgánicos que pueden ser convertidos a metano. Por consiguiente estos parámetros dan una medida de la facilidad con la cual este tipo de biomasa puede ser sometida al proceso de ignición y de gasificación.

Adicionalmente esta biomasa presenta otra ventaja y es que su contenido de azufre es bajo, ya que oscila en un rango entre 0,08 y 0,17 % p/p, y esta característica es importante en los procesos de conversión energética (García, 2000).

Una relación típica de C/N en una muestra de estiércol porcino para uso energético, debe estar por el orden de 11% p/p (UPME, 2003). Los resultados del presente estudio indican que la biomasa porcina de los sistemas tecnificados presenta valores óptimos de la relación C/N (5,02, 9,53 y 12,33 % p/p); mientras las dos muestras de los estiércoles de los sistemas no tecnificados presentaron valores menores (8,50 y 8,69 % p/p).

7. CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA RESIDUAL DEL SECTOR AVÍCOLA

Los resultados de la caracterización fisicoquímica de la biomasa residual avícola se presentan en el Capítulo 2, Tabla 10. Estas características varían de uno a otro departamento y entre animales de engorde o gallinas ponedoras, debido a las diferencias significativas en los materiales usados en las camas, la densidad de aves por metro cuadrado, la temperatura y humedad de las unidades de producción, el sistema de agua, alimentación

y los métodos de limpieza utilizados. La humedad de la biomasa residual de las aves ponedoras registra un rango entre valores de 56,40 y 75,31 %, mientras que para los pollos de engorde el rango oscila entre 18,43 y 29,42%. Para el aprovechamiento energético de una biomasa mediante la gasificación, es indispensable que el residuo posea valores de humedad entre 10 y 30% y si se pretende utilizar la combustión, la humedad debe ser menor al 40%. Esto explica por qué la biomasa avícola es un combustible atractivo para la aplicación de tecnologías termoquímicas.

La biomasa residual avícola para el sistema de aves ponedoras muestra un mayor contenido de cenizas y carbono fijo frente a los valores encontrados para la biomasa de los sistemas de aves de engorde; este hecho puede estar favorecido por la deposición de excretas ricas en minerales hasta el final del ciclo. En la biomasa residual de las aves ponedoras existe un menor contenido de nitrógeno (valor promedio de 2,3 % p/p) debido a la volatilización que se presenta durante el ciclo. Un comportamiento similar se observa en las variables materia orgánica y sólidos volátiles. Los residuos avícolas, en contraste con algunos tipos de carbón, tienen alto contenido en volátiles y cuando este parámetro es superior al 9% se facilita la aplicación de procesos termoquímicos para su aprovechamiento energético.

En general, las excretas de origen animal presentan menor relación C/N que otras fuentes de biomasa. La biomasa residual del sector avícola posee una relación de C/N entre 9,12 y 13,04 % p/p; valores que corresponden a los reportados en la literatura para este tipo de biomasa. Una relación C/N del orden de 16/1 se considera óptima para la producción de biogás. Por consiguiente la biomasa residual avícola se puede aprovechar energéticamente mediante un bioproceso (Carrillo L.; 2003).

La biomasa residual avícola posee un contenido promedio de azufre de 0,23 %p/p y de nitrógeno de 2,9 % p/p, mientras que el carbón tiene 0,79% p/p de azufre y 1,18%

p/p de nitrógeno (Rojas A. y Barraza J., 2008). Desde el punto de vista ambiental los óxidos de azufre (SO₂) y de nitrógeno (NO_x) contribuyen a la formación de la lluvia ácida. Por consiguiente las bajas concentraciones de azufre y nitrógeno en la biomasa del sector avícola, garantizan que al utilizarla como combustible para la gasificación, a temperatura de operación de 900°C, se reduce la formación NO_x.

8. CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS URBANOS DE PLAZAS DE MERCADO Y PODAS

Los resultados de la caracterización fisicoquímica de los residuos orgánicos urbanos se presentan en el Capítulo 3, Tablas 13 y 14. Las costumbres alimenticias de cada región del país influyen en las características fisicoquímicas de sus residuos orgánicos de plazas y centros de acopio. Este tipo de biomasa presenta elevados niveles de humedad (84,14 a 92,85 % p/p), con un promedio de 88,69% p/p. La humedad es significativa para evaluar la rapidez de descomposición del elemento orgánico constituyente del residuo, razón por la cual este tipo de residuo es energéticamente aprovechado mediante el proceso de digestión anaerobia.

Los residuos orgánicos de plaza presentan un bajo contenido de ceniza (varía entre 8,50 a 37,65 % p/p), lo cual indica que esta biomasa contiene inertes que influyen en su poder calorífico. La biomasa de residuos orgánicos presenta elevados contenidos de material volátil, (48,75 y 79,50 % p/p), lo cual es un indicador importante en la eficiencia de la producción de biogás, dado que éste contiene los componentes orgánicos que pueden ser convertidos en metano. Los contenidos de carbón fijo varían entre 8,20 a 22,83 % p/p, parámetro que resulta ser influyente dentro de la transformación energética contenida en la biomasa.

El análisis último de los residuos orgánicos urbanos presenta contenidos medios o

bajos de carbono orgánico total (promedio 33,40% p/p) y altos contenidos de oxígeno (valor promedio de 44,77 % p/p); razón por la cual el PCI de este tipo de residuo es inferior al de los combustibles de origen fósil.

Los residuos orgánicos de plazas de mercado y centros de acopio presentan contenidos de nitrógeno que oscila entre 1,39 y 2,05 % p/p y contenidos de azufre entre 0,0026 y 0,10 % p/p, estos valores son bajos en comparación con los de otras fuentes de biomasa; siendo una ventaja para su conversión energética mediante procesos biotecnológicos.

El análisis estructural de la biomasa de los residuos orgánicos urbanos indica que el contenido de grasas oscila entre 1,19 y 11,97 % p/p y el contenido promedio de proteínas es de 10,36 % p/p, estos resultados son bastante similares en casi todas las ciudades del país.

Los residuos orgánicos de plazas en Colombia poseen valores de sólidos volátiles entre 62,35 y 91,51%, está variable es un indicador importante en la eficiencia de la producción de Biogás, dado que en ellos están presentes los componentes orgánicos que son convertidos en metano.

Una relación adecuada entre el carbono y el nitrógeno (C/N) de 16 % p/p favorece la digestibilidad de los materiales orgánicos (Werner, U., *et. al.*, 1989). La relación C/N de los residuos orgánicos de plaza en las principales ciudades de Colombia se encuentra dentro del rango óptimo; adicionalmente estos residuos poseen un contenido de materia orgánica dentro del rango ideal (73,02 y 47,79 % p/p) para los procesos biológicos. Por esta razón, este tipo de biomasa puede ser aprovechada energéticamente mediante procesos de fermentación para la producción de biogás y su correspondiente transformación en hidrógeno, y la fermentación encaminada a la obtención de bioetanol.

BIBLIOGRAFÍA

Biomass Users Network Centroamérica - BUN-CA. (2002). Biomasa, Manuales Sobre Energía Renovables para América Central. San José C.R.; 1 ed. ISBN: 9968-904-02-3, pp. 3-17.

Carrillo L. Universidad Nacional de Salta. (2003). Microbiología Agrícola, capítulo 5: Rumen y Biogás, pp. 16, ISBN:987-9381-16-5. Argentina en: <http://www.unsa.edu.ar/matbib>

Castells X.E., Cadavid C., Campos P.E., Flotats R.X.; García M.J., Gaya F.J., Jurado G.L., Ruíz-Álvarez F., Cremades O. L., Velo G.E. (2005). Tratamiento y valorización energética de residuos, Ediciones Díaz de Santos, ISBN:84-7978-694-9, España, pp. 64.

Cuiping L., Chuangzhi W., Yanyongjie, Haitao H. (2004). Chemical Elemental Characteristics of Biomass Fuels in China. *Biomass & Energy* 27, pp. 119-130.

García, A. R. (2000). Calidad alimentaria de la mezcla estiércol de cerdo y esquilmos agrícolas deshidratada al sol, para bovinos de engorde (tesis maestría). Universidad de Colima – México. pp. 99.

Leach G, y Gowen M. (1989). Manual de referencia sobre el sector energético residencial. Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento, Banco Mundial Washington D.C.

Mckendry P. (2002). Energy Production from Biomass (Part 1): Overview of biomass. *Bioresource Technology* 83, pp. 37-46.

Nordin A. (1994). Chemical Elemental Characteristics of Biomass Fuels. *Biomass and Bioenergy* 6 : pp. 339 - 347.

Ptasinski K.J., Mark J.P., Anke P. (2007). Exergetic evaluation of biomass gasification. *Energy* 32, pp. 568 - 574.

Rojas A., Barraza J. (2008). Caracterización Morfológica del Carbonizado de Carbones Pulverizados: Determinación Experimental. *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. Número 43*, pp. 42 – 58.

So Sander (1997). Properties of Danish Biofuels and the Requirements for Power Production. *Biomass and Bioenergy* 12, pp 177 - 183.

Unidad de Planeación Minero Energética, Unión Temporal Icontec – AENE (2003). Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión. Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás. Documento No. ANC 603 – 19 – 01. Bogotá, pp. 47.

Werner, U., Stohr, U. y Hees, N. (1989). Biogás Plants in Animal Husbandry. – A Publication of the Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien the Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Germany : Vieweg & Sonh ed. pp.39-86.

Anexo E

Anexo E



Potencial energético departamental de la biomasa residual

INTRODUCCIÓN

Esta sección presenta la aproximación al potencial energético departamental de los sectores: a) agrícola (ocho cultivos), b) pecuario (tres especies) y c) residuos sólidos orgánicos urbanos de plazas de mercado y residuos de podas (doce ciudades). El potencial energético de la biomasa residual se evaluó utilizando los modelos matemáticos descritos en el apéndice D y con información disponible de los años 2005, 2006, 2007 y 2008.

- En el sector agrícola, la información se clasifica por especie (arroz, maíz, banano, caña de azúcar, café, caña panelera, palma de aceite y plátano) hace referencia al área cultivada, generación del producto principal, oferta de residuo y potencial energético.
- En el sector pecuario la información se presenta organizada para las actividades avícola, bovina y porcícola, sobre los datos de población, fracción de residuo y potencial energético.
- Por último, para el sector de residuos sólidos orgánicos urbanos se presenta la cantidad y su potencial energético para las ciudades que se reportan en las tablas.

Es necesario considerar que este estudio no ha tenido en cuenta la dispersión geográfica de la biomasa residual estimada en el terreno donde se produce, lo cual resulta fundamental al considerar la viabilidad económica de su aprovechamiento.

1. SECTOR AGRÍCOLA

En las Tablas 21 a la 28 se reporta la información departamental concerniente al área sembrada, la producción de producto principal, la masa de residuo generado y su potencial energético, para cada uno de los cultivos considerados en este estudio.

La información sobre área sembrada y producción se obtuvo del Anuario Estadístico del Ministerio de Agricultura, 2006; la cantidad de residuo y el potencial energético corresponden a cálculos realizados por los autores con la información de los gremios y los resultados de la caracterización de las muestras de biomasa residual.

Tabla 21. Potencial energético departamental para biomasa residual de arroz

Departamento	Área sembrada [ha]	Producción	Cantidad de residuo	Potencial energético
		[t producto/año]	[t/año]	[TJ/año]
Antioquia	21.635	54.875	139.931	620,00
Bolívar	33.374	125.250	319.388	1.415,13
Caquetá	1.268	1.539	3.924	17,39
Cauca	1.446	5.352	13.648	60,47
Cesar	24.780	144.896	369.485	1.637,10
Córdoba	32.404	104.258	265.858	1.177,96
Cundinamarca	1.666	10.146	25.872	114,63
Chocó	11.946	21.565	54.991	243,65
Huila	30.258	214.038	545.797	2.418,30
La Guajira	2.750	13.480	34.374	152,3
Magdalena	2.563	12.806	32.655	144,69
Meta	65.456	353.516	901.466	3.994,19
Nariño	799	470	1.200	5,31
Norte de Santander	20.642	120.134	306.342	1.357,33
Santander	470	3.108	7.925	35,12
Sucre	41.505	184.618	470.776	2.085,90
Tolima	99.880	763.109	1.945.928	8.621,97
Valle del Cauca	5.970	40.031	102.079	452,29
Arauca	3.646	14.190	36.185	160,33
Casanare	51.189	274.409	699.743	3.100,40
Putumayo	1.010	1.238	3.157	13,99
Amazonas	28	38	97	0,43
Guaviare	676	548	1.397	6,19
Vaupés	60	45	114	0,51
Vichada	22	30	77	0,34
TOTAL	455.444	2.463.689	6.282.407	27.835,94

Tabla 22. Potencial energético departamental para biomasa residual de banano

Departamento	Área sembrada [ha]	Producción	Cantidad de residuo	Potencial energético
		[t producto/año]	[t/año]	[TJ/año]
Antioquia	34.430	1.180.668	7.261.105	4.146,32
Boyacá	509	2.943	18.099	10,34
Caldas	1.616	11.029	67.828	38,73
Cauca	473	2.370	14.576	8,32
Cesar	78	780	4.797	2,74
Cundinamarca	5.511	39.012	239.923	137
Huila	1.840	10.469	64.384	36,77
La Guajira	340	5.200	31.980	18,26
Magdalena	12.322	453.204	2.787.204	1.591,58
Meta	11	22	135	0,08
Nariño	2.487	13.571	83.459	47,66
Norte de Santander	1.139	8.225	50.584	28,88
Quindío	919	18.059	111.063	63,42
Risaralda	1.975	28.117	172.920	98,74
Santander	2.169	15.869	97.595	55,73
Tolima	2.798	18.939	116.474	66,51
Valle del Cauca	6.202	65.015	399.844	228,32
Casanare	3	60	369	0,21
Putumayo	813	4.643	28.552	16,30
TOTAL	75.634	1.878.194	11.550.891	6.595,93

Tabla 23. Potencial energético departamental para biomasa residual de café

Departamento	Área sembrada [ha]	Producción	Cantidad de residuo	Potencial energético
		[t producto/año]	[t/año]	[TJ/año]
Antioquia	114.180	166.209	890.946	8.661,54
Bolívar	619	531	2.849	27,69
Boyacá	10.679	11.638	62.384	606,48
Caldas	78.493	98.907	530.181	5.154,28
Caquetá	4.044	3.299	17.685	171,93
Cauca	53.996	59.933	321.263	3.123,23
Cesar	23.542	14.709	78.846	766,52
Cundinamarca	25.675	28.342	151.923	1.476,96
Chocó	295	209	1.122	10,91
Huila	91.039	128.294	687.709	6.685,73
La Guajira	3.380	1.984	10.636	103,40
Magdalena	16.331	12.693	68.038	661,45
Meta	3.683	2.383	12.776	124,20
Nariño	25.926	31.140	166.924	1.622,79
Norte de Santander	28.385	15.906	85.260	828,88
Quindío	39.687	63.650	341.189	3.316,95
Risaralda	48.644	79.440	425.830	4.139,81
Santander	19.663	20.675	110.828	1.077,44
Tolima	100.052	137.585	737.511	7.169,89
Valle del Cauca	72.563	63.523	340.509	3.310,33
Casanare	1.930	1.230	6.593	64,10
Putumayo	40	46	244	2,38
TOTAL	762.846	942.327	5.051.248	49.106,89

Tabla 24. Potencial energético departamental para biomasa residual de caña de azúcar

Departamento	Área sembrada [ha]	Producción	Cantidad de residuo	Potencial energético
		[t producto/año]	[t/año]	[TJ/año]
Caldas	2.625	32.812	194.903	1.487,74
Cauca	34.486	390.142	2.317.443	17.689,55
Cesar	1.734	10.924	64.889	495,31
Norte de Santander	969	10.420	61.895	472,46
Risaralda	2.719	38.357	227.841	1.739,16
Valle del Cauca	168.033	2.132.596	12.667.620	96.694,67
TOTAL	210.566	2.615.251	15.534.591	118.578,88

Tabla 25. Potencial energético departamental para biomasa residual de caña de panela

Departamento	Área sembrada [ha]	Producción	Cantidad de residuo	Potencial energético
		[t producto/año]	[t/año]	[TJ/año]
Antioquia	40.378	181.647	1.140.744	9.719,16
Bolívar	1.150	7.625	47.885	407,98
Boyacá	14.219	161.627	1.015.018	8.647,97
Caldas	16.945	75.707	475.442	4.050,78
Caquetá	3.442	18.283	114.817	978,24
Cauca	17.426	94.263	591.969	5.043,58
Cesar	2.325	15.269	95.889	816,98
Córdoba	175	652	4.095	34,89
Cundinamarca	51.436	253.502	1.591.993	13.563,80
Chocó	1.793	29.605	185.919	1.584,04
Huila	14.518	140.708	883.646	7.528,68
La Guajira	85	680	4.270	36,38
Magdalena	320	1.600	10.048	85,61
Meta	1.031	7.132	44.789	381,6
Nariño	16.334	126.711	795.744	6.779,75
Norte de Santander	10.196	43.554	273.518	2.330,38
Quindío	262	2.354	14.783	125,95
Risaralda	3.953	24.571	154.306	1.314,69
Santander	19.792	180.871	1.135.870	9.677,63
Sucre	284	1.803	11.323	96,47
Tolima	14.577	101.516	637.523	5.431,71
Valle del Cauca	6.216	35.228	221.234	1.884,92
Arauca	1.301	4.450	27.946	238,1
Putumayo	1.742	4.830	30.334	258,44
Vichada	157	689	4.324	36,84
TOTAL	240.057	1.514.877	9.513.430	81.054,57

Tabla 26. Potencial energético departamental para biomasa residual de maíz

Departamento	Área sembrada [ha]	Producción	Cantidad de residuo	Potencial energético
		[t producto/año]	[t/año]	[TJ/año]
Antioquia	50.079	90.892	128.612	1.381,16
Atlántico	11.584	19.852	28.091	301,66
Bolívar	78.093	154.616	218.782	2.349,49
Boyacá	15.181	23.066	32.638	350,50
Caldas	3.017	8.822	12.483	134,05
Caquetá	7.410	6.807	9.632	103,44
Cauca	7.540	13.633	19.290	207,16
Cesar	52.455	103.235	146.078	1.568,72
Córdoba	70.741	206.657	292.420	3.140,29
Cundinamarca	27.635	62.321	88.184	947,01
Chocó	8.445	13.969	19.766	212,27
Huila	29.749	71.808	101.608	1.091,17
La Guajira	13.279	19.619	27.761	298,12
Magdalena	29.618	33.150	46.907	503,74
Meta	22.565	78.073	110.473	1.186,37
Nariño	18.140	28.260	39.988	429,43
Norte de Santander	9.468	12.748	18.038	193,71
Quindío	1.532	2.736	3.871	41,58
Risaralda	2.459	9.259	13.101	140,70
Santander	24.645	62.194	88.004	945,08
Sucre	19.348	39.017	55.209	592,89
Tolima	24.569	83.148	117.654	1.263,48
Valle del Cauca	31.568	157.931	223.472	2.399,86
Arauca	16.765	28.634	40.517	435,11
Casanare	3.224	5.456	7.720	82,91
Putumayo	16.994	20.439	28.921	310,58
Guaviare	179	204	289	3,10
Guainía	46	69	98	1,05
Guaviare	7.510	10.696	15.135	162,53
Vaupés	610	570	807	8,66
Vichada	335	656	929	9,97
TOTAL	604.783	1.368.536	1.936.479	20.795,80

Tabla 27. Potencial energético departamental para biomasa residual de palma de aceite

Departamento	Área sembrada [ha]	Producción	Cantidad de residuo	Potencial energético
		[t producto/año]	[t/año]	[TJ/año]
Antioquia	354	4.422	8.417	81,20
Bolívar	6.760	15.952	30.365	292,91
Caquetá	385	539	1.026	9,90
Cesar	33.830	110.449	210.240	2.028,04
Córdoba	154	262	499	4,81
Cundinamarca	3.189	13.713	26.102	251,79
Chocó	3.234	21.021	40.013	385,98
La Guajira	395	737	1.403	13,53
Magdalena	30.167	104.104	198.161	1.911,53
Meta	80.097	219.993	418.757	4.039,48
Nariño	32.000	153.600	292.378	2.820,38
Norte de Santander	5.123	12.819	24.400	235,37
Santander	49.006	185.257	352.636	3.401,65
Sucre	250	1.500	2.855	27,54
Casanare	15.652	27.750	52.822	509,54
TOTAL	260.596	872.116	1.660.074	16.013,65

Tabla 28. Potencial energético departamental para biomasa residual de plátano

Departamento	Área sembrada [ha]	Producción	Cantidad de residuo	Potencial energético
		[t producto/año]	[t/año]	[TJ/año]
Antioquia	64.683	587.703	3.614.374	2.063,92
Atlántico	142	1.735	10.670	6,09
Bolívar	5.457	32.562	200.256	114,35
Boyacá	4.775	34.472	212.003	121,06
Caldas	18.493	182.709	1.123.660	641,65
Caquetá	12.920	81.107	498.805	284,83
Cauca	14.153	130.249	801.032	457,41
Cesar	2.990	20.699	127.299	72,69
Córdoba	28.738	276.255	1.698.968	970,16
Cundinamarca	9.781	74.533	458.377	261,75
Chocó	17.151	102.257	628.882	359,11
Huila	25.832	116.586	717.004	409,43
La Guajira	1.861	13.884	85.384	48,76
Magdalena	2.227	15.039	92.487	52,81
Meta	16.302	244.749	1.505.206	859,52
Nariño	21.051	142.866	878.626	501,72
Norte de Santander	12.477	73.709	453.310	258,85
Quindío	34.988	330.862	2.034.801	1.161,94
Risaralda	20.536	194.640	1.197.036	683,55
Santander	8.545	58.695	360.975	206,13
Sucre	1.289	7.641	46.992	26,83
Tolima	30.235	274.826	1.690.181	965,15
Valle del Cauca	15.650	147.073	904.497	516,50
Arauca	9.399	73.653	452.966	258,66
Casanare	2.414	31.966	196.591	112,26
Putumayo	6.392	42.150	259.220	148,02
Amazonas	670	2.008	12.350	7,05
Guainía	110	825	5.074	2,90
Guaviare	3.352	21.243	130.644	74,60
Vaupés	262	1.572	9.668	5,52
Vichada	265	1.090	6.704	3,83
TOTAL	393.139	3.319.357	20.414.043	11.657,07

En la Tabla 29 se presenta el consolidado del potencial energético de la biomasa residual agrícola por especie. El factor de residuo se define como la fracción de biomasa generada por unidad de producto principal; esta información fue suministrada por los centros de investigación y federaciones relacionadas con el gremio (Cenipalma, Cenicaña, Cimpa,

Cenicafé, Augura, Fedearroz y Fenalce), y el potencial energético se determinó mediante los modelos matemáticos planteados en este estudio. En la Tabla 30 se reporta la información para el área sembrada, la cantidad de residuo y el potencial energético referente a cada departamento.

Tabla 29. Potencial energético de la biomasa residual del sector agrícola en Colombia

Cultivo	Producción ¹ [t/año]	Tipo de residuo	Origen del residuo	Factor de residuo ² [t _{residuo} /t _{producto principal}]	Masa de residuo	Potencial energético
					[t / año]	[TJ / año]
Palma de Aceite	872.117	Cuesco	RAI	0,22	189.074	2.627,44
		Fibra		0,63	546.381	6.778,89
		Raquis de Palma		1,06	924.618	6.607,31
Caña de Azúcar	2.615.251	Hojas - Cogollo	RAC	3,26	8.525.718	41.707,22
		Bagazo	RAI	2,68	7.008.873	76.871,65
Caña Panelera	1.514.878	Bagazo	RAC	2,53	5.680.790	62.305,56
		Hojas - Cogollo	RAI	3,75	3.832.640	18.749,01
Café	942.327	Pulpa	RAI	2,13	2.008.192	7.206,79
		Cisco		0,21	193.460	3.338,57
		Tallos	RAC	3,02	2.849.596	38.561,52
Maíz	1.368.996	Rastrojo	RAC	0,93	1.278.642	12.573,18
		Tusa		0,27	369.629	3.845,88
		Capacho		0,21	288.858	4.383,73
Arroz	2.463.689	Tamo	RAC	2,35	5.789.669	20.699,41
		Cascarilla	RAI	0,2	492.738	7.136,53
Banano	1.878.194	Raquis de banano	RAC	1	1.878.194	806,31
		Vástago de banano		5	9.390.968	5.294,27
		Banano de rechazo	RAI	0,15	281.729	495,34
Plátano	3.319.357	Raquis de plátano	RAC	1	3.319.357	1.425,00
		Vástago de plátano		5	16.596.783	9.356,64
		Plátano de rechazo	RAI	0,15	497.903	875,43
TOTAL	14.974.807				71.943.813	331.645,71

RAC: Residuo Agrícola de Cosecha RAI: Residuo Agrícola Industrial

¹: Ministerio de Agricultura (2006) Anuario Estadístico.

²: Datos obtenidos de los centros de investigación y federaciones relacionadas: Cenipalma, Cenicaña, Cimpa, Cenicafé, Augura, Fedearroz y Fenalce

Tabla 30. Potencial energético departamental de la biomasa residual del sector agrícola

Departamento	Área sembrada	Producción	Cantidad de residuo	Potencial energético
	[ha]	[t producto/año]	[t/año]	[TJ/año]
Antioquia	325.738	13.184.130	26.673,30	2.063,92
Atlántico	11.726	38.761	307,76	6,09
Bolívar	125.453	819.524	4.607,56	114,35
Boyacá	45.363	1.340.143	9.736,35	121,06
Caldas	121.189	2.404.498	11.507,22	641,65
Caquetá	29.469	645.889	1.565,73	284,83
Cauca	129.520	4.079.220	26.589,72	457,41
Cesar	141.734	1.097.522	7.388,11	72,69
Córdoba	132.212	2.261.839	5.328,11	970,16
Cundinamarca	124.894	2.582.374	16.752,95	261,75
Choco	42.864	930.695	2.795,97	359,11
Huila	193.236	3.000.148	18.170,08	409,43
La Guajira	22.090	195.808	670,76	48,76
Magdalena	93.548	3.235.501	4.951,41	52,81
Meta	189.145	2.993.602	10.585,44	859,52
Nariño	116.737	2.258.319	12.207,05	501,72
Norte de Santander	88.398	1.273.347	5.705,87	258,85
Quindío	77.388	2.505.708	4.709,84	1.161,94
Risaralda	80.286	2.191.034	8.116,64	683,55
Santander	124.290	2.153.833	15.398,77	206,13
Sucre	62.676	587.155	2.829,64	26,83
Tolima	272.111	5.245.271	23.518,70	965,15
Valle del Cauca	306.202	14.859.256	105.486,90	516,50
Arauca	31.111	557.614	1.092,20	258,66
Casanare	74.413	963.838	3.869,42	112,26
Putumayo	26.991	350.428	749,72	148,02
Amazonas	877	12.735	10,58	7,05
Guainía	156	5.171	3,95	2,90
Guaviare	11.538	147.177	243,33	74,60
Vaupés	932	10.589	14,69	5,52
Vichada	779	12.033	50,99	3,83
TOTAL	3.003.064	71.943.162	331.638,72	11.657,07

2. SECTOR PECUARIO

En las Tablas 31 a 34 se reporta la información departamental relacionada con la población, la masa de residuo generado y su potencial energético para cada una de las actividades pecuarias incluidas en el estudio.

Con respecto a la información sobre población avícola y bovina se utilizó los datos reportados en el Inventario de Granjas (Instituto Colombiano Agropecuario, 2008), y en el caso del subsector porcícola, se tomaron los reportes entregados por Asoporcicultor.

Tabla 31. Potencial energético departamental de la biomasa residual del sector avícola

Departamento	Población	Cantidad estiércol [t/año]	Potencial
	[cabezas/año]		energético [TJ/año]
Antioquia	8.533.850	261.210	1.877,40
Atlántico	4.137.270	119.535	649,78
Bolívar	1.352.800	36.678	15,57
Boyacá	2.282.662	66.239	521,2
Caldas	1.011.950	36.724	121,85
Cauca	2.029.100	63.000	587,28
Cesar	144.870	3.985	1.175,94
Córdoba	1.390.150	38.009	499,74
Cundinamarca	32.312.272	945.412	7.245,16
Huila	1.600.077	51.441	279,75
La Guajira	18.700	483	80,64
Magdalena	223.000	8.546	29,25
Nariño	1.493.025	38.365	23,17
Norte de Santander	2.467.880	83.413	437,97
Quindío	3.577.380	100.191	950,15
Risaralda	2.779.970	76.498	762,19
Santander	27.606.680	817.654	7.027,16
Sucre	246.700	7.256	2.465,84
Tolima	3.553.365	120.023	522,37
Valle del Cauca	18.058.422	570.494	3.661,65
Putumayo	46.550	1.189	248,85
TOTAL	114.866.673	3.446.348	29.183,1

Tabla 32. Potencial energético departamental de la biomasa residual del sector bovino

Departamento	Población	Cantidad estiércol [t/año]	Potencial
	[cabezas/año]		energético [TJ/año]
Antioquia	2.655.856	11.906.012	8835,93
Atlántico	254.169	1.118.254	1024,27
Bolívar	892.013	3.939.728	3608,60
Boyacá	766.628	3.180.966	2360,72
Caldas	390.345	1.710.981	1269,79
Caquetá	1.204.803	5.390.448	4974,86
Cauca	250.824	1.111.160	922,89
Cesar	1.593.664	7.054.798	6461,85
Córdoba	2.215.079	9.118.032	8351,67
Cundinamarca	1.109.119	4.824.628	3580,56
Chocó	127.280	569.674	473,15
Huila	478.965	2.130.289	1580,97
La Guajira	293.667	1.289.815	1181,41
Magdalena	1.419.319	6.271.265	5744,17
Meta	1.495.820	6.944.267	6408,89
Nariño	314.696	1.424.644	1183,26
Norte de Santander	391.935	1.757.031	1303,96
Quindío	88.934	389.074	288,75
Risaralda	110.004	472.020	350,31
Santander	1.509.193	6.723.159	4989,53
Sucre	890.813	3.489.049	3195,80
Tolima	694.013	3.086.989	2290,98
Valle del Cauca	538.201	2.331.423	1936,40
Arauca	683.000	3.152.804	2909,73
Casanare	1.620.700	7.697.000	7103,59
Putumayo	134.208	599.960	553,71
San Andrés	1.163	4.297	3,94
Amazonas	7.148	28.383	26,19
Guainía	4.010	19.506	18,00
Guaviare	169.000	744.330	686,94
Vaupés	880	3.938	3,63
Vichada	145.000	684.685	631,90
TOTAL	22.450.449	99.168.608	84.256,34

Tabla 33. Potencial energético departamental de la biomasa residual del sector porcino

Departamento	Población	Cantidad estiércol [t/año]	Potencial
	[cabezas/año]		energético [TJ/año]
Antioquia	1.072.601	715.695	1.281,93
Atlántico	44.232	25.515	29,74
Bolívar	36.021	19.185	22,36
Boyacá	124.200	93.277	167,08
Caldas	71.593	54.438	77,54
Caquetá	74.354	56.955	81,12
Cauca	80.423	65.987	93,98
Cesar	41.148	32.256	37,6
Córdoba	303.007	279.800	326,15
Cundinamarca	553.566	424.769	760,83
Huila	26.782	20.675	29,45
La Guajira	108.716	98.102	114,35
Magdalena	30.543	25.491	29,71
Meta	104.753	81.822	146,56
Nariño	155.989	110.438	157,3
Norte de Santander	46.225	36.527	42,58
Quindío	44.763	31.779	45,26
Risaralda	95.178	73.174	104,22
Santander	90.258	71.475	83,32
Sucre	87.030	73.438	85,6
Tolima	94.827	69.893	125,19
Valle del Cauca	372.010	251.332	357,97
Arauca	40.496	50.856	59,28
Casanare	40.027	30.792	35,89
Putumayo	10.738	9.439	13,44
TOTAL	3.749.480	2.803.111	4.308,46

Tabla 34. Potencial energético departamental de la biomasa residual del sector pecuario

Departamento	Población	Cantidad estiércol [t/año]	Potencial
	[cabezas/año] ¹		energético [TJ/año]
Antioquia	12.262.307	12.882.917	11995,27
Atlántico	4.435.671	1.263.304	1703,78
Bolívar	2.280.834	3.995.590	3646,52
Boyacá	3.173.490	3.340.483	3049,00
Caldas	1.473.888	1.802.143	1469,18
Caquetá	1.279.157	5.447.403	5055,98
Cauca	2.360.347	1.240.146	1604,16
Cesar	1.779.682	7.091.039	7675,38
Córdoba	3.908.236	9.435.841	9177,56
Cundinamarca	33.974.957	6.194.808	11587
Chocó	127.280	569.674	473,15
Huila	2.105.824	2.202.404	1890,17
La Guajira	421.083	1.388.401	1376,40
Magdalena	1.672.862	6.305.302	5803,13
Meta	1.600.573	7.026.089	6555,45
Nariño	1.963.710	1.573.447	1363,73
Norte de Santander	2.906.040	1.876.972	1784,51
Quindío	3.711.077	521.044	1284,16
Risaralda	2.985.152	621.693	1216,72
Santander	29.206.131	7.612.288	12100,01
Sucre	1.224.543	3.569.743	5747,66
Tolima	4.342.205	3.276.905	2938,54
Valle del Cauca	18.968.633	3.153.248	5956,03
Arauca	723.496	3.203.661	2969,01
Casanare	1.660.727	7.727.792	7139,48
Putumayo	191.496	610.588	816,00
San Andrés	1.163	4.297	3,94
Amazonas	7.148	28.383	26,19
Guainía	4.010	19.506	18,00
Guaviare	169.000	744.330	686,94
Vaupés	880	3.938	3,63
Vichada	145.000	684.685	631,90
TOTAL	141.066.602	105.418.066	117.747,9

¹: Instituto Colombiano Agropecuario – ICA (2008), Inventario Completo de Granjas.

En la Tabla 35 se presenta la información consolidada a nivel departamental sobre población, tasa de producción, masa de residuo y potencial energético.

Los datos sobre población para los sectores avícola y bovino se obtuvieron de la información oficial reportada por el Ministerio de Agricultura y la Asociación de Porcicultores.

La tasa de producción de residuo es un indicador del estiércol generado por especie, esto en función de la edad del animal y del tipo de actividad para el cual se cría.

En este estudio la masa de residuo se obtiene mediante el producto población de animales por la tasa de producción de estiércol. El potencial energético se calculó aplicando los modelos descritos en el Anexo C.

Tabla 35. Potencial energético de la biomasa residual del sector pecuario en Colombia

Sub-sector	Población [cabezas]	Tasa de producción de estiércol ¹ [kg/cabeza*año]	Masa de residuo [t/año]	Potencial energético [TJ/año]
Bovino²				
Terneros<12meses	4.298.541	1460	6.275.870	5.337,32
Entre 12 y 24 meses	5.404.505	3285	17.753.799	15.018,20
Entre 24 y 36 meses	5.898.287	5110	30.140.247	25.717,94
>36 meses	6.849.116	6570	44.998.692	38.182,87
TOTAL (grupos etarios)	22.450.449		99.168.607	84.256,33
Porcino³				
Lechón lactante	579.702	102,2	59.246	94,58
Precebos	1.304.417	445,3	580.857	917,83
Levante	1.471.683	799,35	1.176.390	1.799,15
Reproductor	36.029	2051,3	73.906	101,50
Hembra lactante	287.514	2693,70	774.476	1.200,95
Hembra gestante	70.135	1971,00	138.236	194,43
TOTAL	3.749.480		2.803.111	4.308,46
Avícola⁴				
Engorde	74.827.204	25,55	1.911.835	25.879,57
Ponedoras	40.039.469	38,33	1.534.512	3.303,53
TOTAL	114.866.673		3.446.347	29.183,10
Total Sector	141.066.602		105.418.066	117.747,70

¹: Para sectores bovino y avícola se tuvieron en cuenta las recomendaciones del asesor. Para el sector porcino se utilizó a Kozen E. A. (1983).

²: Instituto Colombiano Agropecuario – ICA, 2007

³: Asociación Colombiana de Porcicultores, 2007

⁴: Instituto Colombiano Agropecuario – ICA, 2008

3. SECTOR DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS URBANOS

Teniendo en cuenta que la información disponible para este sector corresponde a doce cabeceras municipales y que en algunos casos se incluyen los municipios asociados al área metropolitana (para un total de 18 municipios), en este sector no se reportó información departamental.

En las Tablas 36 y 37 se presenta la cantidad de biomasa residual reportada por las entidades competentes, así como la estimación de su potencial energético, para plazas de mercado y podas, respectivamente. La Tabla 38 presenta el consolidado del sector.

Tabla 36. Potencial energético municipal de la biomasa residual del sector de los residuos sólidos orgánicos urbanos de centros de acopio y plazas de mercado

Departamento	Población ¹	Entidad suministradora de información	Cantidad anual de residuo	Potencial energético [TJ/año] ²
Bogotá ³	7.952.375	Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos	36.912	35,96
Medellín ⁴	3.306.490	Empresas Varias	15.754	11,70
Cali ⁵	2.593.563	Emsirva	19.451	17,74
Barranquilla ⁶	1.737.327	Triple A	9.770	5,18
Bucaramanga ⁷	1.024.350	Empresa de Aseo de Bucaramanga	9.812	2,00
Cartagena ⁸	892.545		1.365	0,87
Cúcuta ⁹	587.676	Proactiva del Oriente S.A. E.S.P.	4.869	0,99
Ibagué ¹⁰	498.401	Interaseo del sur	8.531	8,30
Pereira ¹¹	443.554	Empresa de Aseo de Pereira E.S.P.	1.793	1,33
Villavicencio ¹²	384.131	Llanabastos	1.817	0,81
Manizales ¹³	379.972	Empresa Metropolitana de Aseo	3.676	2,73
Montería ¹⁴	378.970	Servigenerales S.A. E.S.P.	6.455	4,11
Total			120.210	91,72

¹: Departamento Administrativo Nacional de Estadística; Censo 2005.

²: Elaboración propia

³: Información procedente de la Central de Abastos y 25 plazas de mercado localizadas en Bogotá: Corabastos, Trinidad Galán, 7 de Agosto, Concordia, El Carmen, Perseverancia, San Benito, San Francisco, 12 de Octubre, La Macarena, Tunjuelitos, Las Cruces, Rumichaca, San Carlos, Ismael Perdomo, Paloquemao, Lucero, Samper Mendoza, 20 de Julio, Kennedy, Fontibón, Quirigua, Las Ferias, Restrepo, Santander.

⁴: Información procedente de la Central de Abastos y seis plazas de mercado localizadas en los municipios de Medellín, Itagüí, Bello y Copacabana (Central Mayorista, de la America, de las Flores, Central Minorista, Itagüí, Bello, Copacabana)

⁵: Información procedente de siete plazas de mercado localizadas en Cali: Cavasa, La Nave, Santa Helena, La Floresta, El Porvenir, Alfonso López, Alameda.

⁶: Información procedente de la Central de Abastos y cuatro plazas de mercado localizadas en Barranquilla: Granabastos, Mercados Públicos de Barranquilla, Mercados Públicos Fedecafé, Mercados Públicos el Playón, Mercados Antigua Sede E.P.M.

⁷: Información procedente de la Central de Abastos y seis plazas de mercado localizadas en Bucaramanga, Girón y Floridablanca: Centro de Abastos S.A, Guarín, Concordia, Central, Girón, Satélite, Floridablanca.

⁸: Información Plaza de Mercado Santa Rita

⁹: Información procedente de la Central de Abastos y tres plazas de mercado localizadas en Cúcuta: Cenabastos, Nueva Sexta, Claret, Kennedy.

¹⁰: Información total de las plazas de mercado y centros de abasto localizadas en Ibagué.

¹¹: Información procedente de Mercasa.

¹²: Información procedente de Cemerca.

¹³: Información procedente de Mercado Sector Galerías.

¹⁴: Información procedente de Mercado Centro y Mercado Sur, localizadas en Montería.

Tabla 37. Potencial energético municipal de la biomasa residual del sector de los residuos sólidos orgánicos urbanos de poda

Ciudad	Entidad suministradora de información	Cantidad anual de residuo [t/ año]	Potencial energético [TJ/año]
Bogotá	Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos	7892	53,95
Medellín ¹	Empresas Varias	7.156	25,89
Cali	Emsirva	2.232	14,76
Barranquilla	Triple A	1.988	26,10
Bucaramanga	Empresa de Aseo de Bucaramanga	5.037	23,52
Cartagena	Proactiva del Oriente S.A. E.S.P.	7.922	103,97
Cúcuta	Proactiva del Oriente S.A. E.S.P.	4.212	19,66
Ibagué	Interaseo del Sur	3.685	25,19
Manizales	Empresa Metropolitana de Aseo	3.832	13,86
Montería	Servigenerales S.A. E.S.P	855	11,23
Total		44.811	318,13

¹: EEVVM reportó de manera consolidada la información de los municipios de Itagüí, Bello y Medellín

Tabla 38. Potencial energético para la biomasa residual del sector de los residuos sólidos orgánicos urbanos para doce ciudades de Colombia

Actividad	Población [habitantes]	Cantidad anual de residuo [t/año]	Potencial energético [TJ/año]
Centros de abasto y plazas de mercado	20.179.354	120.210	91,72
Poda		44.811	318,13
Total		165.021	409,85

BIBLIOGRAFÍA

Asociación Colombiana de Porcicultores. Fondo Nacional de Porcicultura. Gestión Ambiental (2007). Consolidado PPC, archivo digital enviado por correo electrónico, 21 de febrero de 2008.

Instituto Colombiano Agropecuario, Grupo de Epidemiología Agropecuario. (2007). Censo Epidemiología Veterinaria, Censo Bovino, porcino, aves/Censo nacional Bovino, archivo digital enviado por correo electrónico, 05/12/2007.

Instituto Colombiano Agropecuario; Seccional Quindío. (2008). Inventario completo de Granjas, archivo digital enviado por correo electrónico, 19 de marzo de 2008.

Kozen, E.A.. (1983). *Manejo e utilizacao de dejetos de suinos; Concórdia, SC. EMBRAPA – CNPSA, Circular Técnica 6, p. 32.*

Ministerio de Agricultura. (2006). Anuario Estadístico del Sector Agropecuario, Bogotá, pp. 17-21, 29-37, 35-52, 75-77, 82-87, 101-110.