Módulo 2.7: Estimación de incertidumbres

Autores del módulo:

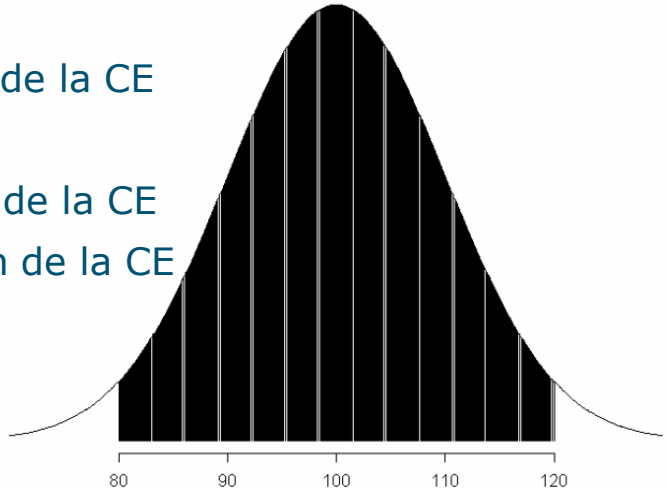
Giacomo Grassi, Centro Común de Investigación de la CE

Suvi Monni, Benviroc

Frédéric Achard, Centro Común de Investigación de la CE

Andreas Langner, Centro Común de Investigación de la CE

Martin Herold, Universidad de Wageningen



Fuente: OBP-UTCUTS, IPCC

Al finalizar el curso, los participantes deben ser capaces de lo siguiente:

- Identificar las fuentes de incertidumbre en las estimaciones del cambio del área (datos de actividad) y del cambio en las reservas de carbono (factor de emisión)
- Implementar los pasos correctos para calcular las incertidumbres para las estimaciones del cambio del área y el cambio en las reservas de carbono
- Comprender el posible tratamiento de las incertidumbres de manera conservadora

V2, 12.2016

Licencia de Creative Commons

Material de referencia

- Sistema de Observación Mundial de la Dinámica de la Cubierta Forestal y la Cubierta Terrestre (GOFC-GOLD) (2014), *Sourcebook* (Libro de consulta), sección 2.7.
- IPCC (2003), *Orientación sobre las buenas prácticas para uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura*, capítulo 5.2, "Identificación y cuantificación de las incertidumbres".
- IPCC (2006), *Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*, vol. 1, cap. 3, "Incertidumbres".
- Iniciativa Mundial de Observación de los Bosques (GFOI) (2014), *Integración de las observaciones por teledetección y terrestres para estimar las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero* (documentación de métodos y orientación), secciones 3.7 y 4.

Esquema de la conferencia

1. Importancia de identificar las incertidumbres
2. Conceptos generales
3. Incertidumbres en las estimaciones del cambio del área
4. Incertidumbres en las estimaciones del cambio en las reservas de carbono
5. Combinación de incertidumbres

Esquema de la conferencia

1. **Importancia de identificar las incertidumbres**
2. Conceptos generales
3. Incertidumbres en las estimaciones del cambio del área
4. Incertidumbres en las estimaciones del cambio en las reservas de carbono
5. Combinación de incertidumbres

Incertidumbre en el contexto del IPCC y la CMNUCC

- **La incertidumbre es la falta de conocimiento del verdadero valor de un parámetro** (p. ej., estimaciones de área y reservas de carbono en el contexto de REDD+).
- La evaluación de la incertidumbre es fundamental en los contextos del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC): el IPCC define los inventarios de gases de efecto invernadero (GEI) conforme a las buenas prácticas como aquellos que "hasta el momento no contienen sobrestimaciones ni subestimaciones en la medida que puedan juzgarse y en los que las incertidumbres se reducen tanto como sea factible".

La importancia de identificar las incertidumbres

- La identificación y cuantificación correctas de las diversas fuentes de incertidumbre ayudan a evaluar la solidez de cualquier inventario de GEI (incluidas las estimaciones de REDD+) y priorizar los esfuerzos para su posterior implementación.
- En el contexto de contabilidad, la información sobre la incertidumbre también puede usarse para formular estimaciones de REDD+ *conservadoras*, a fin de asegurar que no se sobrestimen las reducciones de las emisiones o los aumentos de las absorciones.

Objetivo de este módulo: Estimación de la incertidumbre

- A partir de la orientación del IPCC (2003), este módulo procura brindar algunos elementos básicos para la *identificación*, *cuantificación* y *combinación de incertidumbres* para las estimaciones de lo siguiente:

  - Área y cambios del área (los **datos de actividad, DA**)

  - Reservas de carbono y cambios en las reservas de carbono (los **factores de emisión, FE**)

Esquema de la conferencia

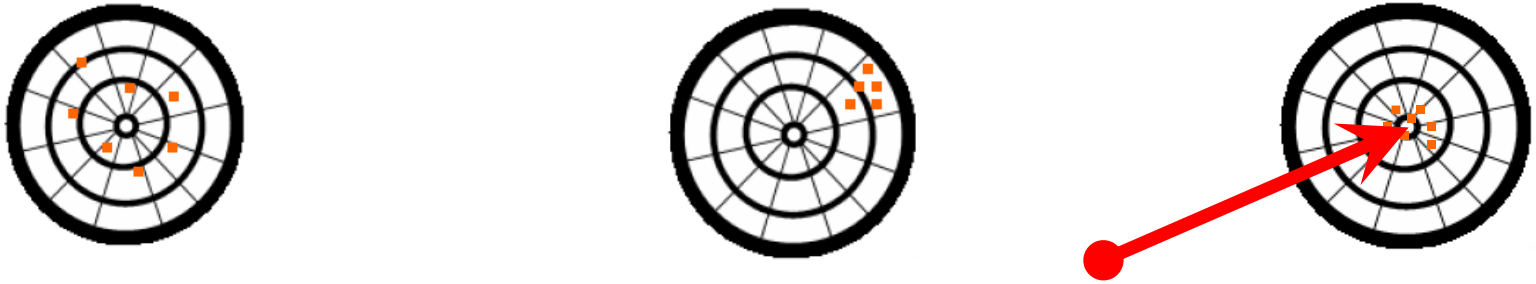
1. Importancia de identificar las incertidumbres
2. **Conceptos generales**
3. Incertidumbres en las estimaciones del cambio del área
4. Incertidumbres en las estimaciones del cambio en las reservas de carbono
5. Combinación de incertidumbres

Errores sistemáticos y errores aleatorios (1/2)

- La **incertidumbre** consta de dos componentes:
  - El *sesgo* o *error sistemático* (falta de *exactitud*) se produce, por ejemplo, debido a falencias en las mediciones o en los métodos de muestreo o debido al uso de un FE que no es adecuado.
  - El *error aleatorio* (falta de *precisión*) es una variación aleatoria por encima o por debajo de un valor medio. No puede evitarse totalmente pero puede reducirse, por ejemplo, aumentando el tamaño de la muestra.

Exactitud: coincidencia entre las estimaciones y los valores exactos o verdaderos
Precisión: coincidencia entre mediciones o estimaciones repetidas

(A) Exacto pero no preciso (B) Preciso pero no exacto (C) Exacto y preciso



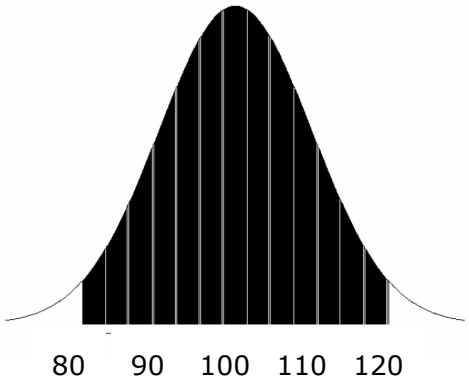
Errores sistemáticos y errores aleatorios (2/2)

- Los errores sistemáticos deben evitarse siempre que sea posible, o cuantificarse ex-post y eliminarse.
- Las incertidumbres que derivan de errores aleatorios tienden a cancelarse entre sí a niveles más altos de agregación. Por ejemplo, las estimaciones a niveles nacionales (p. ej., biomasa total, área forestal total) *generalmente** tienen un impacto más bajo a partir de los errores aleatorios que las estimaciones a nivel regional.

*Asumiendo que las áreas más grandes tienen tamaños de muestras más grandes que, a su vez, tienden a una mayor precisión y menor incertidumbre. Sin embargo, en el caso de un área más pequeña y un área más grande con el mismo tamaño de muestra, el área más pequeña probablemente tendría mayor precisión y menor incertidumbre, debido a que es probable que sea más homogénea. Por lo tanto, es importante el tamaño de la muestra, no el tamaño del área.

Intervalo de confianza del 95 %

- En general, la incertidumbre se expresa mediante un *intervalo de confianza del 95 %*:
  - Los intervalos de confianza del 95 % formados a partir de muestras obtenidas con el mismo diseño de muestreo incluirán el valor verdadero.
  - Si el área de las tierras forestales convertidas en tierras agrícolas (valor medio) es de 100 ha, con un intervalo de confianza del 95 % que oscila entre 80 ha y 120 ha, la incertidumbre de la estimación del área es del ±20 %.
  - El percentil 2,5.º es 80 y el percentil 97,5.º es 120.



Fuente: IPCC GPGL ULUCF

Correlación

- La *correlación* se refiere a la dependencia entre parámetros:
  - El "coeficiente de correlación de Pearson" asume valores entre [-1, +1].
  - El coeficiente de correlación de +1 implica una correlación positiva perfecta.
  - Si las variables son independientes entre sí, el coeficiente de correlación es 0.

Incertidumbre de la tendencia

- La *tendencia* describe el cambio de emisiones o absorciones entre dos puntos en el tiempo.
- La *incertidumbre de la tendencia* describe la incertidumbre en el cambio de las emisiones o absorciones. La incertidumbre de la tendencia es sensible a la correlación entre las estimaciones de los parámetros utilizados para estimar las emisiones o absorciones para dos puntos en el tiempo.
- La incertidumbre de la tendencia se expresa como puntos porcentuales. Por ejemplo, si la tendencia es +5 % y el intervalo de confianza del 95 % de la tendencia es +3 a +7 %, podemos decir que la incertidumbre de la tendencia es de ±2 % puntos.

Esquema de la conferencia

1. Importancia de identificar las incertidumbres
2. Conceptos generales
3. **Incertidumbres en las estimaciones del cambio del área**
4. Incertidumbres en las estimaciones del cambio en las reservas de carbono
5. Combinación de incertidumbres

Incertidumbres en los cambios del área

- En el contexto de REDD+, una estimación del área o cambio del área surge generalmente del análisis de un mapa basado en la detección remota.
- Dichos mapas están sujetos a errores de clasificación que inducen a sesgos en las estimaciones.
- Un enfoque adecuado es **evaluar la exactitud del mapa** y utilizar los resultados de la evaluación de exactitud para ajustar las estimaciones del área.
- La mayor parte de los métodos de clasificación de imágenes tienen parámetros que pueden ajustarse para reducir las incertidumbres. Un buen ajuste reduce el sesgo, pero tiene cierto grado de subjetividad.

Evaluación de exactitud de la cubierta terrestre y de los cambios (1/4)

Uso de los resultados de la evaluación de exactitud para la estimación del área

- El objetivo de la evaluación de exactitud consiste en clasificar la frecuencia de los errores (omisión y comisión) para cada clase de cubierta terrestre.
- Las diferencias en estos dos errores pueden utilizarse para ajustar las estimaciones del área y también para estimar las incertidumbres (intervalos de confianza) para las áreas de cada clase.
- El ajuste de las estimaciones del área a partir de una evaluación rigurosa de la exactitud representa una mejora con respecto a la simple presentación de informes de las áreas de las clases de mapas.

Evaluación de exactitud de la cubierta terrestre y de los cambios (2/4)

- Para los mapas de la **cubierta terrestre** puede evaluarse la exactitud de los datos de detección remota (fecha única) con métodos ampliamente aceptados.
- Estos métodos implican la evaluación de la exactitud de un mapa con *datos de referencia independientes* (de mayor calidad que el mapa) para obtener, por clase de cubierta terrestre o por región, la *exactitud general*, y:
    - *Errores de omisión* (con excepción de un área de una categoría a la que pertenece verdaderamente, es decir, subestimación del área)
    - *Errores de comisión* (incluida un área de una categoría a la que no pertenece verdaderamente, es decir, sobrestimación del área)

Evaluación de exactitud de la cubierta terrestre y de los cambios (3/4)

- Ejemplo de mediciones de exactitud para la clase de bosque:
  - Error de comisión: (13+45)/293 = 19,80 %
  - Error de omisión: (25+3)/263 = 10,65 %
  - Exactitud del usuario: 235/293 = 80,20 %
  - Exactitud del productor: 235/263 = 89,35 %
- Exactitud general = (235+187+215+92+75)/986 = 81,54 %

	Datos de referencia					
Datos de clasif.	**B**	**A**	**Ag**	**U**	**S**	**Total**
B	235	13	0	45	0	293
A	25	187	7	18	20	257
Ag	3	0	215	0	0	218
U	0	0	0	92	35	127
S	0	0	0	16	75	91
Total	263	200	222	171	130	986

Evaluación de exactitud de la cubierta terrestre y de los cambios (4/4)

Para los **cambios de la cubierta terrestre**, se aplican consideraciones adicionales:

- En general, es más difícil obtener datos de referencia multitemporales adecuados de mayor calidad para utilizar como base de la evaluación de exactitud, en especial para plazos históricos.
- Debido a que las clases cambiadas a menudo son proporciones pequeñas de paisajes, es más fácil evaluar errores de comisión (examinando áreas pequeñas identificadas como cambiadas) que errores de omisión (examinando un área grande identificada como no cambiada).
- Otros errores como la geoubicación de los conjuntos de datos multitemporales y las incongruencias en el procesamiento/análisis y en estándares cartográficos/temáticos son exagerados y más frecuentes en las evaluaciones de cambio.

Fuentes de incertidumbre

Diferentes componentes del sistema de seguimiento afectan la calidad de las estimaciones, a saber:

- Calidad y pertinencia de los datos satelitales (es decir, en términos de resolución espacial, espectral y temporal)
- Preprocesamiento radiométrico/geométrico (geoubicación correcta)
- Estándares cartográficos (es decir, definiciones de la categoría de la tierra y UMM)
- Procedimiento de interpretación (algoritmo o interpretación visual)
- Posprocesamiento de los productos del mapa (es decir, ausencia de datos, conversiones, integración con diferentes formatos de datos)
- Disponibilidad de los datos de referencia (p. ej., datos verificados sobre el terreno) para evaluación y calibración del sistema

Tratamiento de las fuentes de incertidumbre

Muchas de estas fuentes de incertidumbre pueden considerarse utilizando datos y enfoques ampliamente aceptados:

- Pertinencia de los datos satelitales: los datos de tipo Landsat, por ejemplo, han resultado útiles para los cambios de la cubierta terrestre a escala nacional para UMM de 1 ha.
- Calidad de los datos: algunos proveedores de datos ofrecen un preprocesamiento adecuado para la mayoría de las regiones (es decir, Landsat Geocover mundial).
- Mapeo congruente y transparente: se deben aplicar los mismos estándares cartográficos y temáticos y métodos de interpretación aceptados de forma transparente con intérpretes expertos.

La evaluación de exactitud debe proporcionar medidas de exactitud temática e intervalos de confianza para las estimaciones de datos de actividad.

Errores en las estimaciones del cambio del área: Ejemplo

Por qué los errores en las estimaciones del cambio del área son más frecuentes que los errores en las estimaciones del área

Mapa en momento 1 Mapa en momento 2 Superposición (cambio)

Error de omisión (área forestal informada como no forestal)
Error de comisión (área no forestal informada como forestal)
Falsa aforestación
Falsa deforestación

Confección de mapas de cambio del área

Dos enfoques generales para construir mapas de cambio del área:

- La **clasificación directa** implica la confección del mapa directamente a partir de un conjunto de datos de capacitación de cambio y dos o más conjuntos de datos obtenidos con la detección remota. De ser posible, esta es la opción preferida porque tiene un solo conjunto de errores.
- La **posclasificación** implica la confección del mapa comparando dos mapas de la cubierta terrestre por separado, cada uno construido con conjuntos únicos de datos de capacitación sobre la cubierta terrestre y datos detectados de forma remota. Con frecuencia, es la única alternativa posible debido a la incapacidad de observar los mismos lugares en varias ocasiones (necesario para obtener datos de capacitación de cambio), la cantidad insuficiente de observaciones de capacitación de cambio o el requisito de utilizar un mapa de referencia histórica.

Datos de referencia y datos de capacitación

- Los *datos de referencia* deben distinguirse de los *datos de capacitación.*
- Si las estimaciones de exactitud, cubierta terrestre o cambio deben ser representativas de áreas de interés completas, los datos de referencia deben obtenerse con un diseño de muestreo de probabilidad.
- La naturaleza de los datos de referencia depende del método utilizado para confeccionar el mapa:
    - Para los mapas confeccionados con la clasificación directa, los datos de referencia deben contener observaciones del cambio basado en dos fechas para los mismos lugares de muestra.
    - Para los mapas confeccionados con posclasificación, los datos de referencia pueden contener los mismos datos de referencia para los mapas confeccionados con la clasificación directa o para dos fechas, cada uno en lugares diferentes.

Elementos para una evaluación de exactitud sólida

Para que la evaluación de exactitud de los mapas y las estimaciones de la cubierta terrestre o del cambio en la cubierta terrestre sea sólida, las validaciones estadísticamente rigurosas deben incluir tres componentes:

- Diseño de muestreo
- Diseño de respuesta
- Diseño de análisis

Diseño de muestreo

- Protocolo para **seleccionar los lugares** en los que se obtienen los **datos de referencia**: Incluye la especificación del *tamaño de la muestra*, *lugares de la muestra* y *las unidades de evaluación de referencia* (es decir, píxeles o bloques de imágenes).
- Debe utilizarse el muestreo estratificado para clases poco frecuentes (p. ej., categorías de cambio).
- El muestreo sistemático con un punto de inicio aleatorio es generalmente más eficiente que el muestreo aleatorio simple y es también más rastreable.

Diseño de respuesta

- Protocolos utilizados para **determinar las clases de referencia o condición de la tierra** y la definición del acuerdo para comparar las clases de mapa con las clases de referencia.
- La información de referencia debe provenir de datos de mayor calidad que las etiquetas de los mapas; en general, las observaciones terrestres se consideran el estándar, aunque también se utilizan datos más de mayor resolución obtenidos con la detección remota.
- Se requiere congruencia y compatibilidad en las definiciones temáticas y la interpretación para comparar los datos de referencia y del mapa.

Diseño de análisis

- Incluye **estimadores** (fórmulas estadísticas) y **procedimientos de análisis para la estimación y presentación de informes de la exactitud.** Los estimadores deben ser congruentes con el diseño de muestreo.
- Las comparaciones de datos de mapas y de referencia producen un conjunto de estimaciones estadísticas que incluyen *matrices de error, exactitudes específicas de la clase* (de error de comisión y omisión), *estimaciones de área y cambio de área* e *intervalos de confianza y variaciones* asociados.

Consideraciones para la implementación y la presentación de informes

- Las técnicas descritas se basan en diseños de muestreo de probabilidad y la disponibilidad de datos de referencia adecuados.
  → Dicho enfoque puede no lograrse, en especial en el caso de los cambios históricos de la tierra.
- En las primeras etapas de preparación de un sistema nacional de vigilancia, los esfuerzos de verificación deben ayudar a fomentar la confianza.
  → Una mayor experiencia (es decir, mejorar el conocimiento de la fuente y la magnitud de los posibles errores) ayudará a reducir las incertidumbres.
- Si no es posible ninguna evaluación de exactitud, se recomienda llevar a cabo, como mínimo, una *evaluación de la congruencia* (es decir, la reinterpretación de pequeñas muestras de manera independiente) que pueden proporcionar información de la calidad de las estimaciones.

Generar confianza en las estimaciones

La información obtenida sin un diseño adecuado de la muestra de probabilidad aún puede ser útil para generar confianza en las estimaciones, por ejemplo:

- Valores de confianza distribuidos espacialmente proporcionados por la interpretación
- Exámenes cualitativos sistemáticos del mapa y comparaciones (cualitativas/cuantitativas) con otros mapas
- Revisión de expertos locales y regionales
- Comparaciones con datos no espaciales y estadísticos

Cualquier límite de incertidumbre debe tratarse de forma conservadora para evitar generar un beneficio para el país (sobrestimación de absorciones o de reducción de las emisiones)

Esquema de la conferencia

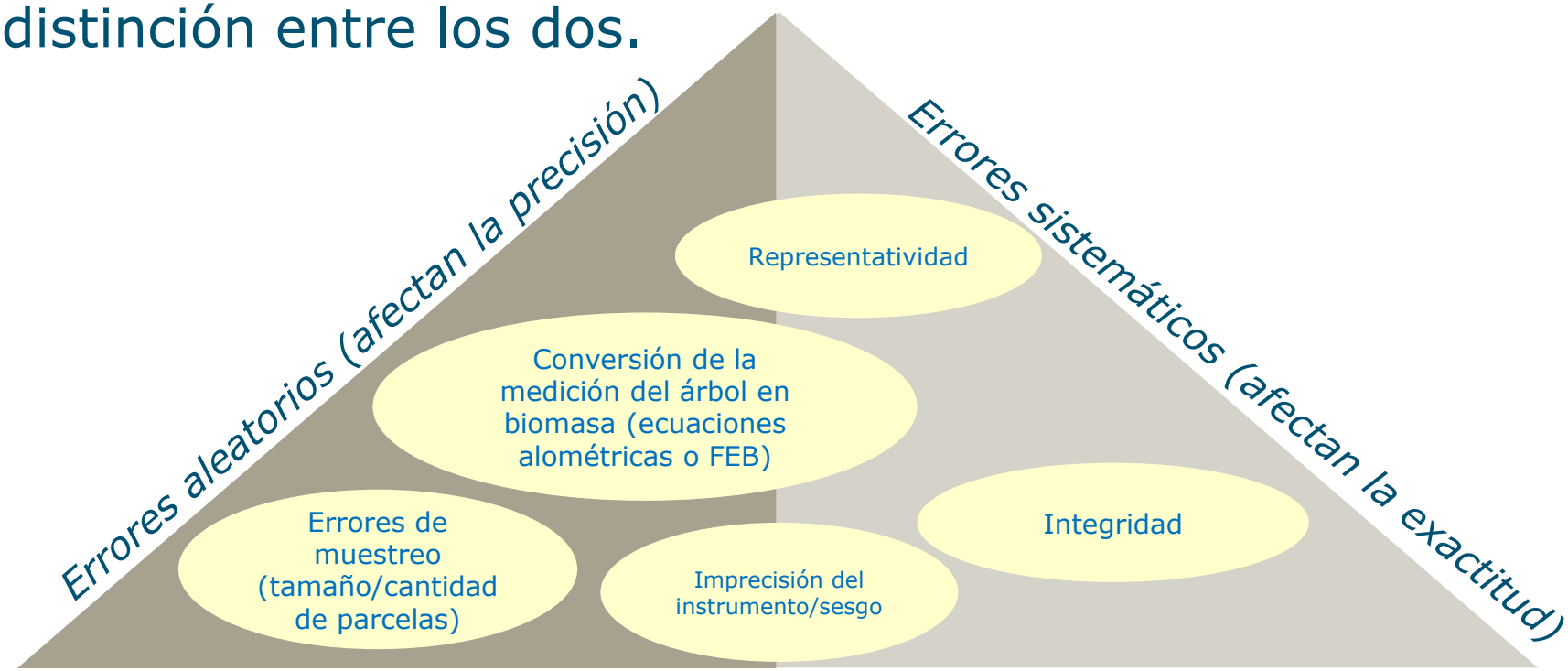
1. Importancia de identificar las incertidumbres
2. Conceptos generales
3. Incertidumbres en las estimaciones del cambio del área
4. **Incertidumbres en las estimaciones del cambio en las reservas de carbono**
5. Combinación de incertidumbres

Incertidumbres en los cambios en las reservas de carbono

- La evaluación de las incertidumbres de las estimaciones de las reservas de C y los cambios en las reservas de C suele ser más compleja (y a menudo subjetiva) que la estimación de las incertidumbres del área y de cambios en el área.
- De acuerdo con la bibliografía, la incertidumbre general de las estimaciones de las reservas de C suele ser más grande que las incertidumbres de las estimaciones del área. Sin embargo, cuando se observan los cambios (es decir, tendencias) en las reservas y áreas de C, la imagen *puede* cambiar, según la posible correlación de los errores (véanse las próximas diapositivas).

Errores aleatorios y errores sistemáticos

- La incertidumbre de las reservas de carbono puede ser causada tanto por *errores aleatorios* como por *errores sistemáticos*, pero a veces puede ser difícil hacer una distinción entre los dos.



Incertidumbres debidas a errores aleatorios

- *Imprecisión instrumental* (ruido, manipulación incorrecta, etc.)
- *Errores de muestreo* (es decir, tamaño y cantidad de parcelas), comunes con una alta variación natural de la biomasa en los bosques tropicales

La biomasa depende de la temperatura, la precipitación, el tipo de bosque y especie, la estratificación, la escala espacial, las perturbaciones naturales y humanas, el tipo de suelo y los nutrientes del suelo.

Conversión de la medición del árbol en biomasa

- Modelo alométrico o factores de expansión de la biomasa (FEB):
  - Selección del modelo alométrico que mejor se ajuste al tipo de bosque respectivo → ≈ 20 % de error de estimación de la biomasa aérea (BA) del árbol
- En general:
  - Incertidumbres a nivel de la parcela (a un IC del 95 %*): 5 % al 30 %
  - Rango promedio de la BA del IPCC: -60 % al +70 %

*IC = intervalo de confianza.

Tratamiento de incertidumbres debidas a errores aleatorios

- Si es factible: aumentar el tamaño de la muestra (puede ser problemático)
- Alta biodiversidad de árboles → Los modelos alométricos regionales/pantropicales son mejores que los modelos específicos del lugar (error ±5 %)

Árboles de bosque seco:

- $BA = \exp(-2{,}187 + 0{,}916 \times \ln(pD^2A)) \equiv 0{,}112 \times (pD^2A)^{0.916}$
- $BA = p \times \exp(-0{,}667 + 1{,}784\ln(D) + 0{,}207(\ln(D))^2 - 0{,}0281(\ln(D))^3)$

Al tener A (altura), las estimaciones son más exactas.

Árboles de bosque húmedo:

- $BA = \exp(-2{,}977 + \ln(pD^2A)) \equiv 0{,}0509 \times pD^2A$
- $BA = p \times \exp(-1{,}499 + 2{,}148\ln(D) + 0{,}207(\ln(D))^2 - 0{,}0281(\ln(D))^3)$

Ecuaciones de Chave y otros, 2005

Otros modelos alométricos regionales/pantropicales

- *(error ±5 %)*

Árboles de bosque húmedo de manglares:

- $BA = exp(-2{,}977 + ln(pD^2A)) \equiv 0{,}0509 \times pD^2A$

- $BA = p \times exp(-1{,}349 + 1{,}980ln(D) + 0{,}207(ln(D))^2 - 0{,}0281(ln(D))^3)$

Árboles de bosque húmedo:

- $BA = exp(-2{,}557 + 0{,}940 \times ln(pD^2A)) \equiv 0{,}0776 \times (pD^2A)^{0{,}940}$

- $BA = p \times exp(-1{,}239 + 1{,}980ln(D) + 0{,}207(ln(D))^2 - 0{,}0281(ln(D))^3)$

BA = biomasa aérea en kg; D = diámetro en cm; p = madera secada al horno sobre volumen verde en g/cm^-3; A = altura del árbol en m; ≡ = identidad matemática

Incertidumbres debidas a errores sistemáticos

- *Integridad de los depósitos de carbono:* biomasa aérea, biomasa subterránea, carbono orgánico del suelo, madera muerta, hojarasca:
  - La bibliografía sugiere que para la deforestación, ≈15 % de emisiones puede provenir de materia orgánica muerta y ≈ 25 %-30 % puede provenir de los suelos (o más, si son suelos orgánicos).
  - Sin embargo, estos depósitos a menudo no se incluyen cuando se calculan los factores de emisión, debido a la falta de datos.

Tratamiento de las incertidumbres debidas a la integridad de la reserva de carbono

- Deben incluirse todas las reservas y actividades "*significativas*":
  - En primer lugar, las "*categorías clave*" (CC) (es decir, las categorías/actividades que contribuyen sustancialmente al inventario nacional de GEI) deben identificarse de acuerdo con la orientación del IPCC (IPCC, 2006, vol. 4, cap. 1.1.3).
  - En una CC, una reserva es "significativa" si representa >25 %-30 % de las emisiones de la categoría.
- Los depósitos pueden omitirse de acuerdo con el *principio conservador*.
- Por otra parte, las emisiones/absorciones de CC y los depósitos significativos deben estimarse con los métodos del nivel 2 o 3*, que se supone son menos inciertos que los del nivel 1.

*Las circunstancias nacionales (p. ej., falta de recursos documentada) pueden justificar el uso del nivel 1 para CC.

Representatividad de las parcelas de muestreo

- *Alta variación de contenido de biomasa en los bosques tropicales → Una muestra no representativa puede introducir un sesgo considerable.*

Tratamiento de incertidumbres debidas a la representatividad

- Se necesita un muestreo estadístico coherente en las áreas clave.
- La distribución de muestras en las principales gradientes de suelo/topográficas del paisaje, p. ej., 20 parcelas (de 0,25 ha cada una) o una muestra de 5 ha puede posibilitar la estimación de la BA a escala del paisaje con ±10 % (IC del 95 %).
- Si se conoce la posición geográfica, pueden utilizarse mapas de la biomasa mundial (1 km Saatchi/500 m Baccini) para estimar la BA.
- Si se desconoce la posición geográfica, pueden utilizarse mapas de la biomasa mundial para obtener mejores valores de datos del nivel 1.

Propagación del error de la estimación de la BA

Para Panamá central:

(Chave y otros, 2004)

Table 3. Summary of the sources of error in the AGB estimation of a tropical forest.
(Type 1 error refers to the error made in the estimation of the AGB held in a single tree; this error averages out in plots. Type 2 error is that caused by the choice of the allometric model. Types 3 and 4 are two types of sampling error, which can be minimized by large-sized, multi-plot, censuses. The reported values are examples for the forests of the Panama Canal watershed.)

error type		s.e.m. (percentage of the mean)	type of data
1. tree level error	trees > 10 cm diameter	48	BCI plot—pan-tropical allometric model
	trees < 10 cm diameter	78	
2. allometric model	before ρ correction	22	BCI plot—eight allometric models
	after ρ correction (gravedad)	13	
	after large tree correction	11	BCI plot—pan-tropical allometric model
3. within-plot uncertainty	0.1 ha plot	16	
	0.25 ha plot	10	
	1 ha plot	5	
4. among-plot uncertainty		11	Marena plots—pan-tropical allometric model
total	50 1 ha plots, after ρ and large tree corrections	24	—

Ejemplos de incertidumbres de los mapas mundiales recientes de la BA (1/3)

Mapa de Saatchi a un IC del 95 %:

- *Incertidumbre general de la BA a nivel del píxel (promediada)*

  ±30 % (±6 % a ±53 %)

- *Incertidumbres regionales:*

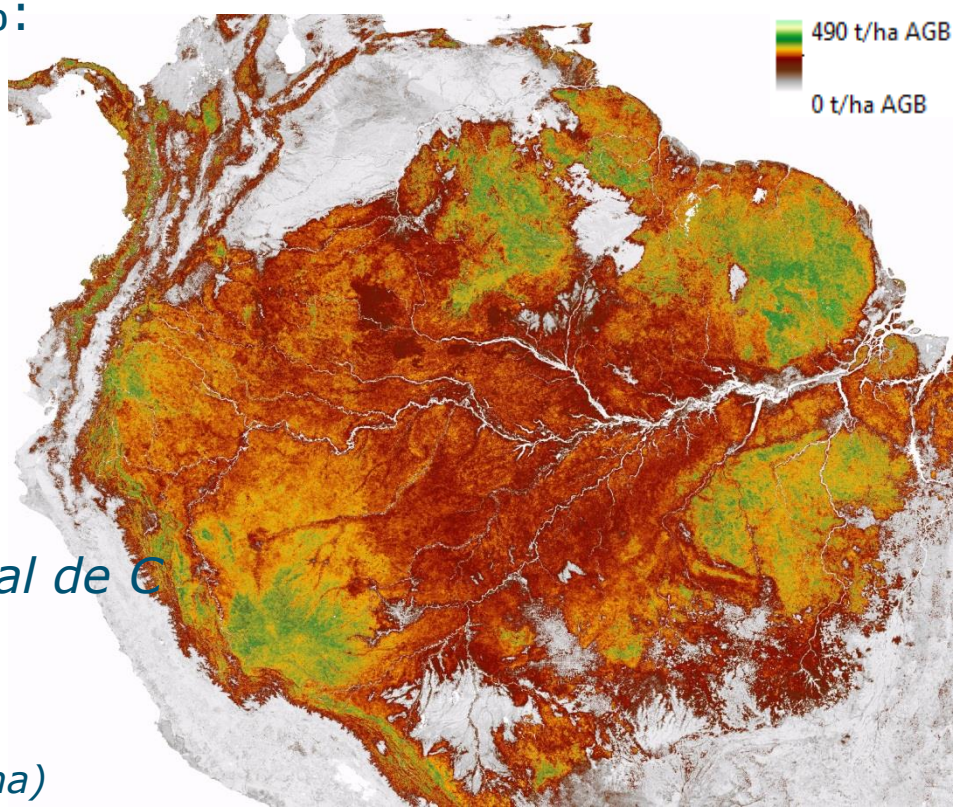
  América: ±27 %; África: ±32 %

  Asia: ±33 %

- *Incertidumbre de la reserva total de C a nivel del píxel (promediada)*

  ±38 %;

  ±5 % (10 000 ha); ±1 % (>1 000 000 ha)



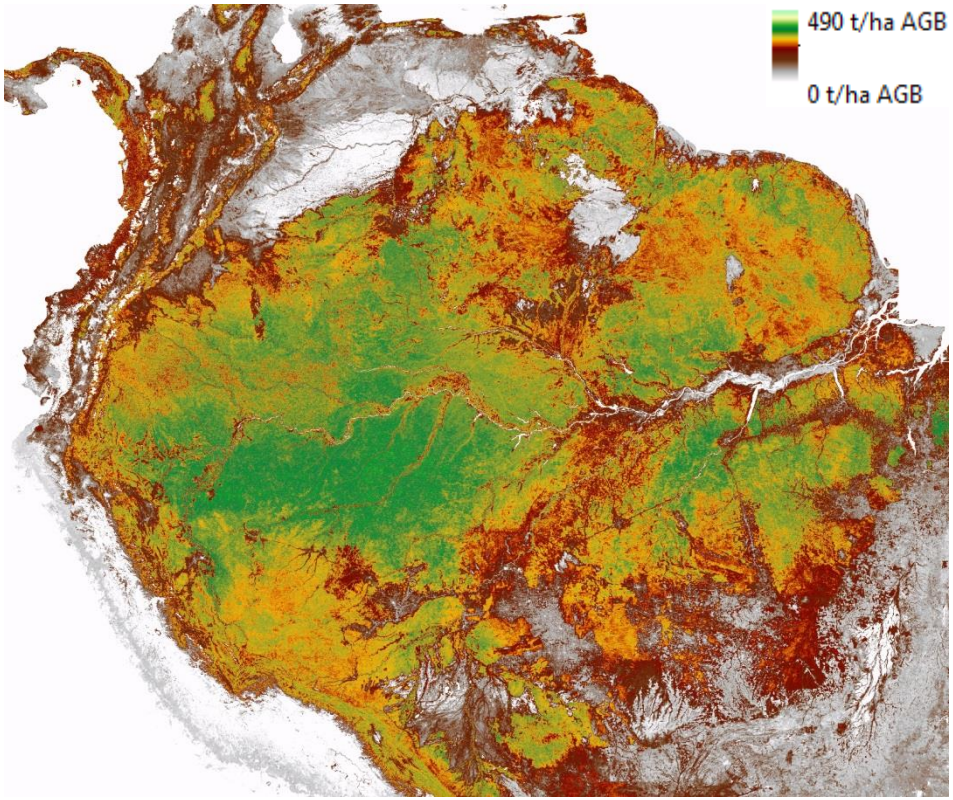
Ejemplos de incertidumbres de los mapas mundiales recientes de la BA (2/3)

Mapa de Baccini a un IC del 95 %:

- *Incertidumbres regionales para reservas de carbono:*

América: ±7,1 %; África: ±13,2 %

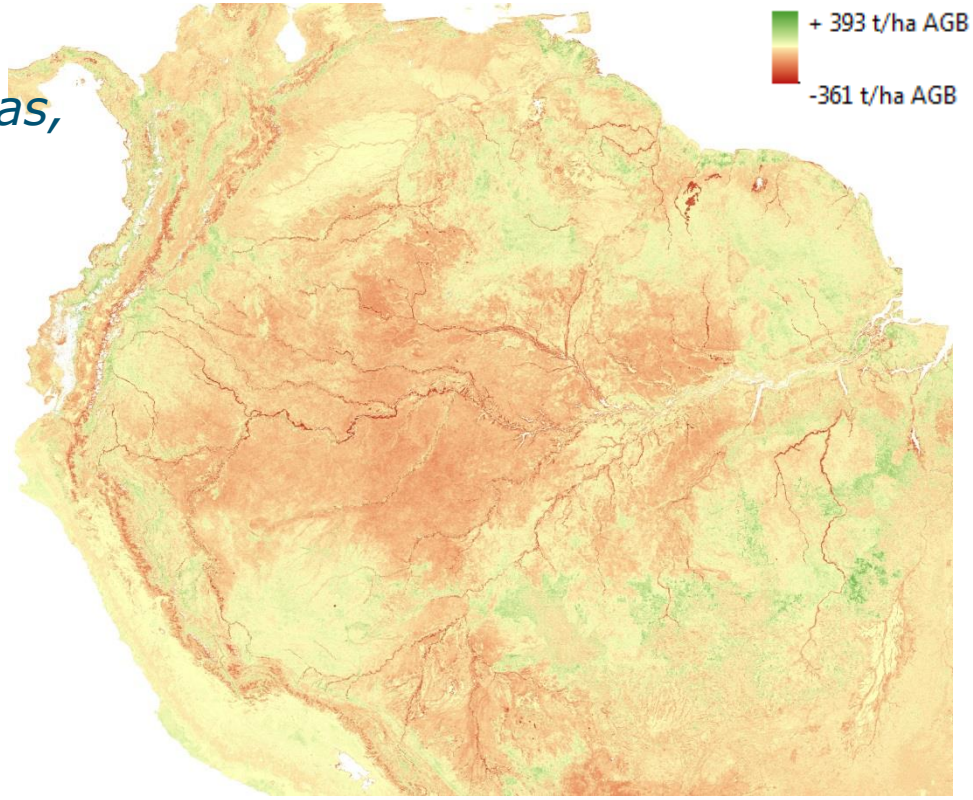
Asia: ±6,5 %



Ejemplos de incertidumbres de los mapas mundiales recientes de la BA (3/3)

Diferencia entre los mapas de Baccini y Saatchi:

- *El análisis reciente muestra diferencias localmente significativas, pero a nivel de escala regional los resultados son comparables.*



Esquema de la conferencia

1. Importancia de identificar las incertidumbres
2. Conceptos generales
3. Incertidumbres en las estimaciones del cambio del área
4. Incertidumbres en las estimaciones del cambio en las reservas de carbono
5. **Combinación de incertidumbres**

Combinación de incertidumbres

- Las incertidumbres en los parámetros individuales pueden combinarse con los siguientes métodos:
  - *Propagación de error* (nivel 1 del IPCC), que es fácil de implementar con una herramienta de hoja de cálculo; tienen que cumplirse determinadas condiciones para que pueda ser utilizada.
  - *Simulación de Monte Carlo* (nivel 2 del IPCC), basado en el modelado y que requiere más recursos para su implementación; se puede aplicar a cualquier dato o modelo.

Evaluación del nivel 1 (1/3)

El nivel 1 debe utilizarse preferentemente solo cuando:

- La estimación de emisiones y absorciones se basa en la suma, resta y multiplicación.
- No hay correlación entre las categorías, o las categorías se agrupan de manera que las correlaciones no son importantes.
- Los rangos relativos de incertidumbre en los factores de emisión y las estimaciones de área son los mismos en los años 1 y 2.
- Ningún parámetro tiene una incertidumbre > que aproximadamente ±60 %.
- Las incertidumbres son simétricas y siguen una distribución normal.

Incluso en el caso de que no se cumplan todas las condiciones, el método de nivel 1 se puede utilizar para obtener resultados aproximados.

Si las distribuciones son asimétricas → toman un valor absoluto más alto.

Evaluación del nivel 1 (2/3)

- Ecuación para la multiplicación:

$$U_{total} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + ... + U_n^2}$$

Where:

Ui = percentage uncertainty associated with each of the parameters

Utotal = the percentage uncertainty in the product of the parameters

- Ecuación para la suma y resta:

$$U_{total} = \frac{\sqrt{(U_1 * x_1)^2 + (U_2 * x_2)^2 ... (U_n * x_n)^2}}{|x_1 + x_2 ... + x_n|}$$

Where:

U_i = percentage uncertainty associated with each of the parameters

x_i = the value of the parameter

U_{total} = the percentage uncertainty in the sum of the parameters

Evaluación del nivel 1 (3/3)

Ejemplos de combinación de incertidumbres con el nivel 1

Multiplicación

	Mean value	Uncertainty (% of the mean)
Area change (ha)	10827	8
Carbon stock (t C/ha)	148	15

Thus the total carbon stock loss over the stratum is:

10,827 ha* 148 tC/ha = 1,602,396 t C

And the uncertainty = $\sqrt{8^2 + 15^2} = \pm 17\%$

Suma

	Mean	95 % CI
	t (C/ha)	
Living Trees	113	11
Down Dead Wood	18	3
Litter	7	2

therefore the total stock is 138 t C/ha and the uncertainty =

$$\frac{\sqrt{(11\% * 113)^2 + (3\% * 18)^2 + (2\% * 7)^2}}{|113 + 18 + 7|} = \pm 9\%$$

The total uncertainty is ±9% of the mean total C stock of 138 t C/ha

Evaluación de la tendencia del nivel 1 (1/2)

La estimación de la incertidumbre de la tendencia (nivel 1) se basa en el uso de dos sensibilidades:

- Sensibilidad de tipo A, que surge de incertidumbres que afectan las emisiones o absorciones en los años 1 y 2 por igual (es decir, las variables se correlacionan a través de los años).
- Sensibilidad de tipo B, que surge de incertidumbres que afectan las emisiones o absorciones en el año 1 y 2 únicamente (es decir, las variables no se correlacionan a través de los años).

Supuesto básico: *FE totalmente correlacionado a través de los años* (sensibilidad de tipo A), *DA no correlacionado a través de los años* (sensibilidad de tipo B).

Evaluación de la tendencia del nivel 1 (2/2)

Cuadro para combinar las incertidumbres de nivel y tendencia con el nivel 1

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Category	Gas	Emissions or removals in year 1	Emissions or removals in year 2	Area uncertainty	Emission factor uncertainty	Combined uncertainty	Contribution to variance by category in year 2	Type A sensitivity	Type B sensitivity	Uncertainty in trend introduced by emission factor uncertainty (Note ii)	Uncertainty in trend introduced by area uncertainty (Note iii)	Uncertainty introduced to the trend in total emissions/
		Mg CO_2	Mg CO_2	%	%	$\sqrt{E^2+F^2}$	$\frac{(G*D)^2}{(\sum D)^2}$	Note i	$\frac{D}{\sum C}$	$I*F$	$J*E*\sqrt{2}$	K^2+L^2
E.g. Forest converted to Cropland	CO_2											
E.g. Forest converted to Grassland	CO_2											
Etc	...											
Total		$\sum C$	$\sum D$				$\sum H$					$\sum M$
					Level uncertainty		$\sqrt{\sum H}$				Trend uncertainty	$\sqrt{\sum M}$

La evaluación de la tendencia y el cálculo de la incertidumbre total del nivel 1 pueden llevarse a cabo con este cuadro.

Consulte la explicación de las notas en el *Libro de consulta* de GOFC-GOLD (2014), sección 2.7.

Evaluación del nivel 2: Simulación de Monte Carlo (1/2)

El método del **nivel 2** se basa en una **simulación de Monte Carlo:**

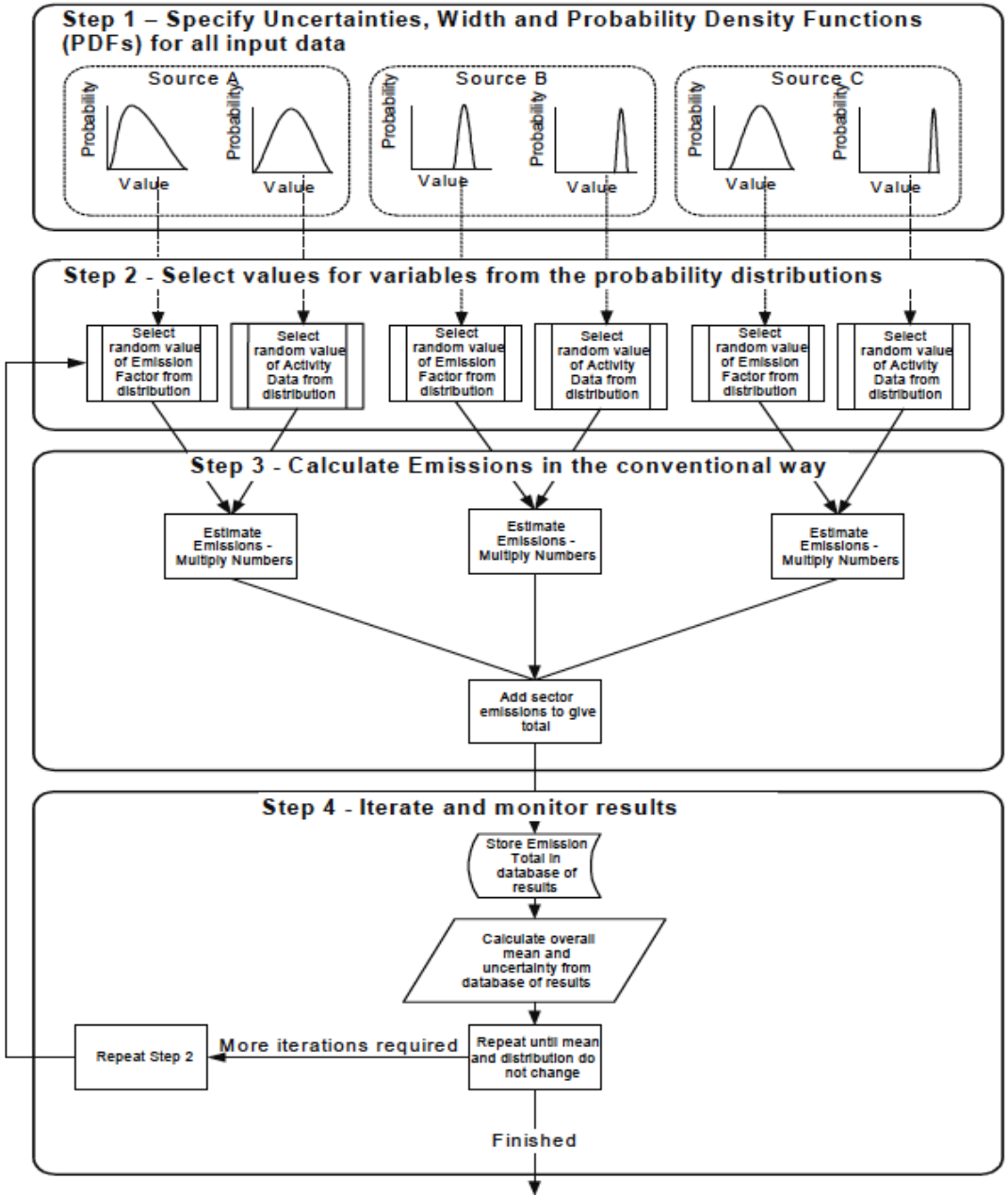
- El método del nivel 2 puede aplicarse a cualquier ecuación (en tanto el nivel 1 es aplicable solo para la suma, resta y multiplicación). El nivel 2 también puede aplicarse a modelos completos.
- El nivel 2 brinda resultados más confiables que el nivel 1, en especial cuando las incertidumbres son grandes, las distribuciones no son normales o existen correlaciones.
- La aplicación del nivel 2 requiere la programación o el uso de un paquete de *software* estadístico.
- Para obtener más detalles, consulte la orientación del IPCC (2003, cap. 5) y las directrices del IPCC (2006, vol. 1, cap. 3).

Evaluación del nivel 2: Simulación de Monte Carlo (2/2)

- El principio del análisis de Monte Carlo es seleccionar *valores aleatorios* del factor de emisión (FE), datos de actividad (DA) y otros parámetros de estimación de sus funciones de densidad de probabilidad individual y calcular los valores de emisión correspondientes.
- Este procedimiento se repite muchas veces (p. ej., 5000 o 10 000 veces), con una computadora. Esto produce 5000 o 10 000 valores para la emisión, según los cuales el usuario puede calcular el valor medio de la emisión y su intervalo de confianza del 95 %.

Ilustración del método de Monte Carlo

Fuente: IPCC 2006, cap. 3.

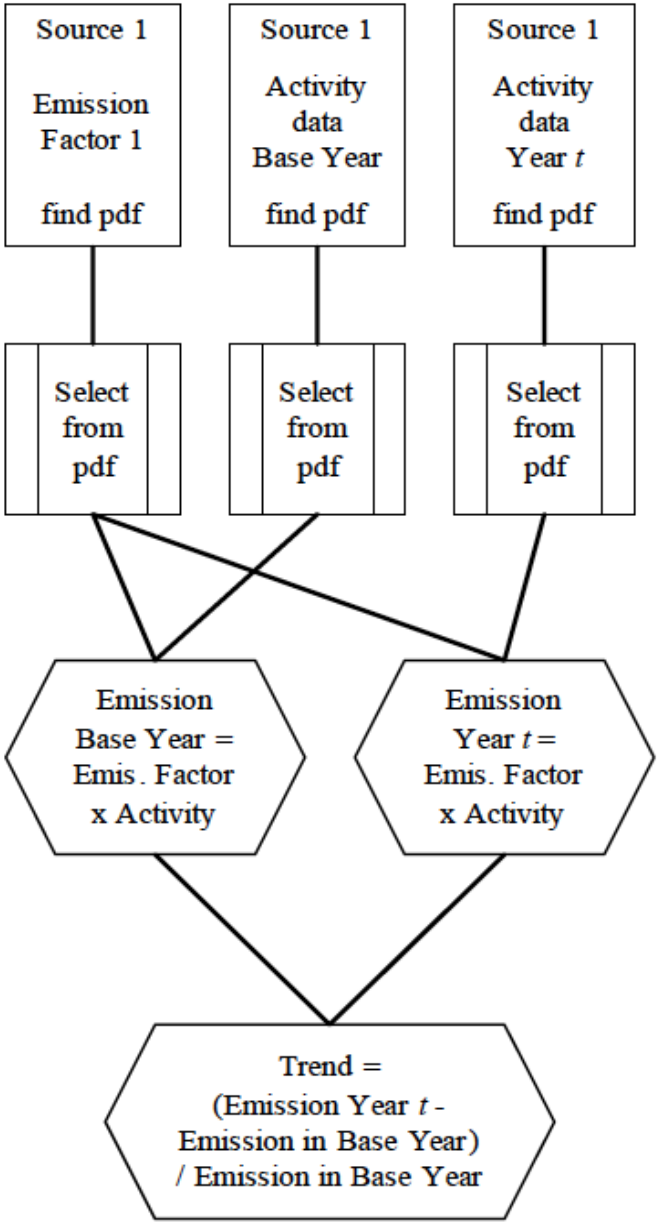


Esquema de cálculo para el análisis de Monte Carlo

Esquema de cálculo para el análisis de Monte Carlo de las **emisiones absolutas** y la **tendencia** de una categoría individual, estimadas como tiempos de FE y DA (IPCC, 2006).

El gráfico muestra el caso en el que el FE está 100 % correlacionado entre el año básico y el año t (p. ej., se utiliza el mismo factor de emisión en cada año y no hay una variación esperada de un año al otro).

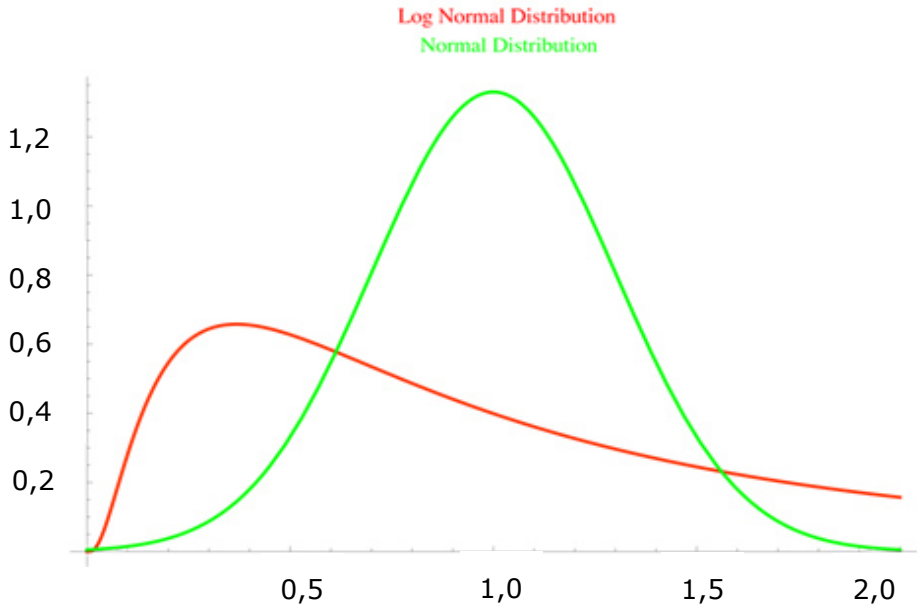
→ Para ver el caso de FE no correlacionados, consulte el IPCC (2006, vol. 1, cap. 3, gráfico 3.7).



Datos necesarios para ejecutar la simulación de Monte Carlo

- *Incertidumbre de cada parámetro expresada como función de densidad de probabilidad*: Cualquier distribución puede usarse con Monte Carlo. Por simplicidad (y si no se dispone de información más detallada), a menudo se asume que las incertidumbres simétricas se distribuyen *normalmente* y las incertidumbres con un sesgo positivo se distribuyen de forma *logarítmicamente normal*.

- *Correlaciones entre los parámetros*: La simulación de Monte Carlo puede considerar correlaciones tanto totales como parciales.



Presentación de informes de incertidumbres

Las incertidumbres deben presentarse con un formato estandarizado.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Category	Gas	Emissions or removals in year 1	Emissions or removals in year 2	Area uncertainty	Emission factor uncertainty	Combined uncertainty	Inventory trend for year 2 increase with respect to year 1 (Note a)	Trend uncertainty of the category	Method used to estimate uncertainty (Note b)
		Mg CO_2	Mg CO_2	%	%	%	% of year 1		
E.g. Forest Land converted to Cropland	CO_2								
E.g. Forest Land converted to Grassland	CO_2								
Etc	...								
Total						Level uncertainty		Trend uncertainty	

Consulte la explicación de las notas en el libro de consulta de GOFC-GOLD (2014, sección 4).

En resumen (1/2)

- La evaluación de la incertidumbre es fundamental en los contextos del IPCC y de la CMNUCC.
- La incertidumbre consta de dos componentes: e*rrores sistemáticos y errores aleatorios*.
- La *evaluación de exactitud* de la cubierta terrestre y los cambios se utiliza para clasificar la frecuencia de los errores (omisión y comisión) para cada clase y la exactitud general del mapa con un conjunto de datos de referencia independiente.

En resumen (2/2)

- La evaluación de las incertidumbres de las estimaciones de las reservas de C y los cambios en las reservas de C suele ser más difícil debido a los diferentes tipos de errores aleatorios y sistemáticos.
- Las incertidumbres en los parámetros individuales pueden combinarse con la propagación del error (nivel 1) o el análisis de Monte Carlo (nivel 2).

Ejemplos de países y ejercicios

Ejemplos de países

1. Quema de la biomasa
2. Análisis de la incertidumbre: UTCUTS en Finlandia
3. Aplicación del enfoque de principio conservador al ejemplo de República Democrática del Congo (enfoque de matriz). Consulte también el ejercicio 4

Ejercicios

1. Incertidumbres de área y cambio del área
2. Uso de ecuaciones del IPCC para combinar incertidumbres
3. Uso de ecuaciones del IPCC para evaluar incertidumbres de tendencias
4. El enfoque de la matriz de REDD+ (consulte el archivo xls del ejercicio y el ejemplo de país. Este ejercicio está compartido con el módulo 3.3)
5. Preparaciones para Monte Carlo

Módulos de consulta recomendados

- Módulo 2.8 para conocer más sobre la función de las tecnologías en evolución para hacer el seguimiento de los cambios del área forestal y cambios en las reservas forestales de carbono

- Módulos 3.1 a 3.3 para pasar a la evaluación y presentación de informes de REDD+

Bibliografía

- Baccini, A., S.J. Goetz, W. S. Walker, N. T. Laporte, M. Sun, D. Sulla-Menashe, J. Hackler, P.S. A. Beck, R. Dubayah, M. A. Friedl, y otros, 2012. "Estimated Carbon Dioxide Emissions from Tropical Deforestation Improved by Carbon-Density Maps." *Nature Climate Change* 2: 182-185.
- Brown, S. 1997. "Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: A Primer." *Informes de silvicultura de la FAO* 134. Roma, Italia: FAO. http://www.fao.org/icatalog/search/dett.asp?aries_id=7736.
- Card, D. H. 1982. "Using Known Map Category Marginal Frequencies to Improve Estimates of Thematic Map Accuracy." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 48: 431-439.
- Chave, J., R. Condit, S. Aguila, A. Hernandez, S. Lao y R. Perez. 2004. "Error Propagation and Scaling for Tropical Forest Biomass Estimates." *Philosophical Transactions of the Royal Socie*ty B 359: 409-20.
- Chave, J., A. Andalo, S. Brown, M. A. Cairns, J. Q. Chambers, D. Eamus, H. Foelster, F. Fromard, N. Higuchi, T. Kira, J-P Lescure, B. W. Nelson H. Ogawa, H. Puig, B. Riera y T. Yamakura. 2005. "Tree Allometry and Improved Estimation of Carbon Stocks and Balance in Tropical Forests." *Oecologia* 145: 87-99.

- Clark, D. B. y D. A. Clark. 2000. "Landscape-scale Variation in Forest Structure and Biomass in a Tropical Rain Forest." *Forest Ecology Management* 137: 185-198.
- Feldpausch, T. R., J. Lloyd, S. L. Lewis, R. J. W. Brienen, M. Gloor, A. Monteagudo Mendoza, G. Lopez-Gonzalez, L. Banin, K. Abu Salim, K. Affum-Baffoe, y otros, 2012. "Tree Height Integrated into Pantropical Forest Biomass Estimates." *Biogeosciences* 9: 3381-3403.
- Freibauer, A. 2007. "Soil Carbon Losses by Deforestation in the Tropics." Presentación de PowerPoint. https://seors.unfccc.int/seors/attachments/get_attachment?code=L1NPQ1Y0F267LFN0O8Y2F43H78MJW8ZA.
- Fuller, R. M., G. M. Smith y B. J. Devereux. 2003. "The Characterization and Measurement of Land Cover Change through Remote Sensing: Problems in Operational Applications?" *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 4: 243-253.
- GFOI (Iniciativa Mundial de Observación del Bosque). 2014. *Integrating Remote-sensing and Ground-based Observations for Estimation of Emissions and Removals of Greenhouse Gases in Forests: Methods and Guidance from the Global Forest Observations Initiative*. (A menudo GFOI MGD). Ginebra, Suiza: Group on Earth Observations, versión 1.0. http://www.gfoi.org/methods-guidance/.

- GOFC-GOLD (Observación Mundial de la Dinámica del Bosque y de la Cubierta Terrestre). 2014. *A Sourcebook of Methods and Procedures for Monitoring and Reporting Anthropogenic Greenhouse Gas Emissions and Removals Associated with Deforestation, Gains and Losses of Carbon Stocks in Forests Remaining Forests, and Forestation*. (A menudo Libro de consulta de GOFC-GOLD). Países Bajos: GOFC-GOLD Land Cover Project Office, Wageningen University. http://www.gofcgold.wur.nl/redd/index.php.

- Grassi, G., S. Monni, S. Federici, F. Achard y D. Mollicone. 2008. "Applying the Conservativeness Principle to REDD to Deal with the Uncertainties of the Estimates." *Environmental Research Letters* 3 (3).

- Grassi, G., S. Federici y F. Achard. 2013. "Implementing Conservativeness in REDD+ Is Realistic and Useful to Address the Most Uncertain Estimates." *Climatic Change* 119: 269–275. http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10584-013-0780-x.

- Houghton, R. A. 2005. "Aboveground Forest Biomass and the Global Carbon Balance." *Global Change Biology* 11: 945-58.

- Houghton, R. A., y otros, 2001. "The Spatial Distribution of Forest Biomass in the Brazilian Amazon: A Comparison of Estimates." *Global Change Biology* 7: 731-46.

- IPCC, 2003. *2003 Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*, Preparado por el National Greenhouse Gas Inventories Programme, Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K., Wagner, F. (eds.). Publicado: IGES, Japón. http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpglulucf/gpglulucf.html (A menudo conocido como IPCC GPG)

- IPCC 2006. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Volumen 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Preparado por el National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. y Tanabe K. (eds.). Publicado: IGES, Japón. http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html (A menudo conocido como IPCC AFOLU GL)
- Keller, M., M. Palace y G. Hurtt. 2001. "Biomass Estimation in the Tapajos National Forest, Brazil; Examination of Sampling and Allometric Uncertainties." Forest Ecology Management 154: 371-382.
- Langner, A., F. Achard, G. Grassi y M. Bucki. "Can Recent Pan-Tropical Biomass Maps Be Used as Improved Tier 1 Level Emission Factors for Reporting for REDD+ Activities under the UNFCCC?" En preparación.
- Lehtonen, A., E. Cienciala, F. Tatarinov y R. Makipaa. 2007. "Uncertainty Estimation of Biomass Expansion Factors for Norway Spruce in the Czech Republic." *Annals of Forest Science* 64: 133-140
- Lowell, K. 2001. "An Area-Based Accuracy Assessment Methodology for Digital Change Maps." *International Journal of Remote Sensing* 22: 3571-3596.
- McRoberts, R. E. 2014. Post-classification approaches to estimating change in forest area using remotely sensed auxiliary data. Remote Sens Environ. doi: 10.1016/j.rse.2013.03.036.
- McRoberts, R E., W. B. Cohen, E. Næsset, S. V. Stehman y E. Tomppo. 2010. "Using Remotely Sensed Data to Construct and Assess Forest Attribute Maps and Related Spatial Products." *Scandinavian Journal of Forest Research* 25 (4): 340-367.

- McRoberts, R. E. y B. F. Walters. 2012. "Statistical Inference for Remote Sensing-Based Estimates of Net Deforestation." *Remote Sensing of Environment* 124: 394-401.
- Mitchard, E. T. A., S. S. Saatchi, A. Baccini, G. P. Asner, S. J. Goetz, N. L. Harris y S. Brown. 2013. "Uncertainty in the Spatial Distribution of Tropical Forest Biomass: A Comparison of Pan-Tropical Maps." *Carbon Balance and Management* 8: 10.
- Olofsson, P., G. M. Foody, S. V. Stehman y C. E. Woodcock. 2013. "Making Better Use of Accuracy Data in Land Change Studies: Estimating Accuracy and Area and Quantifying Uncertainty Using Stratified Estimation." *Remote Sensing Environment* 129: 122-31.
- Pelletier, J., N. Ramankutty, C. Potvin. 2011. "Diagnosing the Uncertainty and Detectability of Emission Reductions for REDD+ Under Current Capabilities: An Example for Panama." *Environmental Research Letters* 6: 024005.
- Pelletier, J., K. R. Kirby y C. Potvin. 2012. "Significance of Carbon Stock Uncertainties on Emission Reductions from Deforestation and Forest Degradation in Developing Countries." *Forest Policy and Economics* 24: 3-11.
- Saatchi, S. S., N. L. Harris, S. Brown, M. Lefsky, E. T. A. Mitchard, W. Salas, B. R. Zutta, W. Buermann, S. L. Lewis, S. Hagen y otros, 2011. "Benchmark Map of Forest Carbon Stocks in Tropical Regions across Three Continents". *Proceedings of the National Academies of Science* 108: 9899-9904.

- Sannier, C., McRoberts, R.E., Fichet, L.-V. y Makaga, E. (2014). Application of the regression estimator to estimate Gabon forest cover area and net deforestation at national level. Remote Sensing of Environment doi:10.1016/j.rse.2013.09.015.
- Sierra, C. A., y otros, 2007. "Total Carbon Stocks in a Tropical Forest Landscape of the Porce Region, Colombia." *Forest Ecology Management* 243: 299-309.
- Stehman, S.V. (2009). Model-assisted estimation as a unifying framework for estimating the area of land cover and land-cover change from remote sensing. Remote Sensing of Environment 113: 2445-2462
- Stehman, S. V., T.L. Sohl y T. R. Loveland. 2003. "Statistical Sampling to Characterize Recent United States Land-Cover Change." *Remote Sensing of Environment* 86: 517-529.
- Strahler, A., L. Boschetti, G. M. Foody, al. 2006. *Global Land Cover Validation: Recommendations for Evaluation and Accuracy Assessment Of Global Land Cover Maps—Report of Committee of Earth Observation Satellites (CEOS) Working Group on Calibration and Validation (WGCV).* Luxemburgo: Comunidades europeas.
- Van Oort, P. A. J. 2007. "Interpreting the Change Detection Error Matrix." *Remote Sensing of Environment* 108: 1-8.
- Wulder, M., S. E. Franklin, J. C. White, J. Linke y S. Magnussen. 2006. "An Accuracy Assessment Framework for Large Area Land-Cover Classification Products Derived from Medium Resolution Satellite Data*." International Journal of Remote Sensing* 27: 663-683.