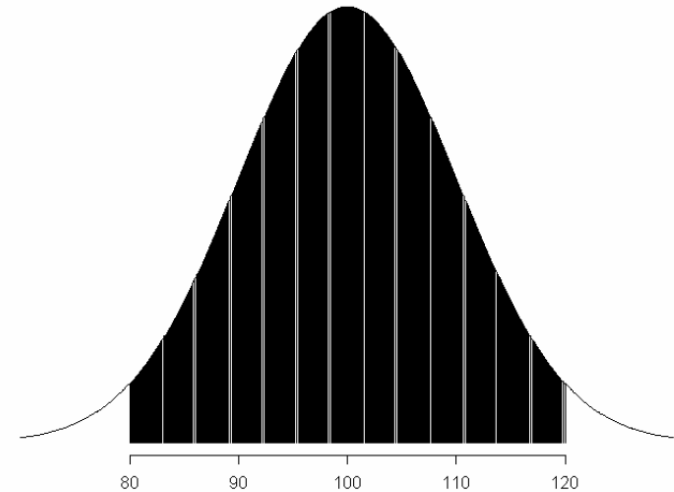


Module 2.7 Estimation of uncertainties

Module Overview

Eric Bullock, Boston University

July 5th, 2016



Source: IPCC GPG LULUCF

Module 2.7 Estimation of uncertainties

Module developers:

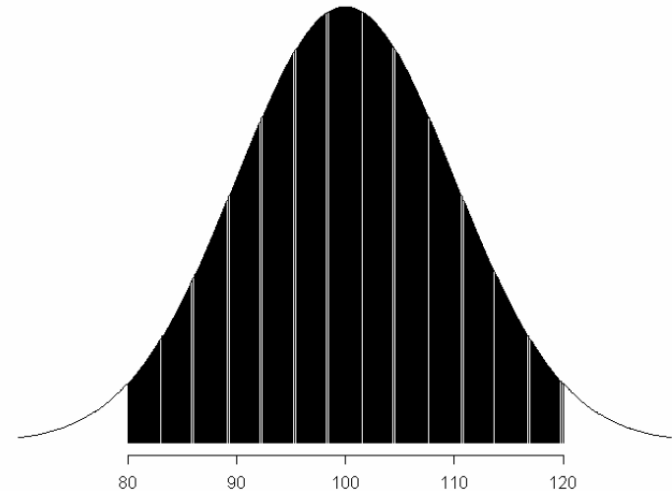
Giacomo Grassi, EC Joint Research Centre

Suvi Monni, Benviroc

Frédéric Achard, EC Joint Research Centre

Andreas Langner, EC Joint Research Centre

Martin Herold, Wageningen University



Source: IPCC GPG LULUCF

After the course the participants should be able to:

- Identify sources of uncertainty in the estimates of area change (activity data) and carbon stocks change (emission factor)
- Implement the correct steps to calculate uncertainties for estimates in area change and carbon stock change
- Understand the possible treatment of uncertainties in a conservative way

V1, May 2015

Módulo 2.7: Estimación de incertidumbres

Autores del módulo:

Giacomo Grassi, Centro Común de Investigación de la CE

Suvi Monni, Benviroc

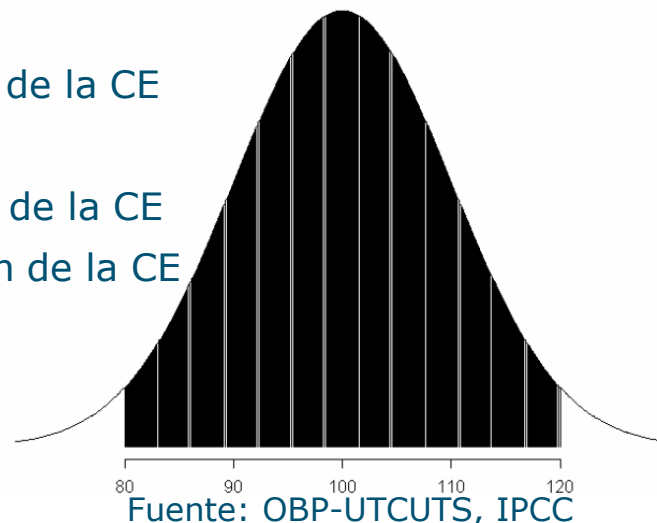
Frédéric Achard, Centro Común de Investigación de la CE

Andreas Langner, Centro Común de Investigación de la CE

Martin Herold, Universidad de Wageningen

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



V1, mayo de 2015

Aim of this module: Uncertainty estimation

- Building on the IPCC (2003) guidance, this module aims to provide some basic elements for the *identification, quantification, and combination* of uncertainties for the estimates of:
 - Area and area changes (the **activity data, AD**)
 - Carbon stocks and carbon stock changes (the **emission factors, EF**)



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**)



Outline of Module 2.7

1. Importance of identifying uncertainties
2. General concepts
3. Uncertainties in area-change estimates
4. Uncertainties in carbon stocks change estimates
5. Combination of uncertainties
6. Country examples
7. Exercises



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



Country examples and exercises

6. Country examples

- Biomass burning
- Uncertainty analysis: LULUCF in Finland
- Applying the conservativeness approach to the DRC example (matrix approach) - **See also Exercise 4**

7. Exercises

- Uncertainties in area and area change
- Using IPCC equations to combine uncertainties
- Using IPCC equations to assess trend uncertainties
- The REDD+ matrix approach (see xls exercise file and country example – this exercise is **in common with Module 3.3**)
- Preparations for Monte Carlo



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



Systematic errors and random errors

■ **Uncertainty** consists of two components:

- *Bias or systematic error* (lack of *accuracy*) occurs, e.g., due to flaws in the measurements or sampling methods or due to use of an EF that is not suitable
- *Random error* (lack of *precision*) is a random variation above or below a mean value. It cannot be fully avoided but can be reduced by, for example, increasing the sample size.

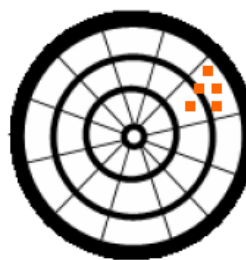
Accuracy: agreement between estimates and exact or true values

Precision: agreement among repeated measurements or estimates

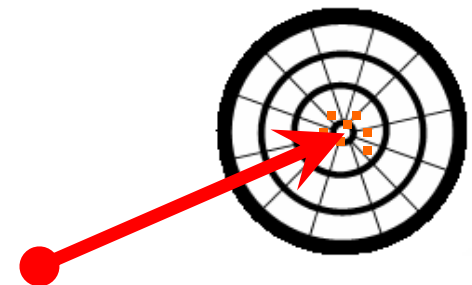
(A) Accurate but not precise



(B) Precise but not accurate



(C) Accurate and precise



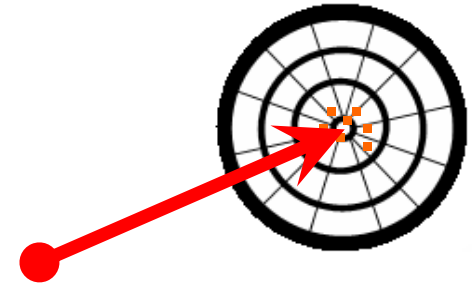
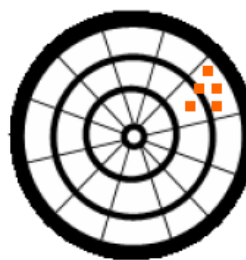
Errores sistemáticos y errores aleatorios (1/2)

- 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

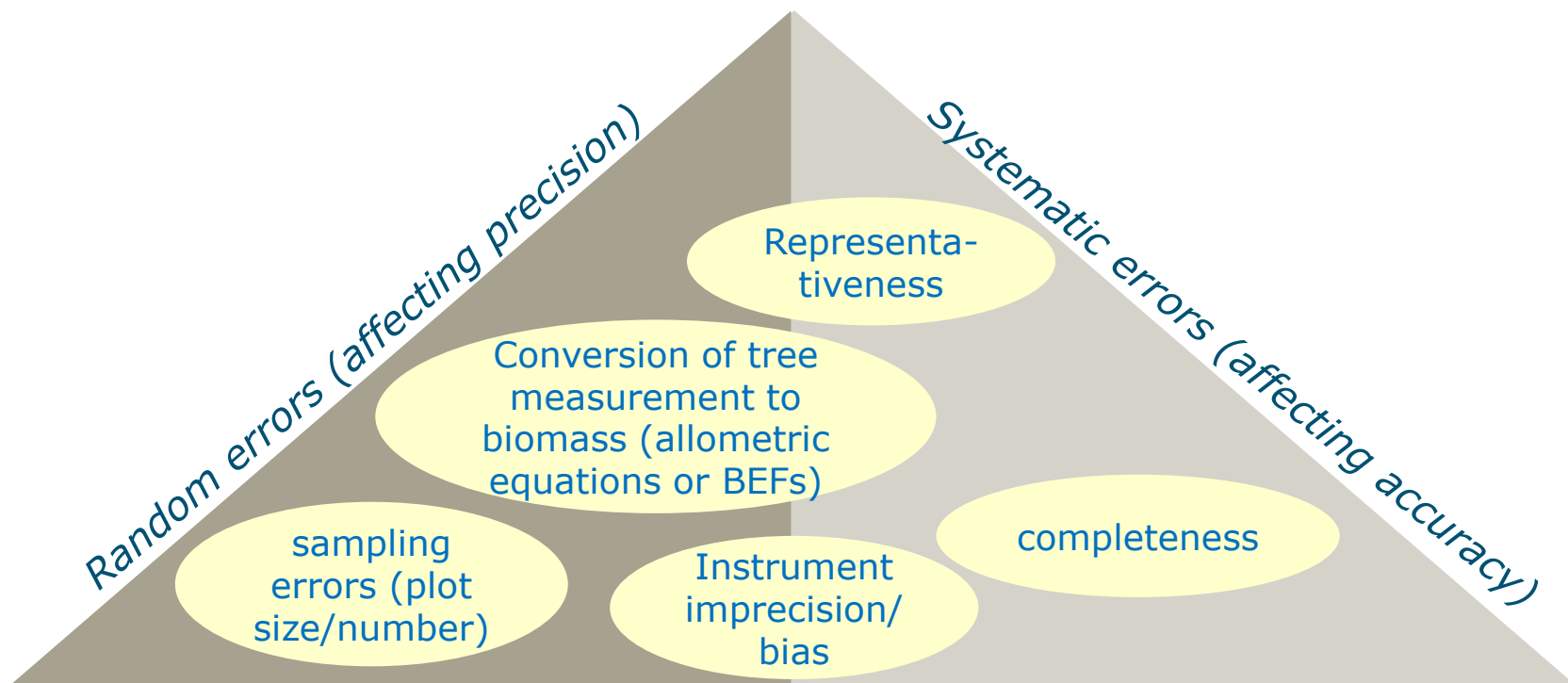
Precisión: coincidencia entre mediciones o estimaciones repetidas

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



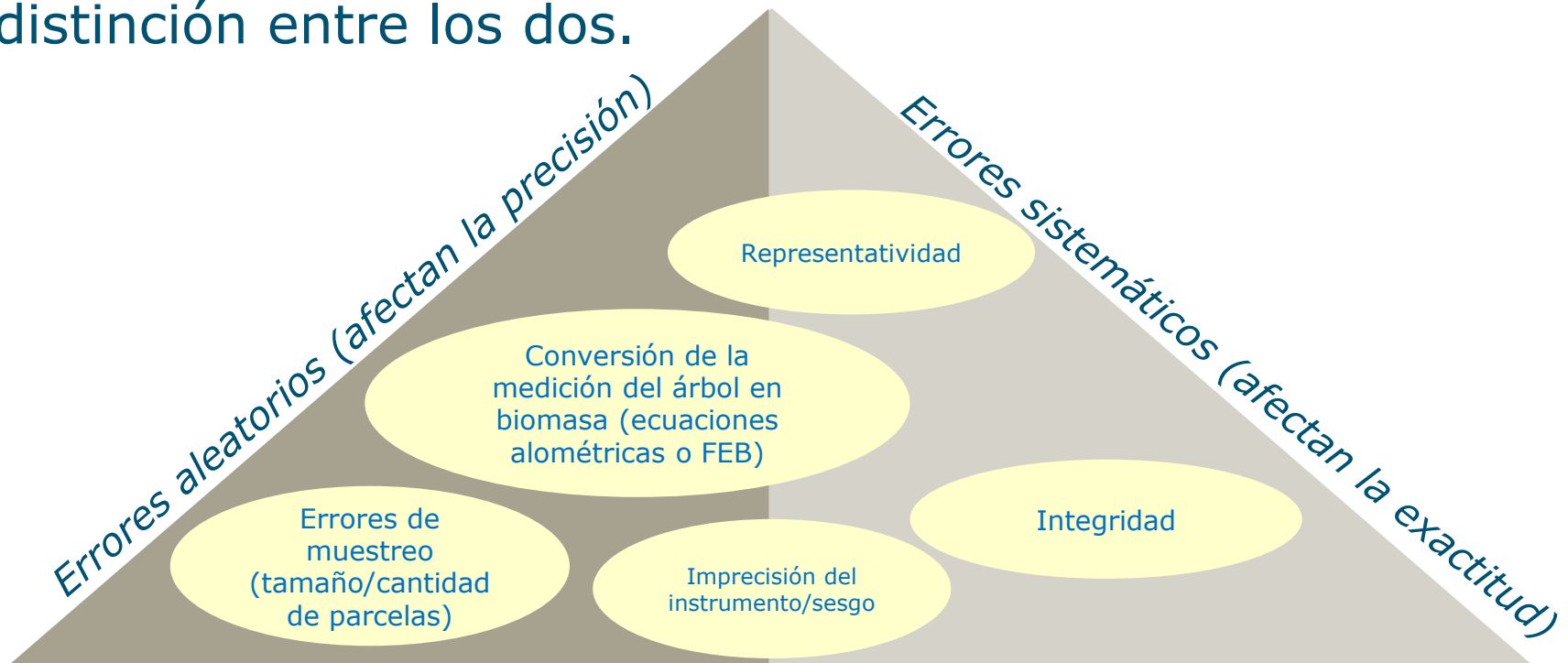
Random errors and systematic errors

- Uncertainty of carbon stocks can be caused by both *random errors* and *systematic errors*, but sometimes it may be difficult to distinguish between the two.



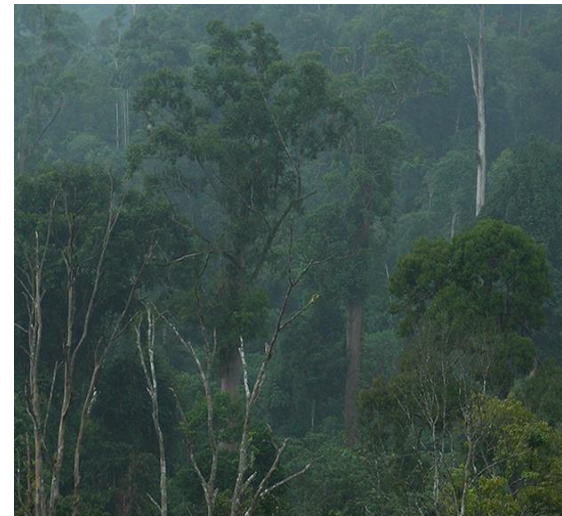
Errores aleatorios y errores sistemáticos

- 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.



Uncertainties due to random errors

- *Instrumental imprecision* (noise, wrong handling, etc.)
- *Sampling errors* (i.e., plot size and number), common with high natural variation of biomass in tropical forests



Biomass depends on temperature, precipitation, forest type and species, stratification, spatial scale, natural and human disturbances, soil type, and soil nutrients.



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.



Uncertainties in area changes

- In REDD+ context, an estimate of area and/or area change typically results from analysis of a remote-sensing-based map.
- Such maps are subject to classification errors that induce bias into estimations.
- A suitable approach is to **assess the accuracy of the map** and use the results of the accuracy assessment to adjust the area estimates.



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.



Accuracy assessment of land cover and changes

Use of accuracy assessment results for area estimation

- The aim of the accuracy assessment is to characterize the frequency of errors (omission and commission) for each land cover class.
- Differences in these two errors may be used to adjust area estimates and also to estimate the uncertainties (confidence intervals) for the areas for each class.
- Adjusting area estimates on the basis of a rigorous accuracy assessment represents an improvement over simply reporting the areas of map classes.



Evaluación de exactitud de la cubierta terrestre y de los cambios

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.



Accuracy assessment of land cover and changes

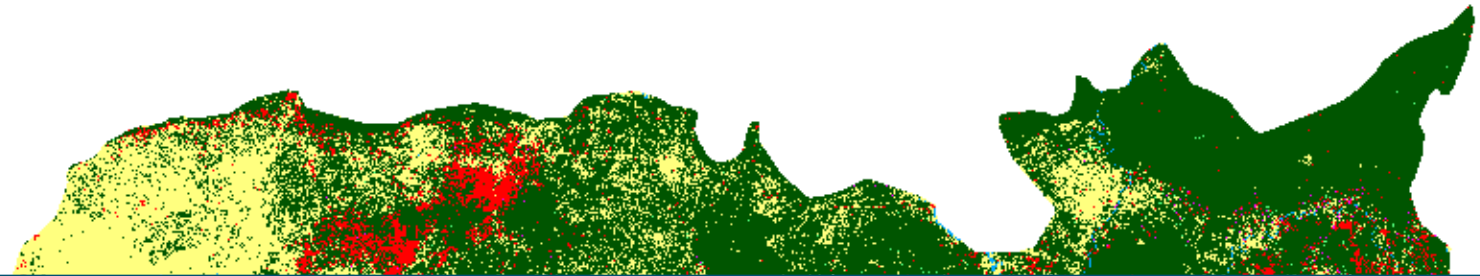
- For **land-cover** maps the accuracy of remote sensing data (single-date) may be assessed with widely accepted methods.
- These methods involve assessing the accuracy of a map using *independent reference data* (of greater quality than the map) to obtain—by land-cover class or by region—the *overall accuracy*, and:
 - *Errors of omission* (excluding an area from a category to which it does truly belong, i.e., area underestimation)
 - *Errors of commission* (including an area in a category to which it does not truly belong, i.e., area overestimation)



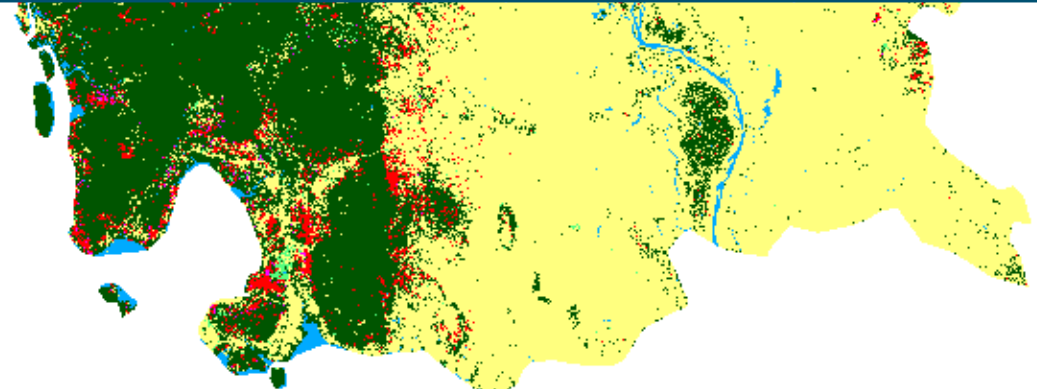
Evaluación de exactitud de la cubierta terrestre y de los cambios

- 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)





<i>Stratum</i>	<i>Area [ha] ± 95% CI</i>	<i>User's</i>	<i>Prod's</i>	<i>Overall</i>
1 Non-forest	7,491,658 ± 361,859	0.942	0.939	0.942
2 Forest	8,950,261 ± 362,388	0.951	0.953	
3 Water	501,212 ± 89,865	0.966	0.910	
4 Loss	1,137,007 ± 150,073	0.875	0.923	
5 Gain	83,497 ± 84,040	0.562	0.489	



Accuracy assessment of land cover and changes

For **land-cover changes**, additional considerations apply:

- It is usually **more difficult** to obtain suitable, multitemporal reference data of greater quality to use as the basis of the accuracy assessment, particularly for historical time frames.
- Since the changed classes are often small proportions of landscapes, it is easier to assess errors of commission (by examining small areas identified as changed) than errors of omission (by examining large area identified as unchanged).
- Other errors such as geo-location of multitemporal datasets and inconsistencies in processing/analysis and in cartographic/thematic standards are exaggerated and more frequent in change assessments.



Evaluación de exactitud de la cubierta terrestre y de los cambios

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

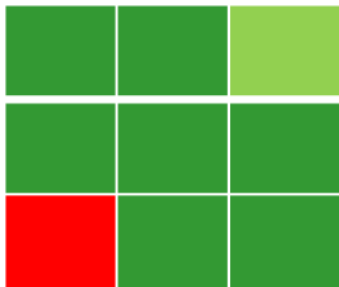


de cambio.

Errors in area-change estimates: Example

Why errors in area-change estimates are more frequent than errors in area estimates

Map at time 1







Map at time 2



Overlap (change)



-  Omission error (forest reported as nonforest)
-  Commission error (nonforest reported as forest)
-  False afforestation
-  False deforestation







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



Addressing sources of uncertainty in area-change

Many of these sources of uncertainty can be addressed using widely accepted data and approaches:

- Suitable of satellite data: Landsat-type data, for example, have been proven useful for national-scale land cover changes for MMU of 1 ha
- Data quality: suitable preprocessing for most regions provided by some data providers (i.e., global Landsat Geocover)
- **Consistent** and **transparent** mapping: same cartographic and thematic standards and accepted interpretation methods should be applied transparently using expert interpreters

The accuracy assessment should provide measures of thematic accuracy and confidence intervals for estimates of activity data



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.



Building additional confidence in estimates

Information obtained without a proper probability sample design can still be useful to build confidence in the estimates, e.g.:

- Spatially-distributed confidence values provided by the interpretation
- Systematic qualitative examinations of the map and comparisons (qualitative / quantitative) with other maps
- Review by local and regional experts
- Comparisons with non-spatial and statistical data

Any uncertainty bound should be treated conservatively to avoid producing a benefit for the country (overestimation of removals or of emissions reductions)



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)



Uncertainties in carbon stock changes

- Assessing uncertainties of the estimates of C stocks and C stocks changes is usually **more challenging** (and often subjective) than estimating uncertainties of the area and area changes
- According to the literature, the overall uncertainty for C stocks estimates is usually **larger** than the uncertainty for area estimates. However, when looking at changes (i.e. trends) in C stocks and areas, the picture *may* change, depending on possible correlation of errors (see later)



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).



Addressing sources of uncertainty in carbon stock

It is often more difficult to address sources of uncertainty in carbon stock estimation or carbon stock change estimation. Some suitable strategies include:

- Evaluating the most appropriate allometric equation to use for the study site.
- Address the completeness of the carbon pool – not just above-ground.
- Use of representative sample sites



Combination of uncertainties

- The uncertainties in individual parameters can be combined using either:
 - *Error propagation* (IPCC Tier 1), which is easy to implement using a spreadsheet tool; certain conditions have to be fulfilled so that it can be used.
 - *Monte Carlo simulation* (IPCC Tier 2), based on modelling and requiring more resources to be implemented; it can be applied to any data or model.



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.



Reporting of uncertainties

Uncertainties should be reported with a standardized format

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Category	Gas	or Emissions removals in year 1	or Emissions 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 uncertain ty		Trend uncertain ty	

See GOFD-GOLDC (2014, sect. 4) *Sourcebook* for explanation of notes.

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

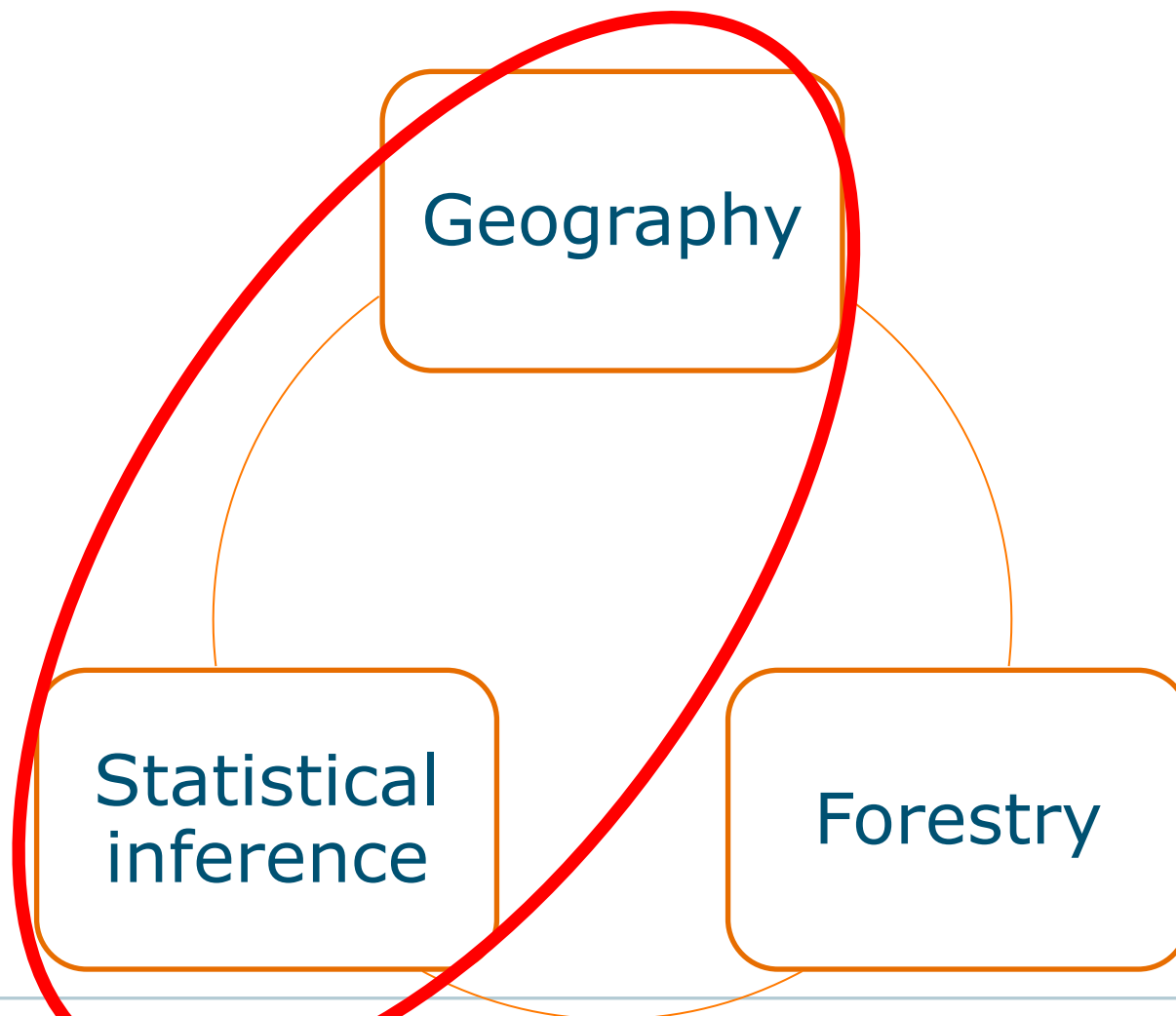
Cuadro para combinar las incertidumbres de nivel y tendencia con el nivel 1

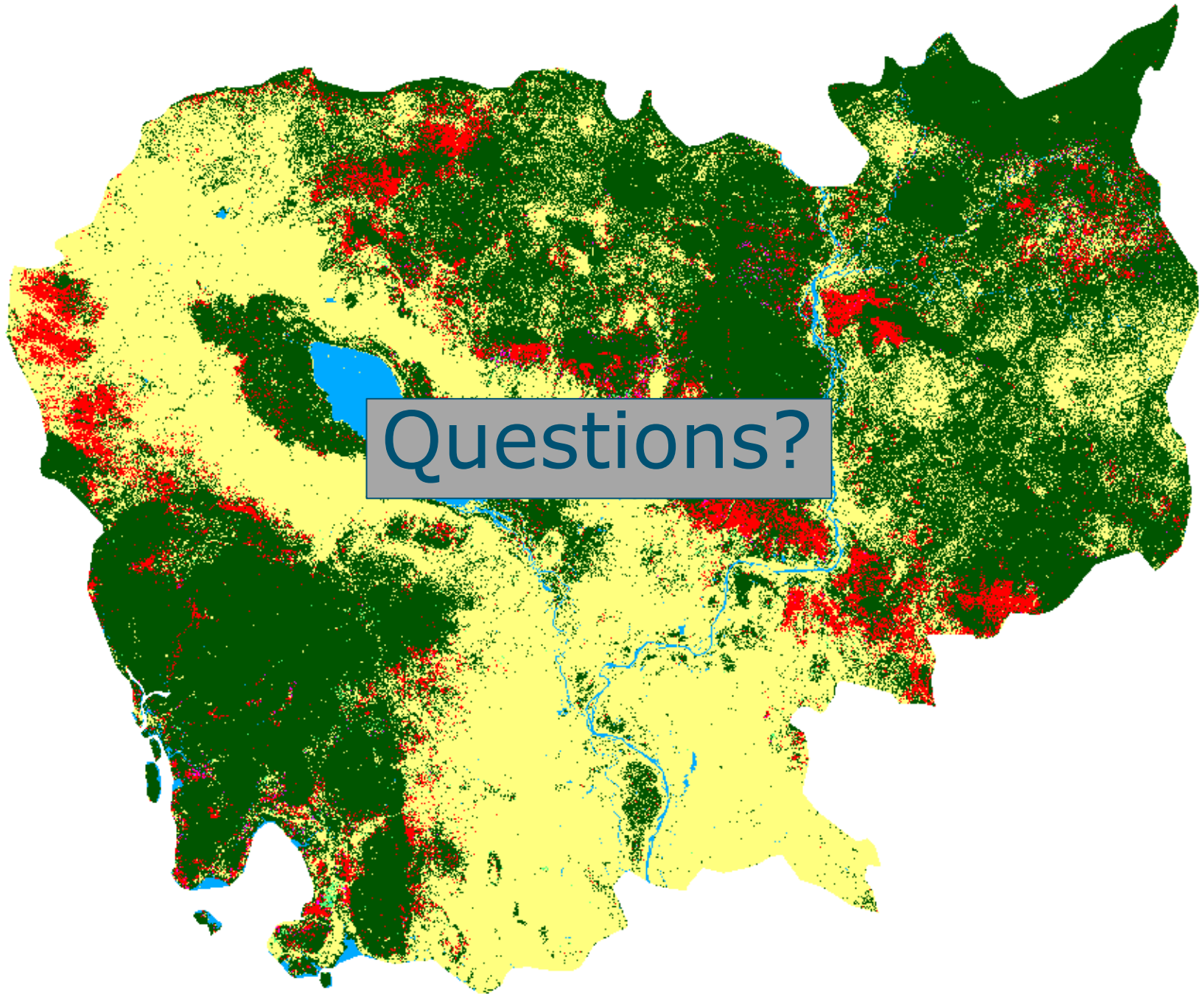
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Category	Gas	Emissions or removals in year 1	Emissions or removals in year 2	Area uncertainty	Emission factor uncertainty	Combined uncertainty	Contribution to variance by category in year 2	Type A sensitivity	Type B sensitivity	Uncertainty in trend introduced by emission factor 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.

To make REDD+ happen:





Questions?

References

- 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, et al. 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." *FAO Forestry Papers* 134. Rome, Italy: 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, and R. Perez. 2004. "Error Propagation and Scaling for Tropical Forest Biomass Estimates." *Philosophical Transactions of the Royal Society 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, and T. Yamakura. 2005. "Tree Allometry and Improved Estimation of Carbon Stocks and Balance in Tropical Forests." *Oecologia* 145: 87–99.



- Clark, D. B., and 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, et al. 2012. "Tree Height Integrated into Pantropical Forest Biomass Estimates." *Biogeosciences* 9: 3381–3403.
- Freibauer, A. 2007. "Soil Carbon Losses by Deforestation in the Tropics." PowerPoint presentation. https://seors.unfccc.int/seors/attachments/get_attachment?code=L1NPQ1Y0F267LFN008Y2F43H78MJW8ZA.
- Fuller, R. M., G. M. Smith, and 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 (Global Forest Observations Initiative). 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*. (Often GFOI MGD.) Geneva, Switzerland: Group on Earth Observations, version 1.0. <http://www.gfoi.org/methods-guidance/>.



- GOFC-GOLD (Global Observation of Forest Cover and Land Dynamics). 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*. (Often GOFC-GOLD Sourcebook.) Netherland: GOFC-GOLD Land Cover Project Office, Wageningen University. <http://www.gofcgold.wur.nl/redd/index.php>.
- Grassi, G., S. Monni, S. Federici, F. Achard, and 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, and 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., et al. 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*, Prepared by the 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.). Published: IGES, Japan. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf.html> (Often referred to as IPCC GPG)



- IPCC 2006. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html> (Often referred to as IPCC AFOLU GL)
- Keller, M., M. Palace, and 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, and 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?" In preparation.
- Lehtonen, A., E. Cienciala, F. Tatarinov, and 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, and 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., and 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, and 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, and 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, and 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 et al. 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., & 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., et al. 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, and 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)*. Luxembourg: European Communities.
- 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, and 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.

