



Ministerio
de Ganadería,
Agricultura y Pesca

Dirección General FORESTAL



Ministerio
de Ambiente

Dirección Nacional de Cambio Climático



Informe de Validación de la Cartografía de Bosque Nativo de Uruguay creado a partir de imágenes Sentinel 2021

Indicador de desempeño asociado al Bono Indexado a Indicadores de Cambio Climático.

KPI-2 Área de Bosque nativo en Hectáreas

Marzo 2023

ÍNDICE

1.INTRODUCCIÓN	3
2. DISEÑO MUESTRAL.....	3
Estratificación.....	3
Tamaño de muestra y asignación entre estratos.....	4
Probabilidades de inclusión	5
Estimadores.....	6
3. INTERPRETACIÓN VISUAL DE LOS SEGMENTOS INCLUIDOS EN LA MUESTRA DE VALIDACIÓN	8
4. RESULTADOS	11
5. BIBLIOGRAFÍA	13

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de este documento es presentar la metodología para la obtención de los resultados de la exactitud global y de los errores de comisión y de omisión del mapa de cobertura Bosque Nativo de Uruguay, basado en imágenes Sentinel 2021.

En una primera parte se describe el detalle del diseño muestral utilizado, las definiciones y el plan de estimadores.

En la segunda parte se describe el procedimiento para el relevamiento de la muestra de validación y los criterios utilizados para la determinación de los errores de comisión y omisión.

Por último, se presentan los resultados de la superficie bien clasificada, así como de los errores asociados, junto con sus respectivos intervalos de confianza.

2. DISEÑO MUESTRAL

De acuerdo a las recomendaciones de buenas prácticas de Olofsson et al. (2014), el diseño muestral a utilizarse en un proceso de validación debe ser probabilístico, de forma que proporcione una base rigurosa para las estimaciones, basadas en el diseño. Se sugiere estratificar por clase, y aumentar el tamaño de muestra en las clases de menor tamaño para mejorar la precisión de la estimación. El tamaño de muestra final dependerá de los objetivos planteados en términos de precisión para la estimación de los errores de comisión y omisión.

El diseño implementado para la validación del mapa de cobertura de Bosque Nativo 2021 de Uruguay fue aleatorio, estratificado por clase, y con probabilidades de inclusión proporcionales al tamaño. Los tamaños de muestra fueron calculados por estrato de forma que las estimaciones de los errores de comisión y omisión para las diferentes clases tuviera una alta precisión.

Estratificación

Los segmentos en los que se basó la cartografía constituyeron la unidad de muestreo y fueron clasificados en estratos de acuerdo a las clases definidas en el mapa de cobertura y a las zonas de trabajo en las que se dividió el país para la elaboración de la cartografía. Las clases fueron el Bosque Nativo y No Bosque conformado por el resto de las categorías de cobertura de suelo en una única categoría.

Tamaño de muestra y asignación entre estratos

El tamaño de muestra se calculó por separado para cada estrato (Bosque Nativo y No Bosque), de forma de asegurar una precisión predeterminada para los errores de comisión y omisión. El tamaño de muestra para cada estrato se calculó utilizando la siguiente fórmula (Olofsson et al., 2014):

$$n = \frac{z^2 p(1-p)}{d^2}$$

Donde z es el percentil de la Normal Estándar que corresponde a una confianza del $1-\alpha$ %, d es la precisión deseada para el error de comisión u omisión, $p(1-p)$ es la varianza de una variable aleatoria Bernoulli, que representa la varianza de los errores de comisión u omisión.

La precisión (d) definida para el error de comisión fue de ± 0.01 y de ± 0.02 para el error de omisión. Se trabaja con un nivel de confianza del 95%, por lo que el valor de $z=1.96$.

Para definir el valor de $p(1-p)$ fue necesario realizar un supuesto sobre la magnitud de los errores de comisión y omisión. Para ello, se tomó como referencia los extremos superiores de los intervalos de confianza al 95% de los errores de comisión y omisión obtenidos en la validación de la cartografía de Bosque Nativo de 2016 (Proyecto REDD+, 2019).

Este supuesto es conservador en el sentido de que se asume el peor escenario para la estimación de los errores de comisión y omisión. El tamaño de muestra resultante será mayor que el obtenido si se toman como referencia las estimaciones puntuales de ambos errores, asegurando así la precisión preestablecida para los errores de omisión y comisión.

De acuerdo a la validación de la cartografía de Bosque Nativo de 2016, el intervalo de confianza al 95% para el error de comisión fue [3.5%; 5.6%] y [15.5%; 30%] para el error de omisión.

Para la validación de esta cartografía se tomó entonces para el estrato Bosque Nativo $p = 0.056$ y para el estrato No Bosque $p = 0.30$.

Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Clase	d	z	$p(1-p)$	n
Bosque Nativo	0,01	1,96	0,0529	2031
No Bosque	0,02	1,96	0,21	2017

Tabla 1: Tamaños de muestra por clase

Como se explicó en la sección 2.3.3. del documento “Informe de Metodología y Resultados de la Cartografía de Bosque Nativo 2021”, los segmentos fueron editados por un equipo de cinco intérpretes.

Dado que el equipo de trabajo a cargo de relevar la muestra de validación fue el mismo, se decidió asignar la muestra por intérprete de forma que no releven su propia área de trabajo adjudicada en el proceso de edición.

Es así que luego de obtenidos los tamaños de muestra para los estratos Bosque Nativo y No Bosque, la muestra se repartió por intérprete en forma proporcional a la superficie total adjudicada en la etapa de edición. El resultado se presenta en la Tabla 2.

Intérprete	Bosque Nativo	No Bosque
1	452	440
2	384	292
3	306	341
4	482	488
5	407	456
Total	2031	2017

Tabla 2: Tamaños de muestra por estrato.

Probabilidades de inclusión

Dentro de cada estrato la selección de los segmentos se realizó con probabilidad proporcional al tamaño. La medida de tamaño utilizada parte de la probabilidad de los píxeles de pertenecer a la clase cobertura forestal.

Como fuera explicado en el documento “Informe de Metodología y Resultados de la Cartografía 2021 de Bosque Nativo”, en el proceso de elaboración de la cartografía se partió de un algoritmo de clasificación (*Random Forest*), implementado en dos etapas, en donde se obtuvo la clase cobertura forestal en una primera clasificación, y luego dentro de ésta, se obtuvo la clasificación del píxel como Bosque Nativo, en los casos que correspondió.

Se generó un ráster con la probabilidad de pertenencia a la clase cobertura forestal para la superficie del territorio nacional. Esta probabilidad es un indicador de la similitud del píxel a la clase cobertura forestal: cuanto mayor es su valor, mayor es la probabilidad de la presencia de árboles en el píxel.

Utilizar estas probabilidades en el diseño de la muestra puede incrementar el número de casos relevados de errores de comisión y omisión, y así obtener una estimación más precisa para la magnitud de ambos errores.

Sea U_i el i -ésimo segmento de la población y x_k la probabilidad del píxel k de pertenecer a la clase cobertura forestal. Para cada segmento U_i se calculó la probabilidad promedio de pertenecer a la clase cobertura forestal como el promedio de los píxeles contenidos en el segmento i :

$$\bar{f}_i = \frac{\sum_{U_i} x_k}{N_i}$$

N_i representa el total de píxeles del segmento i . Si la probabilidad promedio $\bar{f}_i$ es alta, significa que el segmento tiene alta probabilidad de pertenecer a la clase cobertura forestal. La probabilidad de inclusión del segmento i , en la muestra, π_i , se calculó de acuerdo a un diseño con probabilidad proporcional al tamaño (Särndal et al., 1992), de forma que:

$$\pi_i = \frac{\bar{f}_i}{\sum_{U_i} \bar{f}_i}$$

En este procedimiento se asumió que los segmentos relevados en donde se cometieron errores de comisión u omisión tienen valores similares a los clasificados correctamente como Bosque Nativo, en términos de la probabilidad de pertenencia a la clase cobertura forestal.

Para el estrato No Bosque, se tiene que aquellos segmentos con mayor similitud a la clase Bosque Nativo, tendrán mayor probabilidad de ser incluidos en la muestra.

Para el estrato Bosque Nativo se buscó incrementar los casos con menor probabilidad de ser Bosque Nativo, con el objetivo de detectar mayores errores de comisión. En este caso las probabilidades de inclusión se calcularon en base al complemento de la probabilidad de pertenecer al estrato Bosque Nativo.

Estimadores

De acuerdo a Olofsson et al. (2014) y a Stehman (2009), los errores deben calcularse en términos de proporciones de superficie bien clasificada.

Los datos a estimar implican el uso de dos tipos de estimadores: estimadores de totales (Särndal et al., 1992), utilizados para el cálculo de las estimaciones de las superficies totales, y estimadores de razón (Strahler et al., 2006), utilizados para el cálculo del error global, y de los errores de comisión y omisión. Los estimadores utilizados se presentan en la Tabla 3.

Mapa	Referencia ¹		
	Bosque	No Bosque	Total
Bosque	$\hat{t}_{B,B}$	$\hat{t}_{B,NB}$	$t_{B.}$
No Bosque	$\hat{t}_{NB,B}$	$\hat{t}_{NB,NB}$	$t_{NB.}$
Total	$\hat{t}_{.B}$	$\hat{t}_{.NB}$	t

Tabla 3: Estimadores de la superficie según la clasificación de la matriz de confusión

Los estimadores de los totales en las distintas celdas de la matriz de confusión (Tabla 3) tienen la siguiente forma:

$$\hat{t}_j = \sum_{s_j} \frac{y_i}{\pi_i}$$

donde s_j es el subconjunto de la muestra correspondiente a cada celda de la matriz de confusión ($j = (B, B), (NB, NB), (NB, B), (B, NB)$), y y_i es el área del segmento medida en hectáreas. Los totales de las columnas se obtienen como la suma de las estimaciones de las celdas.

Los estimadores de razón son el cociente entre dos estimadores. El cálculo de la exactitud global, $\hat{O}$ es el cociente entre las áreas bien clasificadas (diagonal de la matriz de confusión) y la superficie total:

$$\hat{O} = \frac{\hat{t}_{B,B} + \hat{t}_{NB,NB}}{t}$$

Este indicador es útil como medida de la performance global del mapa, pero no es atribuible directamente a una clase en particular.

La exactitud del usuario para la clase Bosque Nativo $\hat{U}$ es el cociente entre el área bien clasificada como Bosque Nativo y el área de Bosque Nativo obtenida a partir de la capa (filas de la matriz de confusión):

$$\hat{U} = \frac{\hat{t}_{B,B}}{t_{B.}}$$

La exactitud del productor, $\hat{P}$ es el cociente entre el área bien clasificada como Bosque Nativo y el área estimada total de Bosque Nativo a partir de los datos de referencia (columnas de la matriz de confusión):

$$\hat{P} = \frac{\hat{t}_{B,B}}{\hat{t}_{.B}}$$

¹ Los datos de referencia son los que surgen de la revisión de los segmentos con imágenes de alta resolución (imágenes de Google Earth, ESRI, ortofotografías aéreas de la IDEUy).

La estimación del error global se obtiene como $1 - \hat{O}$, la del error de comisión como $1 - \hat{U}$ y la del error de omisión como $1 - \hat{P}$.

3. INTERPRETACIÓN VISUAL DE LOS SEGMENTOS INCLUIDOS EN LA MUESTRA DE VALIDACIÓN

Una vez seleccionada la muestra de validación se procedió a la interpretación visual de los segmentos por parte del equipo de trabajo.

Los datos de referencia (los considerados como la “verdad absoluta” en la matriz de confusión) fueron las imágenes disponibles de alta resolución, las mismas utilizadas en la etapa de la Edición post- clasificación (Google Satellite, ESRI Satellite, ortofotografías aéreas de la Infraestructura de Datos Espaciales de Uruguay [IDEUy]) y el compuesto de imágenes Sentinel-2 utilizado para la clasificación.

La información contenida en la muestra proporcionada a los intérpretes sólo incluyó un identificador del segmento. De esta forma los intérpretes desconocen de antemano si el segmento corresponde a la clase Bosque Nativo y la interpretación no se encuentra sesgada hacia los resultados de la clasificación previa. Cada intérprete debió completar la información de dos campos:

- La clase, es decir si el segmento corresponde a Bosque Nativo o no.
- Observaciones, en el caso de que surjan dudas o comentarios sobre la clase final asignada por el intérprete.

Una vez finalizado el trabajo del equipo a cargo de la validación, las muestras fueron revisadas por el supervisor técnico de la cartografía, a los efectos de evaluar la calidad de la clasificación.

Finalizada la etapa de supervisión se procedió a cotejar el resultado de la interpretación de los segmentos de la muestra con el resultado de la clasificación, es decir con la clase correspondiente a cada segmento en el mapa de cobertura. De esta manera se obtuvo la información necesaria para construir la matriz de confusión y así determinar los errores de comisión y omisión, junto con las superficies correctamente clasificadas.

En las Figuras 1 a 4 a continuación, se muestran ejemplos de segmentos seleccionados en la muestra, de acuerdo a las categorías de las celdas de la matriz de confusión. En la Figura 1 se presentan ejemplos de errores de comisión. En todos los casos se muestran dos imágenes: con la capa final de Bosque Nativo y sin ella, para facilitar la visualización. Se utiliza el mismo criterio para presentar los casos de Bosque bien clasificado, en la Figura 2. Por último, en las Figuras 3 y 4 se presentan los casos de omisión y de No Bosque correctamente clasificados respectivamente.

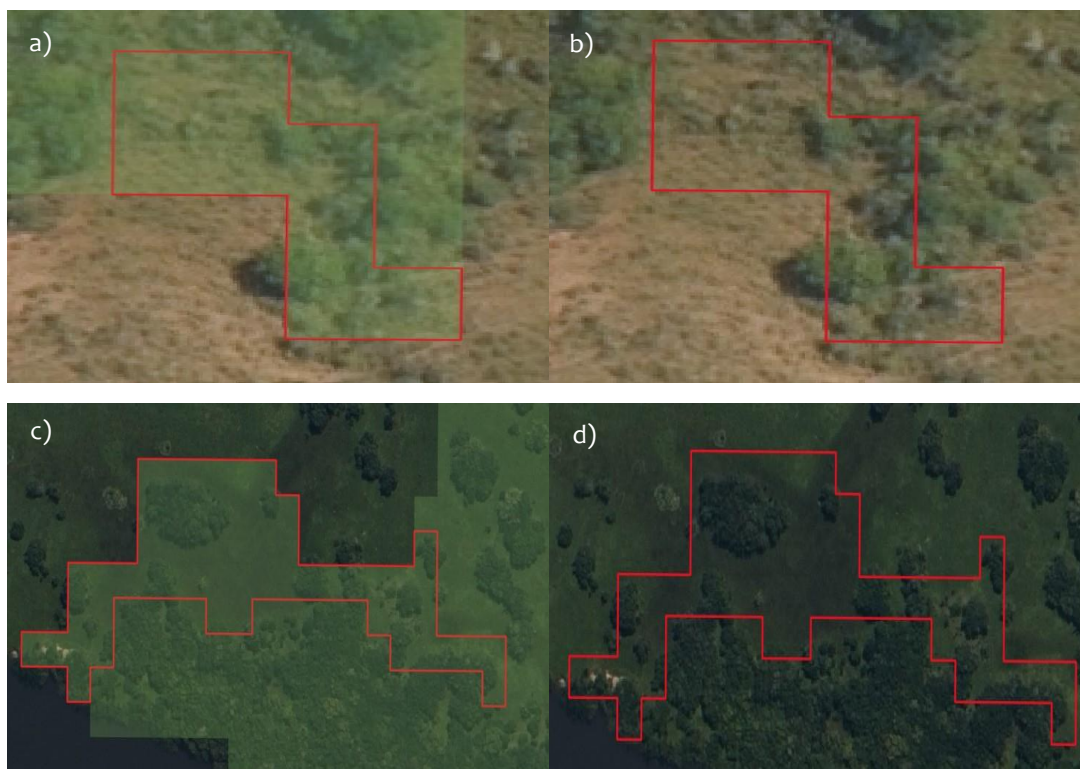


Figura 1. Ejemplos de errores de comisión (segmentos mal clasificados como Bosque nativo): a) y c) con la capa final de Bosque nativo; b) y d) sin la capa de Bosque nativo.

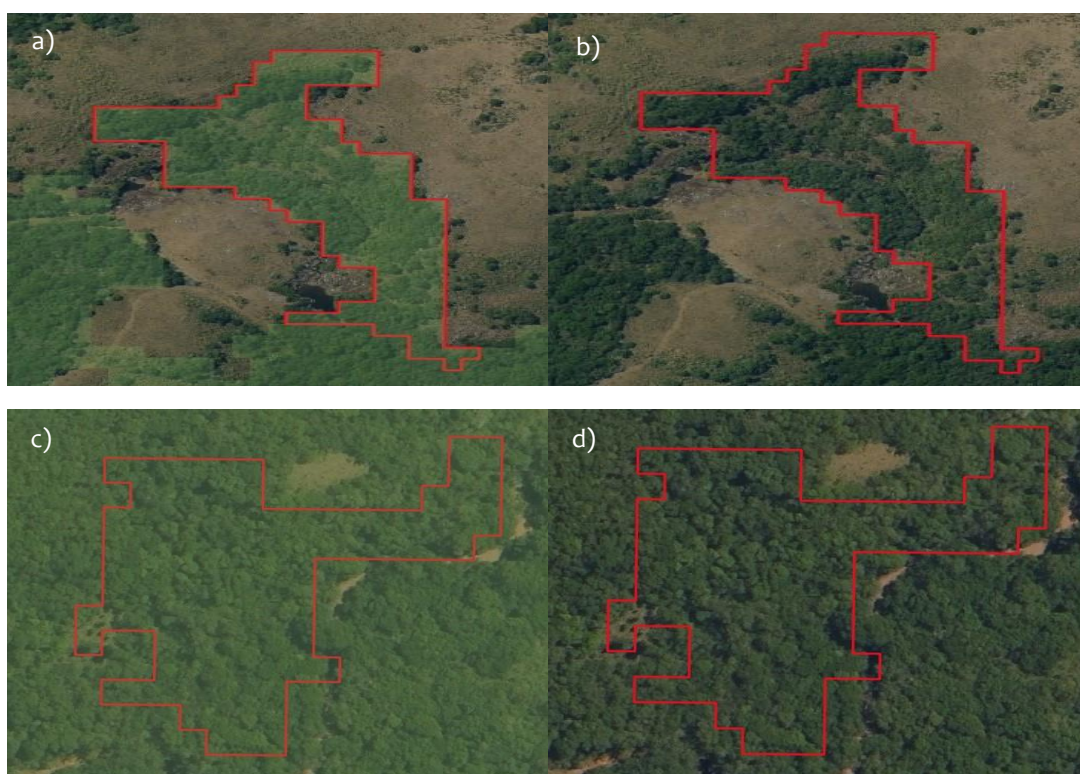


Figura 2. Ejemplos de segmentos correctamente clasificados como Bosque nativo): a) y c) con la capa final de Bosque nativo; b) y d).

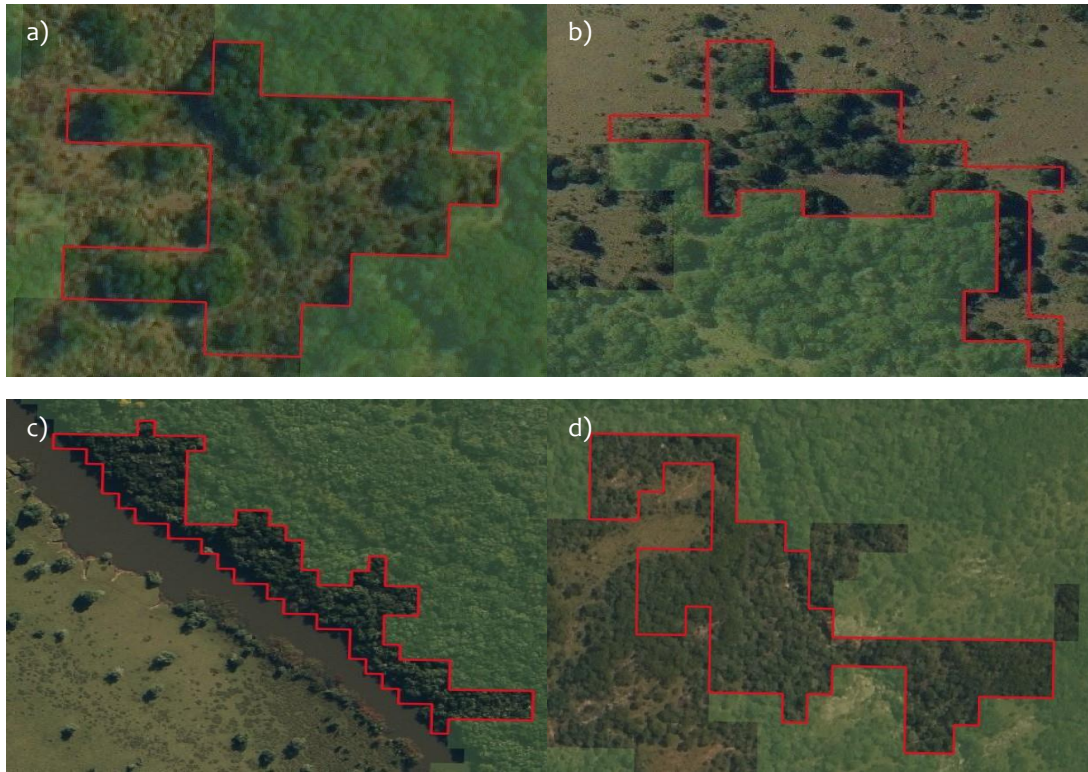


Figura 3 a), b), c) y d). Ejemplos de errores de omisión (segmentos mal clasificados como No Bosque).

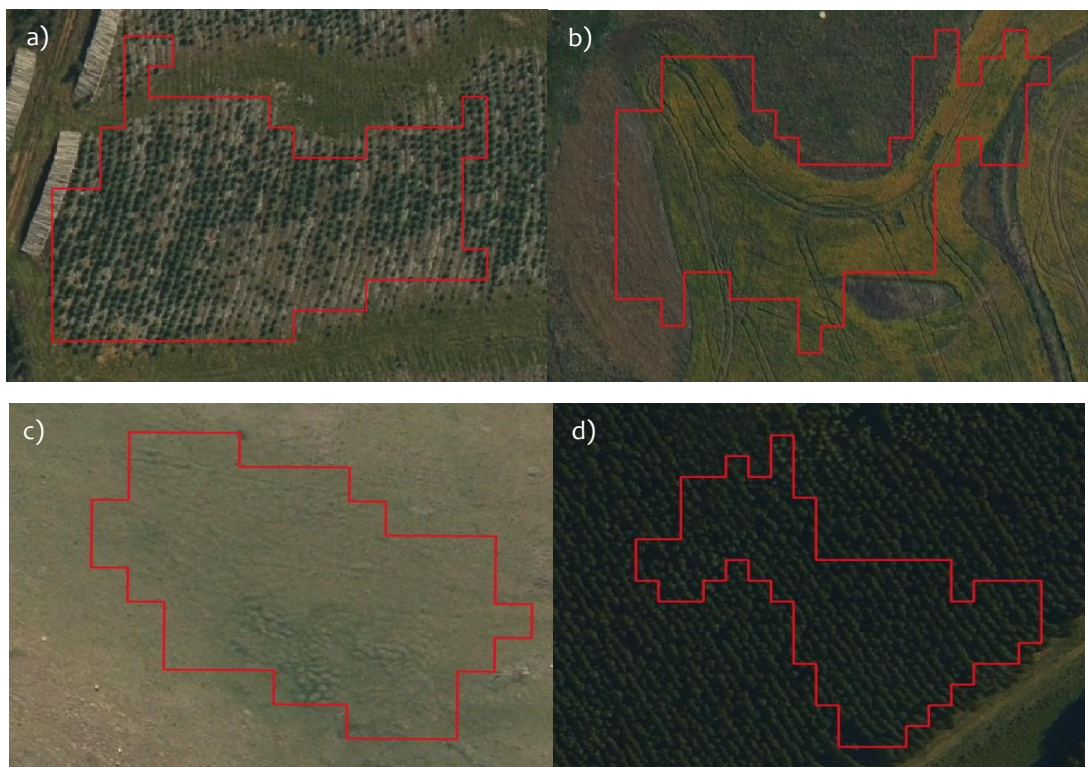


Figura 4 a), b), c) y d). Ejemplos de segmentos correctamente clasificados como No Bosque.

4. RESULTADOS

La matriz de confusión estimada, expresada en términos de superficie en hectáreas, es la siguiente:

Mapa	Referencia		
	Bosque Nativo	No Bosque	Total
Bosque Nativo	822.297	24.884	847.181
No Bosque	115.955	16.658.364	16.774.319
Total	938.252	16.683.248	17.621.500

Tabla 4: Totales estimados de superficie (en hectáreas) de acuerdo a la clasificación de la matriz de confusión

Los intervalos de confianza para las superficies asociadas a los errores de comisión y omisión y la superficie cartografiada de Bosque Nativo son:

	Inf. 95% ²	Sup. 95% ³	Error relativo
Comisión	19.817	29.949	20.36%
Omisión	81.909	150.001	29.36%
Bosque Nativo	736.021	958.340	13.2%

Tabla 5: Intervalos de Confianza para las superficies estimadas (en hectáreas) de los errores de comisión y omisión y de la superficie de Bosque Nativo cartografiada.

Exactitud Global

La exactitud global del mapa es de un 99.2% (con un intervalo de confianza al 95% de entre el 98.98% y el 99.42%), lo que conlleva a un error global del 0.8% (con un intervalo de confianza al 95% de entre 0.58% y 1.02%).

Exactitud del Usuario y Error de Comisión

	Estimación	Inf. 95%	Sup. 95%
Exactitud del Usuario	97.06%	96.35%	97.78%
Error de Comisión	2.94%	2.22%	3.65%

Tabla 6: Estimación de la exactitud del usuario y error de comisión, junto con los intervalos de confianza.

² Inf. 95% se refiere al extremo inferior del intervalo de confianza obtenido al 95%.

³ Sup. 95% se refiere al extremo superior del intervalo de confianza obtenido al 95%.

Exactitud del Productor y Error de Omisión

	Estimación	Inf. 95%	Sup. 95%
Exactitud del Productor	87.64%	84.14%	91.14%
Error de Omisión	12.36%	8.86%	15.86%

Tabla 7: Estimación de la exactitud del productor y error de omisión, junto con los intervalos de confianza.

Para el cálculo de las estimaciones y sus respectivas varianzas se utilizó la librería *survey* (Lumley, 2022) del paquete estadístico R (R Core Team, 2022).

5. BIBLIOGRAFÍA

Lumley, T. (2019) "survey: analysis of complex survey samples". R package version 3.35-1.

Olofsson P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., Wulder, M. A. (2014) *Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change*. Remote Sensing of Environment 148 42–57.

Proyecto REDD+ Uruguay (2019). Metodología y resultados de la validación del mapa de cobertura de bosque nativo de Uruguay para el año 2016 con imágenes Sentinel 2. Riaño, M.E., Bernardi, L., Boccardo, A., Miguel. C., Olivera, J., Penengo, C. y Rama, G. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca y Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. Montevideo.

R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

Särndal, C.-E., Swensson, B., & Wretman, J. (1992). *Springer series in statistics. Model assisted survey sampling*. New York, NY, US: Springer-Verlag Publishing.

Stehman, S. V. (2009). *Sampling design for accuracy assessment of land cover*. International Journal of Remote Sensing,30:20,5243 — 5272.

Strahler, A. H., Boschetti, L., Foody, G. M., Friedl, M.A., Hansen, M. C., Herold, M., et al. (2006). Global land cover validation: Recommendations for evaluation and accuracy assessment of global land cover maps. EUR 22156 EN — DG. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities (48 pp.).