

Zonas edafoclimáticas aptas para especies forestales bajo escenarios de cambio climático: un estudio de caso en Costa Rica

Cervi F., A.P.¹, P. Imbach², A. Vallejo², M. R. Tito² y C. J. Pérez²

Summary

Climate variability and climate change may cause shifts in optimal sites for competitive production of different forest tree species. This study explored the variation of current optimal soil and climatic conditions for five forest species of commercial value in Costa Rica: *Tectona grandis* L. f., *Gmelina arborea* (L.) Roxb., *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken, *Hyeronimia alchorneoides* Allemao, and *Vochysia guatemalensis* (Donn. Sm.). The study consisted of developing a tool that could be used for planning and adequate site selection considering climatic variables, actual and future under climate change scenario for year 2100. A review of bio-ecological requirements of the above species was conducted; digital maps of soil type's distribution, climate parameters, etc., were collected from national institutions. Climate scenarios were derived from the I National Communication to the UNFCCC. Interviews were conducted to obtain actual locations of current plantations of the above species. The study shows that current optimal areas for commercial plantations suffer geographical shifts under the climate change scenario used. Optimal areas for *T. grandis*, *C. alliodora* and *H. alchorneoides*, decrease by 19.5%, 13.7% and 30.8%, respectively. For *G. arborea* and *V. guatemalensis*, optima areas increase 4.5% and 21.1%, respectively. The study concludes that selection of appropriate plantation sites will require the consideration of climate change scenarios otherwise the competitiveness of timber production may be at stakes. Further efforts are needed to allocate digital positioning coordinates for forest plantation sites and trees used as seed sources. This will enable a better evaluation of the potential of current plantations and future site selection.

Key words: forest plantations, climate change, zone shifts

¹ Escuela Superior de Agricultura "Luis de Queiroz", Universidad de Sao Paulo, Brasil

² Grupo Cambio Global, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza –CATIE–, Turrialba, Costa Rica

1. Introducción

Uno de los acontecimientos globales de interés para la industria forestal es el cambio climático (CC) y la variabilidad climática (VC) (IPCC, 2001). Este está caracterizado por el aumento de la temperatura y otras modificaciones climáticas como consecuencia del aumento de las concentraciones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero en la atmósfera. El CC y la VC están aumentando la preocupación de los científicos porque los impactos se sentirán no solamente en los ecosistemas forestales naturales, sino que también en los bosques manejados. Consecuentemente, las estrategias de manejo aplicadas también deben ser ajustadas según los cambios y variaciones del clima proyectados para el territorio de interés (Lindner, Lasch & Erhard, 2000). La selección de la especie más indicada para un territorio, o viceversa, el territorio más indicado para una especie, son ejemplos de decisiones técnicas que deben considerar los escenarios futuros de cambio climático.

En América Central, Costa Rica es uno de los países con más plantaciones forestales comerciales. Como resultado de la implementación de políticas de incentivos forestales en este país, se estima que durante las últimas tres décadas, se habían reforestado alrededor de 171,000 hectáreas, siendo actualmente la actividad productiva que cobra mayor área en el país (Jiménez, 2003; Arias, 2004). Sin embargo, la productividad de las plantaciones puede ser afectada negativamente debido a que en muchos casos las plantaciones son ubicadas en zonas edafoclimáticas no aptas para la ecología de la especie. Además, se sabe que cuando las fincas son utilizadas con objetivos diferentes a sus aptitudes naturales, el resultado lleva a suelos que van perdiendo su productividad y empiezan a presentar ciertos niveles de degradación o erosión (García et al., 2000).

La zonificación edafo-climática según los requerimientos de las especies forestales de interés es el factor básico para seleccionar las zonas más indicadas para obtener mayor productividad y mejor calidad en los productos madereros. La división en zonas representa una importante herramienta para la planificación de una silvicultura técnica y económicamente viable, y esto requiere de la observación de las exigencias de la especie forestal elegida y del nivel de tecnología a ser empleado.

De acuerdo con Golfari (1963), el éxito o fracaso en el establecimiento de determinada especie en una nueva región dependerá de que las condiciones ecológicas locales satisfagan sus necesidades. Además de estos factores, se pueden mencionar todavía la plasticidad de la especie, su tiempo de adaptación o mejoramiento genético.

En una revisión de métodos para la introducción de especies forestales, la FAO (1959) señaló los factores que se combinan para el éxito en la operación de reforestación: la combinación de la precipitación, en especial de su régimen y de la duración de la estación seca; el régimen térmico y las condiciones del suelo, son determinantes para la elección de las especies más aptas para su implantación en determinada área.

Por lo tanto, este estudio busca clasificar las regiones más aptas para la reforestación con determinadas especies forestales en Costa Rica, considerando escenarios futuros de cambio climático. Se busca contribuir así, a la elaboración de estrategias de manejo forestal adaptativo. El estudio focaliza cinco especies forestales de interés comercial en Costa Rica: *Tectona grandis* L. f., *Gmelina arborea* (L.) Roxb., *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken, *Hyeronima alchorneoides* Allemao y *Vochysia guatemalensis* Donn. Sm.

2. Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es desarrollar una base cartográfica para Costa Rica que permita identificar áreas ambientalmente potenciales a la reforestación o plantación de cinco especies forestales, considerando el régimen climático actual y los escenarios de cambio climático para el país. Es importante resaltar que este estudio fue realizado en base a parámetros biofísicos, no considerando factores socioeconómicos, aunque tengan relevancia para una zonificación más detallada.

Los objetivos específicos del estudio son:

- Identificar las demandas ambientales por especie considerando parámetros edafo-climáticos y agrupar las categorías en dos clases de aptitud forestal, apta u óptima;

- Realizar encuestas a profesionales forestales con experiencia, con la finalidad de localizar los principales plantíos de estas especies forestales existentes en Costa Rica;
- Elaborar mapas delimitando las zonas con diferentes potenciales a la repoblación para las especies comerciales consideradas y apuntar las localidades donde existen plantaciones de las mismas;
- A partir de escenario de cambio climático elaborados por el Instituto Meteorológico Nacional, realizar la zonificación a través de la elaboración de mapas de zonas ambientalmente potenciales para cada una de las especies forestales consideradas.

3. Metodología

Este estudio fue realizado en Costa Rica, que posee un área de 51.450 km² y está localizada al Sur de América Central, en plena zona tropical, entre los paralelos 11° 13' 12" y 8° 02' 26" de latitud norte y los meridianos 82° 33' 44" y 85° 57' 57" de longitud oeste (MINAE-PNUMA, 2002).

Para la clasificación de las áreas ambientalmente potenciales para el cultivo de las cinco especies forestales analizadas (*Tectona grandis* L. f., *Gmelina arborea* (L.) Roxb., *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken, *Hyeronima alchorneoides* Allemao, *Vochysia guatemalensis* Donn. Sm.) en Costa Rica, un conjunto de procedimientos metodológicos fue adoptado para lograr los objetivos de este estudio.

En primer lugar, se definieron los parámetros biofísicos que serían considerados en la zonificación y que a la vez se contase con referencias bibliográficas. Los siguientes parámetros fueron seleccionados para la etapa de revisión de literatura y de estos se recopiló información digital en formato SIG: altitud (msnm), precipitación media anual, período seco, temperatura media anual, temperatura media máxima en el mes más caliente, temperatura media mínima en el mes más frío, pendiente del terreno, profundidad, textura, drenaje y pH de los suelos.

Las demandas ambientales de cada especie fueron estudiadas a partir de fuentes bibliográficas que hacen mención de las condiciones de finca adecuadas para el desarrollo de cada especie. Las informaciones obtenidas habían sido procesadas, para cada especie, a través de tablas conteniendo las amplitudes de los

respectivos parámetros edafo-climáticos y, clasificadas en dos categorías de aptitud, apta u óptima. El término “apta” se refiere a una condición ecológica en donde se puede desarrollar la especie o la plantación forestal de la misma, pero que no logra el máximo potencial. El término “optimo”, se refiere a las condiciones edafoclimáticas en las que la especie logra máximos rendimientos de volumen y calidad de la madera.

La definición de áreas aptas para el establecimiento de las plantaciones forestales se basó en la comparación de la información ambiental del territorio considerado con los datos de demanda ambiental disponibles para el conjunto de especies evaluadas. Por lo tanto, esta etapa consistió en la formación de una base de datos sobre los recursos naturales del local de estudio: geomorfología, meteorología y climatología, suelos y base cartográfica. Se utilizó ArcView para el procesamiento de la base de datos en formato SIG.

Para la zonificación de aptitud por especie, se definieron tres categorías de aptitud para cada *layer* de los parámetros edafo-climáticos considerados de acuerdo con la amplitud de aptitud de cada especie: el valor “1” se le asignó a zonas no aptas, el valor “2” a las zonas aptas y, de valor 3 a las zonas óptimas.

Para la clasificación de las fincas potenciales con relación a los suelos, primeramente se buscó información sobre los parámetros edáficos considerados en el estudio, para cada asociación de suelos presente en el mapa. A partir de esta información, se realizó una evaluación del potencial de aptitud para cada una de las especies forestales. Se utilizaron los mismos valores categóricos de no aptos (1), aptos (2) y óptimos (3). Se asignó un orden de prioridad a los parámetros edáficos en el siguiente orden: drenaje, pH, textura, profundidad y pendiente.

Los mapas de zonas de aptitud para cada especie en Costa Rica habían sido contruidos a través de la superposición de los *layers*, y consideró: a) que las áreas que presentasen limitación por cualquiera de los parámetros edafo-climáticos serían consideradas no aptas, es decir, áreas con valor 1 y serían excluidas de las zonas potenciales para la repoblación con determinada especie; b) que el grado de aptitud de las áreas restantes sería calculado a través de la suma de los valores categóricos por especie y para cada uno de los parámetros edafo-climáticos, es decir, cuanto mayor el valor de la suma de los niveles de aptitud, mayor sería el grado de potencialidad del área para la repoblación con determinada especie.

Para la ubicación de las áreas de repoblación con cada especie, se realizaron entrevistas institucionales y a expertos con la finalidad de localizar las actuales plantaciones de cada especie forestal analizada. Con base en estas informaciones se generó un mapa de áreas repobladas por especie. Esta etapa tiene la finalidad de analizar las causas y consecuencias de la actual distribución de la repoblación en Costa Rica.

Finalmente, se compararon los mapas de las zonas de aptitud por especie y el mapa actual de las plantaciones forestales, con la finalidad de determinar las áreas de posible expansión de la repoblación para cada una de las especies analizadas y lógicamente, las posibles áreas donde la producción obtendrá rendimientos indeseados por estar plantadas en fincas clasificadas como no aptas.

Para la simulación de la zonificación de zonas aptas y óptimas bajo escenarios de cambio climático, se consideró los cambios proyectados de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y precipitación media anual (mm/año), según el escenario climático IS-92c reconocido por el IPCC, considerado como un escenario moderado en cuanto a las emisiones de gases de efecto invernadero. Este escenario fue desarrollado a través del modelo de circulación global del Centro Hadley (HADCMGHG y HADCMGHS) incorporado a los modelos MAGICC y SCENGEN desarrollados por la Universidad de East Anglia del Reino Unido (IMN, 2000).

El escenario IS-92c proyecta las emisiones para el año 2100 en tres diferentes regiones de Costa Rica. Sin embargo, en este estudio se realizó un promedio entre estas regiones y se consideró que la temperatura media anual aumentaría $1,4^{\circ}\text{C}$ y la precipitación media anual disminuiría 18,82%, respecto a la precipitación de 1990 para todo el país. Se utilizó el año 2100 para utilizar los valores más altos que este escenario proyecta y así validar la utilidad del modelo edafo-climático modificado.

4. Resultados

De la revisión de diversas fuentes bibliográficas se obtuvieron los requerimientos edafo-climáticos de las cinco especies seleccionadas y se clasificaron en categorías de zonas óptimas (Cuadro 1) y zonas aptas (Cuadro 2).

Los requerimientos climáticos y edáficos para cada una de las especies están detallados en los cuadros 3.1 a 7.2. De esta revisión bibliográfica se logró obtener más referencias de requisitos edafo-climáticos de *T. grandis*, *G. arborea* y *C. alliodora*, pero relativamente poca información para *H. alchorneoides* y *V. guatemalensis*. Esto puede indicar que los resultados de zonificación serán más precisos para las especies con más referencias.

Para cada una de las cinco especies se elaboraron tres mapas a partir de la información climática de Costa Rica, el mapa de distribución de suelos y la referencia de la existencia de plantaciones (Figuras 1.1 a 5.3): a) el primer mapa muestra las zonas donde se encuentran las plantaciones según las referencias al 2006 comparado con las zonas aptas; b) el segundo mapa muestra las zonas aptas para la especie y los cantones donde hay plantaciones de la especie según las referencias de FONAFIFO a 2006; y c) un tercer mapa que ilustra la zonas aptas de la especie comparándola con la nueva zonificación obtenida a partir de la simulación con el escenario de cambio climático.

Las áreas óptimas potenciales actuales y futuras (2100) fueron traducidas a hectáreas disponibles (Cuadro 8). Bajo el escenario de cambio climático proyectado, las áreas (ha) de *T. grandis*, *C. alliodora* y *H. alchorneoides* se reducen en 19.5%, 13.7% y 30.8, respectivamente. Mientras que las áreas óptimas de *G. arborea* y *V. guatemalensis* aumentan en 4.5% y 21.1%, respectivamente. Si se considera que las referencias sobre los requerimientos edafo-climáticos son adecuadas, estos resultados indican que las áreas o zonas óptimas pueden reducirse para unas especies pero pueden aumentar para otras. De ahí la importancia de contar con información precisa sobre los requerimientos edafo-climáticos de las distintas especies de interés comercial. Como precaución respecto al total de hectáreas disponibles para cada especie, se debe considerar que en algunos casos en las áreas óptimas existen zonas urbanas o hay áreas protegidas con carácter de ley (i.e., Parques Nacionales, etc.), en donde no se puede instalar plantaciones forestales de interés comercial. Por lo tanto, algunas de las áreas o zonas óptimas se verán reducidas.

Por lo general, la comparación de las zonas aptas para las especies y la localización actual de las plantaciones, según las referencias, indica que hay correspondencia entre requerimientos edafo-climáticos y el potencial de la zona.

Las zonificaciones de aptitud proyectadas de acuerdo el escenario de cambio climático elegido mostró que las especies responden de manera distinta a estas simulaciones y que las áreas óptimas se pueden expandir o contraer. Estos resultados permiten brindar algunas recomendaciones prácticas para el manejo adaptativo de plantaciones comerciales. Una de estas prácticas es la automatización de los mapas con zonas edafo-climáticas, actuales y proyectadas, para luego, a la hora de seleccionar semillas de una especie forestal, la procedencia puede ser de zonas donde las condiciones son menos favorables a aquellas donde se instalarán las plantaciones forestales. Adicionalmente, otra medida adaptativa será la aplicación de estos escenarios por los bancos de semillas forestales para brindar recomendaciones más precisas a los interesados en aforestación o reforestación. Otra medida para el manejo adaptativo es invertir más recursos en entender aún mejor los requerimientos edafo-climáticos de las especies como *V. guatemalensis* cuyas referencias han sido escasas, al menos durante el esfuerzo realizado en este estudio. Finalmente, de estudio se desprende la importancia de la georeferenciación por medios digitales de la ubicación de las plantaciones forestales de las distintas especies.

5. Conclusiones

Este estudio ha permitido la validación de una herramienta relativamente sencilla para la zonificación edafo-climática de especies forestales. La herramienta requiere de la disponibilidad de información de calidad en cuanto a los requerimientos bio-ecológicos de las especies forestales de interés, los mapas de distribución de la calidad de suelos y topografía, además de la distribución de parámetros climáticos representativos para las distintas zonas. Estas condiciones se encontraban disponibles para este estudio. Esta herramienta podría convertirse en un instrumento de selección de zonas y para orientar mejorar la información que proveen los bancos de semilla forestal. La integración de escenarios de cambio climático en esta herramienta de zonificación brindará más elementos para una mejor planificación, tanto de la ubicación de las plantaciones comerciales futuras, como de la selección de rodales para semillas.

Para ciertas especies de interés comercial, será necesario realizar mayor inversión en investigación sobre los requerimientos edafo-climáticos, para así poder aumentar la utilidad de esta herramienta de planificación forestal.

6. Agradecimientos

Este documento ha sido elaborado mediante el apoyo financiero de la Unión Europea en el marco de la ejecución del Proyecto Bosques Tropicales y Adaptación al Cambio Climático –Trofcca-, ejecutado por CATIE en América Central, a través del convenio suscrito entre CATIE y CIFOR en Septiembre del 2005. Trofcca recibe el apoyo financiero de la Comisión Europea mediante contrato No. EuropeAid/ENV/2004-81719. El contenido de este documento bajo ninguna circunstancia refleja la posición de la Unión Europea.

7. Referencias Bibliográficas

- Arias, G. 2004. Análisis del Impacto Económico y Social de las Plantaciones Forestales en Costa Rica. FUNDECOR (Fundación para el Desarrollo de la Cordillera Volcánica Central). San José-Costa Rica. 25p. Consultado el 11 de agosto de 2006, en:
http://documentacion.sirefor.go.cr/archivo/industria/analisis_impactoecon_plfor.pdf
- Betancourt Barroso, A. 1987. Silvicultura Especial de Arboles Maderables Tropicales. Editorial Científico-Técnica. La Habana-Cuba. p. 110-120; 159-171; 342-356.
- Cordero, J. & Boshier, D. H. (eds.). 2003. Árboles de Centroamérica: un manual para extensionistas. Forestry Research Programme. Oxford Forestry Institute (OFI). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). pp. 473-476.
- Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal – CONIF-. 2002. Guía Forestal para Melina *Gmelina arborea*. Proyecto Adecuación de Instrumentos Financieros Aplicables a Plantaciones Comerciales y su Análisis de Rentabilidad. Convenio MADR-CONIF. Bogotá-Colombia. 24p.
- Delgado, A. M. 2002. Crecimiento de las plantaciones de especies nativas y su relación con la motivación de los finqueros a reforestar en la región Huetar Norte de Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Informe de Práctica de Especialidad. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago-Costa Rica. 127p.
- Echeverría, J. C.; Jobbagy, E. G.; Collado, A. D. 2006. Aptitud Forestal de la Provincia de San Luis. Convenio de Cooperación Técnica entre el INTA E.E.A., San Luis y el Gobierno de la Provincia de San Luis. 110p. Consultado el 29 de agosto de 2006, en:
http://www.inta.gov.ar/SANLUIS/info/documentos/Aptitud_forestal/Documento_s/APTITUD%20FORESTAL%20de%20San%20Luis-2006.pdf#search=%22echeverr%C3%ADa%20jobbagy%20aptitud%22

- FAO. 1959. Elección de especies arbóreas para plantación. Forestry Development Paper N°13. Roma, Italia. 375p.
- FAO. 2002. Melina (*Gmelina arborea*) in Central America by M.M. Alfaro and R.V. De Camino. Forest Plantations, Working Paper No. 20. Forest Resources Development Service, Forest Resources Division. Roma, Italia. Consultado el 21 de agosto de 2006, en:
<http://www.fao.org/docrep/005/Y7206E/y7206e00.HTM>
- Figueiredo, E. O.; Oliveira, L. C. de; Barbosa, L. K. F. 2005. Teca (*Tectona grandis* L.f.): Principais Perguntas do Futuro Empreendedor Florestal. Embrapa Acre. Documentos, 97. Rio Branco, Brasil. 87p. Consultado em 7 de agosto de 2006. Disponível em: <http://www.cpafor.embrapa.br/pdf/doc97.pdf>
- Fonseca, W. G. 2004. Manual para productores de teca (*Tectona grandis* L. f.) en Costa Rica. Heredia-Costa Rica. 121p. Consultado em 17 de agosto de 2006. Disponível em:
http://www.fonafifo.com/paginas_espanol/biblioteca_virtual/e_bv_biblioteca_virtual.htm
- García, E.; Sotomayor, A.; Silva, S.; Valdebenito, G. 2000. Establecimiento de Plantaciones Forestales. *Eucalyptus* sp. INFOR-FDI. 32 p. Consultado em 26 de agosto de 2006. Disponível em:
<http://www.agroforesteria.cl/menu/publicaciones/Manual%20Eucalipto.pdf>
- Golfari, L. 1963. Exigencias climáticas de las coníferas tropicales y subtropicales. Unasyva - No. 68. Revista internacional de silvicultura e industrias forestales - Vol. 17 (1). FAO. Consultado el 26 de agosto de 2006, en:
<http://www.fao.org/docrep/e3200s/e3200s06.htm#exigencias%20climáticas%20de%20las%20coníferas%20tropicales%20y%20subtropicales>
- Greaves, A. 1981. *Gmelina arborea*. Commonwealth Forestry Bureau. Forestry Abstracts, 42(6): 237 - 258; Traducido por ALBERTO RAMIREZ C., Ing. For.; Medellín, Enero 1992.
- IMN. 2000. Primera Comunicación Nacional Ante la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático. Gobierno de Costa Rica. Ministerio del Ambiente y Energía. 177p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change –IPCC-. 2001. Third Assessment Report. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Available at: <http://www.ipcc.ch>
- Jiménez, F.M.L. 2003. Estado de la diversidad biológica de los árboles y bosques en Costa Rica. Documentos de Trabajo: Recursos Genéticos Forestales. FGR/46S Servicio de Desarrollo de Recursos Forestales, Dirección de Recursos Forestales, FAO, Roma. (*Inédito*). 79p. Consultado el 15 de agosto de 2006, en:
<ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/007/j0601s/j0601s00.pdf>

- Krishnapillay, B. 2000. Silvicultura y ordenación de plantaciones de teca. Unasilva, No. 201. Revista internacional de silvicultura e industrias forestales. Vol. 51. FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Consultado el 16 de agosto de 2006, en: <http://www.fao.org/docrep/x4565s/x4565s00.htm>
- Lamprecht, H. 1990. Silvicultura nos trópicos: ecossistemas florestais e respectivas espécies arbóreas – possibilidades e métodos de aproveitamento sustentado. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ). Eschborn-Alemanha. p. 294-296; 272-274; 310-313.
- Liegel, L.H.; Stead, J.W. 1990. *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken. Laurel, capá prieto. En: Burns, Russell M.; Honkala, Barbara H., eds. Silvics of North America: 2. Hardwoods. Agric. Handb. 654. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service: 270-277. Consultado el 22 de agosto de 2006, en: <http://www.fs.fed.us/global/iitf/Cordiaalliodora.pdf>
- Lindner, M., Lasch, P. & Erhard, M. 2000. Alternative forest management strategies under climatic change – prospects for gap model applications in risk analyses. Silva Fennica 34(2): 101–111. Disponible en: <http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf34/sf342101.pdf>
- MINAE-PNUMA. 2002. GEO Costa Rica: una perspectiva sobre el medio ambiente. Ministerio del Ambiente y Energía, República de Costa Rica (MINAE). Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Costa Rica. Consultado el 1 de septiembre de 2006, en: <http://www.pnuma.org/dewalac/PDFs/crica02.pdf#search=%22%22costa%20rica%22%20biofisico%20latitud%22>
- Murillo, O.; Valério, J. 1991. Melina (*Gmelina arborea* Roxb.): especie de árbol de uso múltiple en América Central. Serie Técnica. Informe Técnico/CATIE. N° 181. Turrialba, CR. 72p.
- Pancel, L. 1993. Tropical Forestry Handbook. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. v.1. Berlin-Germany. pp. 600-601; 640; 617- 618.
- Pandey, D. & Brown, C. La teca: una visión global. Unasilva, No. 201. Revista internacional de silvicultura y industrias forestales. Vol. 51. FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Consultado el 16 de agosto de 2006, en: <http://www.fao.org/docrep/x4565s/x4565s00.htm>
- Rojas, F. R.; Arias, D. A.; Moya, R. R.; Meza, A. M.; Murillo, O. G.; Arguedas, M. G. 2004. Manual para Productores de melina (*Gmelina arborea*) en Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 314 p. Consultado el 8 de agosto de 2006, en: http://www.fonafifo.com/paginas_espanol/biblioteca_virtual/e_bv_biblioteca_virtual.htm
- Solís, M. C. & Moya, R. R. 2002. *Hieronyma alchorneoides* en Costa Rica. 106p. Consultado el 10 de agosto de 2006, en:

http://www.fonafifo.com/paginas_espanol/biblioteca_virtual/e_bv_biblioteca_virtual.htm

Solís, M. C. & Moya, R. R. 2002. *Vochysia guatemalensis* en Costa Rica. 107p. Consultado el 10 de agosto de 2006, en:

http://www.fonafifo.com/paginas_espanol/biblioteca_virtual/e_bv_biblioteca_virtual.htm

Vallejo, A. & Zapata, F. 2007. Árboles tropicales y subtropicales de uso múltiple. En Preparación (v. 2). CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Vázquez-Yañes, C.; Batis Muñoz, A. I.; Alcocer Silva, M. I.; Gual Díaz, M.; Sánchez Dirzo, C. 1999. Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación. Reporte técnico del proyecto J084. CONABIO - Instituto de Ecología, UNAM. p. 69-72. Consultado el 22 de agosto de 2006, en:

http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/16-borag1m.pdf#search=%22%22cordia%20alliodora%22%20especies%2069%22

Cuadros

Cuadro 1. Amplitudes de valores utilizadas en las categorías de zonas óptimas por especie.

Variables Climáticas		Especies				
		<i>T. grandis</i>	<i>G. arborea</i>	<i>C. alliodora</i>	<i>H. alchorneoides</i>	<i>V. guatemalensis</i>
Altitud	(msnm)	0 - 500	0 - 600	0 - 800	0 - 900	0 - 900
Precipitación	(mm/año)	1300 - 2500	2000 - 2500	2000 - 4000	3000 - 4000	1600 - 3200
Periodo Seco	(nº meses/año)	4 - 6	3 - 4	0 - 4	-	0 - 4
Temp. Media	(°C)	23 - 26	24 - 28	23 - 27	20 - 28	24 - 27
Temp. Media Máx.	(°C)	25 - 30	25 - >32,5	25 - 32,5	-	-
Temp. Media Mín.	(°C)	17,5 - 25	17,5 - 26	20 - 25	-	-

Fuente: elaboración propia

Cuadro 2. Amplitudes de valores utilizadas en las categorías de zonas aptas por especie.

Variables Climáticas		Especies				
		<i>T. grandis</i>	<i>G. arborea</i>	<i>C. alliodora</i>	<i>H. alchorneoides</i>	<i>V. guatemalensis</i>
Altitud	(msnm)	500 - 900	600 - 900	800 - 1400	900 - 1000	900 - 1000
Precipitación	(mm/año)	1250 - 1300	1000 - 2000	750 - 2000	2000 - 3000	3200 - 5000
Periodo Seco	(nº meses/año)	2 - 3	2; 5	5 - 6	-	-
Temp. Media	(°C)	21 - 23	21 - 24	17 - 23	-	23 - 24
		26 - 28	28 - 29	27 - 28	-	27 - 30
Temp. Média Máx.	(°C)	30 - >32,5	25 - >32,5	20 - 25	-	-
				>32,5	-	-
Temp. Média Mín.	(°C)	12,5 - 17,5	17,5 - 25	15 - 20	-	-

Fuente: elaboración propia

Cuadro 3.1. Clases de aptitud y parámetros climáticos de *T. grandis* L. f.

Parámetros climáticos	Clases	
	Apta	Óptima
Altitud (msnm)	0 ^b < Alt. < 900 ^b	0 ^a < Alt. < 500 ^a
Precipitación (mm/año)	1250 ^{bcd} < P < 3750 ^{cd} ; 3500 ^a	1300 ^a < P < 2500 ^{ab}
Período seco (meses)	3 ^{bd} < S < 6 ^f	4 ^a < S < 6 ^a
Temperatura Media (°C)	22 ^{bf} ; 21 ^e < TM < 28 ^e ; 26 ^b	23 ^a < TM < 26 ^a
Temp. Media Máxima (°C mes más caliente)	24 ^f < TMMax < 40 ^g	24 ^b < TMMax. < 30 ^b
Temp. Media Mínima (°C mes más frío)	13 ^g < TMMin < 25 ^f	18 ^b < TMMin. < 24 ^b
Temp. Máxima Absoluta (°C)	TMax.Abs < 45 ^e	38 ^a ; 39 ^c < TMax.Abs < 43 ^c
Temp. Mínima Absoluta (°C)	TMin.Abs > 2 ^e	13 ^c < TMin.Abs < 17 ^c

Referencias: ^aFonseca 2004; ^bPancel 1993; ^cPandey & Brown 2000; ^dFigueiredo et al. 2005; ^eLamprecht 1990; ^fVallejo & Zapata (s.f.); ^gKrishnapillay 2000.

Cuadro 3.2. Clases de aptitud y parámetros edáficos de *T. grandis* L. f.

Parámetros edáficos	Clases	
	Apta	Óptima
Pendiente (%)	P < 30 ^a	D < 25 ^a
Profundidad (m)	Prof. > 0.8 ^a	Prof. > 2 ^{bdf}
Textura (%)	15 ^{bd} < T < 6 ^f	15 ^{bd} < T < 30 ^{bd}
Drenaje	--	bien drenado ^{abcdeg}
pH	pH > 5 ^b	pH > 6 ^{ade} ; 6,5 ^g

Referencias: ^aFonseca 2004; ^bPancel 1993; ^cSeth & Yadav 1959, citados por Pandey & Brown 2000; ^dFigueiredo et al. 2005; ^eLamprecht 1990; ^fVallejo & Zapata (s.f.); ^gKaosa-ard (1981) citado por Krishnapillay 2000.

Cuadro 4.1. Clases de aptitud versus parámetros climáticos de *G. arborea* Roxb.

Parámetros climáticos	Clases	
	Apta	Óptima
Altitud (msnm)	0 ^{ab} < Alt. < 900 ^{ab c}	0 ^a < Alt. < 600 ^a
Precipitación (mm/año)	1000 ^{ad} < P < 3000 ^d ; 4000 ^a	2000 ^a < P < 2500 ^{a e}
Período seco (meses)	2 ^{be} < S < 4 ^{be} ; 5 ^f	3 ^a < S < 4 ^a
Temperatura Media (°C)	21 ^{beg} < TM < 28 ^{bg} ; 35 ^e	24 ^a < TM < 29 ^a
Temp. Media Máxima (°C mes más caliente)	24 ^g < TMMax < 35 ^{fg}	24 ^b < TMMax. < 35 ^b
Temp. Media Mínima (°C mes más frío)	18 ^f < TMMin < 24 ^g	18 ^b < TMMin. < 24 ^b
Temp. Máxima Absoluta (°C)	37 ^f < TMax.Abs < 48 ^f	-
Temp. Mínima Absoluta (°C)	-1 ^f < TMin.Abs < 16 ^f	-

Referencias: ^aRojas et al 2004; ^bPancel 1993 ; ^cGreaves 1981; ^dMurillo & Valerio 1991; ^eFAO 2002; ^fLamprecht 1990; ^gVallejo & Zapata (s.f.).

Cuadro 4.2. Clases de aptitud y parámetros edáficos de *G. arborea* Roxb.

Parámetros edáficos	Clases	
	Apta	Óptima
Pendiente (%)	P < 30 ^a	--
Profundidad (m)	Prof. > 0.6 ^a	Prof. > 1 ^a ; 2 ^{bcde}
Textura (%)	10 ^{abe} < T < 40 ^{abe}	15 ^c < T < 30 ^c
Drenaje	--	bien drenado ^{abcfgh}
pH	pH > 5 ^{ai}	pH > 6 ^{ag} ; 7 ^{dhe}

Referencias: ^aRojas et al 2004; ^bFAO 2002 ; ^cCONIF 2002; ^dBetancourt Barroso 1987 ; ^eMurillo & Valerio 1991; ^fGreaves 1981; ^gPancel 1993; ^hLamprecht 1990; ⁱVallejo & Zapata (s.f.).

Cuadro 5.1. Clases de aptitud versus parámetros climáticos de *C. alliodora* (Ruiz & Pav.)

Parámetros climáticos	Clases	
	Apta	Óptima
Altitud (msnm)	$0^{ab} < \text{Alt.} < 1400^a; 1500^b$	$0^a < \text{Alt.} < 700^a; 800^c$
Precipitación (mm/año)	$600^a; 750^f; 1000^b < P < 5000^a; 6000^f$	$2000^{aed} < P < 4000^e; 5000^d$
Período seco (meses)	$0^{af} < S < 6^a; 7^f$	$0^{bc} < S < 4^{bc}$
Temperatura Media (°C)	$17^f; 20^{bc} < \text{TM} < 27^{bc}; 28^f$	$23^a; 25^d < \text{TM} < 27^d$
Temp. Media Máxima (°C mes más caliente)	$20^f < \text{TMMax} < 34^f$	$26^{bc} < \text{TMMax.} < 32^{bce}$
Temp. Media Mínima (°C mes más frío)	$16^{bc} < \text{TMMin} < 25^{bc}$	$18^e; 20^f < \text{TMMin.} < 24^f$
Temp. Máxima Absoluta (°C)	--	--
Temp. Mínima Absoluta (°C)	--	--

Referencias: ^aBoshier & Cordero 2003; ^bPancel 1993; ^cLamprecht 1990; ^dLiegel & Stead 1990; ^eVázquez-Yanes 1999; ^fVallejo & Zapata (s.f.)

Cuadro 5.2. Clases de aptitud versus parámetros edáficos de *C. alliodora* (Ruiz & Pav.)

Parámetros edáficos	Clases	
	Apta	Óptima
Pendiente (%)	--	$P < 30^{cf}$
Profundidad (m)	--	$\text{Prof.} > 2^{ef}$
Textura (%)	$15^g < T < 40^g$	$15^{ad} < T < 30^{ad}$
Drenaje	--	bien drenado ^{abcdefg}
pH	$\text{pH} > 4.5^{ae}$	$\text{pH} > 6.5^a; 7^{bcfg}$

Referencias: ^aBoshier & Cordero 2003; ^bPancel 1993; ^cLamprecht 1990; ^dLiegel & Stead 1990; ^eVázquez-Yanes 1999; ^fVallejo & Zapata (s.f.); ^gBetancourt Barroso 1987

Cuadro 6.1. Clases de aptitud versus parámetros climáticos de *H. alchorneoides* Allemao

Parámetros climáticos	Clases	
	Apta	Óptima
Altitud (msnm)	$0^a < \text{Alt.} < 1000^a$	$0^a < \text{Alt.} < 900^b$
Precipitación (mm/año)	$2000^b < P < 6000^b$	$3000^a < P < 4000^a$
Período seco (meses)	--	--
Temperatura Media (°C)	$20^b < \text{TM} < 30^b$	$20^a < \text{TM} < 28^a$
Temp. Media Máxima (°C mes más caliente)	--	--
Temp. Media Mínima (°C mes más frío)	--	--
Temp. Máxima Absoluta (°C)	--	--
Temp. Mínima Absoluta (°C)	--	--

Referencias: ^aTorres et al. Citado por Solis & Moya 2002; ^bDelgado 2002.

Cuadro 6.2. Clases de aptitud versus parámetros edáficos de *H. alchorneoides* Allemao

Parámetros edáficos	Clases	
	Apta	Óptima
Pendiente (%)	planos a fuertemente ondulados ^a	--
Profundidad (m)	--	Prof. > 2 ^{ef}
Textura (%)	Arcillosa	$15^a < T < 40^a$
Drenaje	moderadamente a mal drenados	--
pH	$\text{pH} < 7^{ab}$	--

Referencias: ^aDelgado 2002; ^bSolis & Moya 2002

Cuadro 7.1. Clases de aptitud versus parámetros climáticos de *V. guatemalensis*

Parámetros climáticos	Clases	
	Apta	Óptima
Altitud (msnm)	0 ^a < Alt. < 1000 ^a	0 ^b < Alt. < 900 ^b
Precipitación (mm/año)	3000 ^b < P < 5000 ^b	1600 ^b < P < 3200 ^b
Período seco (meses)	--	--
Temperatura Media (°C)	24 ^a < TM < 30 ^a	23 ^b < TM < 27 ^b
Temp. Media Máxima (°C mes más caliente)	--	--
Temp. Media Mínima (°C mes más frío)	--	--
Temp. Máxima Absoluta (°C)	--	--
Temp. Mínima Absoluta (°C)	--	--

Referencias: ^aFlores (1993) citado por Solís & Moya 2002; ^bDelgado 2002.

Cuadro 7.2. Clases de aptitud versus parámetros edáficos de *V. guatemalensis*

Parámetros edáficos	Clases	
	Apta	Óptima
Pendiente (%)	--	--
Profundidad (m)	1 ^a < Prof. < 2 ^a	Prof. > 2 ^b
Textura (%)	0 ^a < T < 25 ^a	15 ^b < T < 30 ^b
Drenaje	moderadamente drenados a drenado ^a	
pH	5.5 ^a < pH < 6 ^a	pH < 7 ^b

Referencias: ^aArias (1992) citado por Solís & Moya 2002; ^bDelgado 2002.

Cuadro 8. Variaciones en áreas óptimas potenciales para cinco especies forestales bajo escenarios de cambio climático al año 2100

Especie forestal	Área óptima potencial actual (ha)	Área óptima potencial futura (ha)	Variación (%)
<i>T. grandis</i>	1,228,833	996,101	- 19.5
<i>G. arborea</i>	1,417,994	1,481,990	+ 4.5
<i>C. alliodora</i>	3,063,689	2,642,969	- 13.7
<i>H. alchorneoides</i>	3,176,660	2,198,499	- 30.8
<i>V. guatemalensis</i>	1,833,043	2,218,662	+ 21.1

Fuente: elaboración propia

Figuras

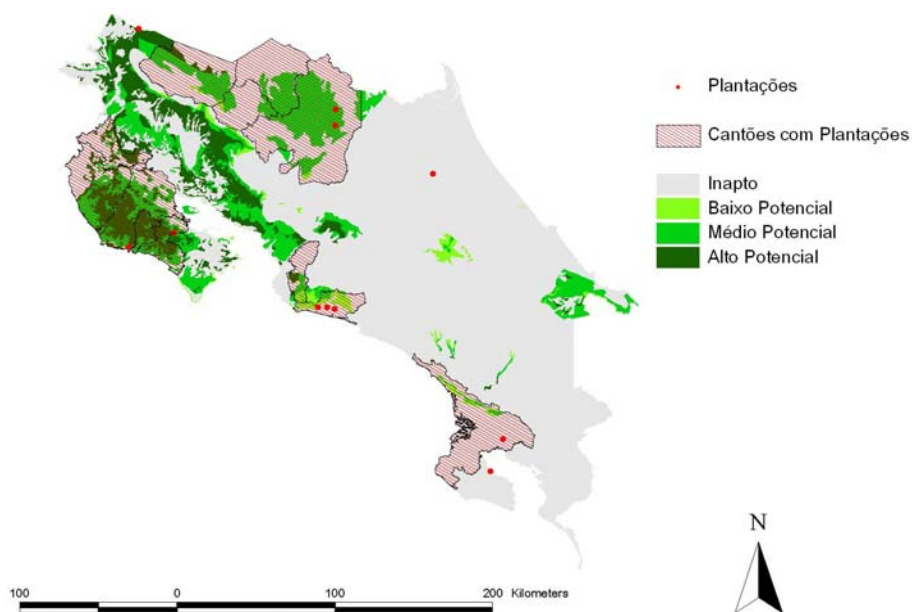


Figura 1.1 Zonas aptas para *T. grandis* y cantones donde se reportan plantaciones al 2006

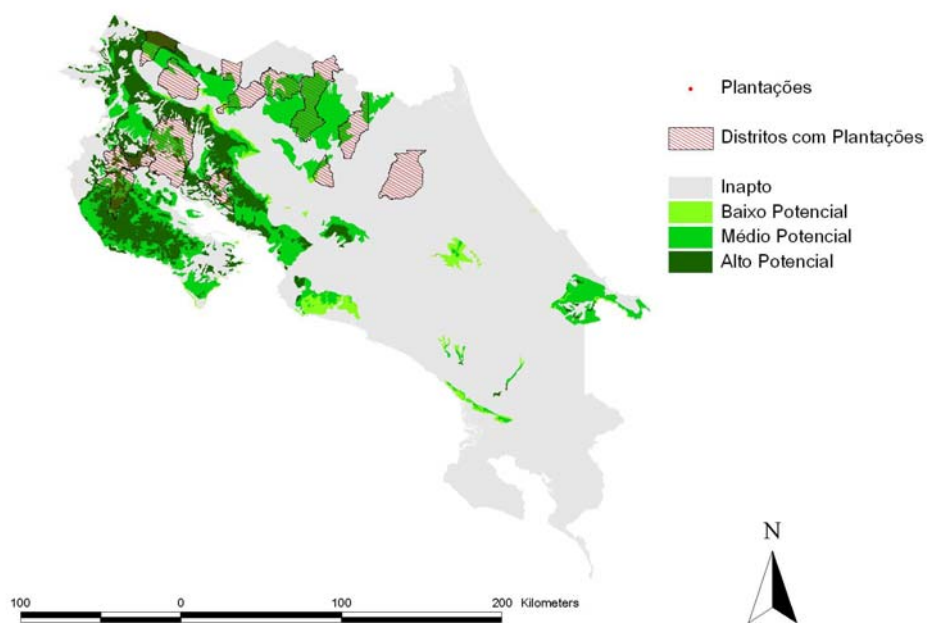


Figura 1.2. Zonas aptas y cantones donde se reportan plantaciones de *T. grandis* bajo el sistema de Pagos por Servicios Ambientales de FONAFIFO

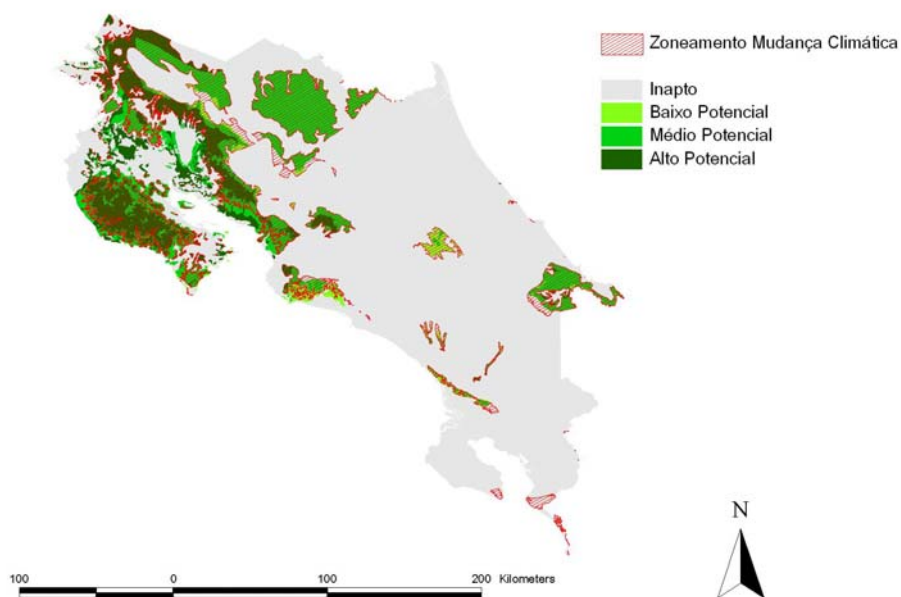


Figura 1.3. Zonas aptas para *T. grandis* bajo escenario de cambio climático

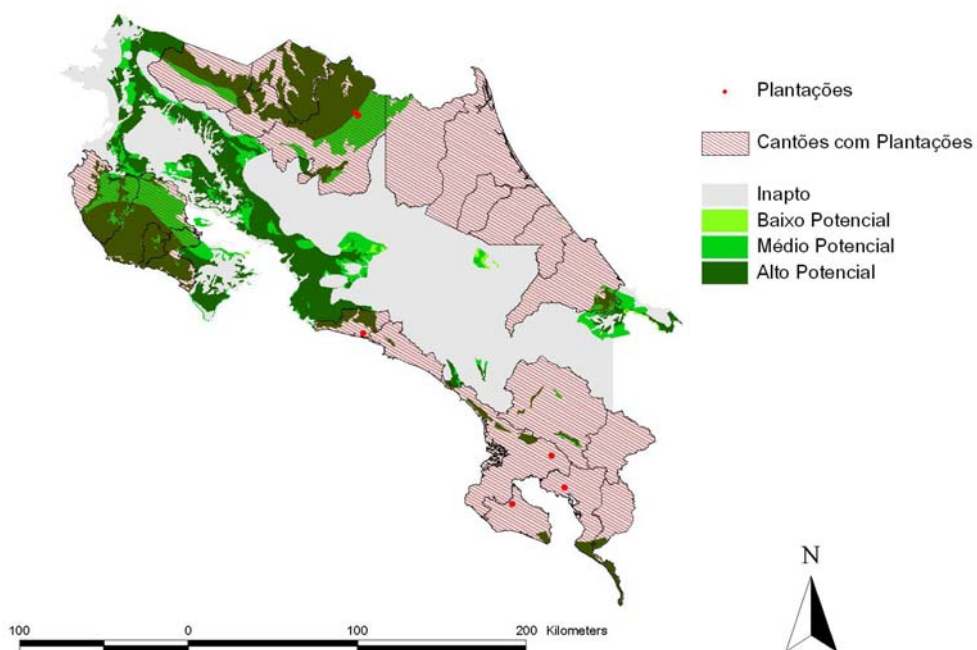


Figura 2.1. Zonas aptas para *G. arborea* y cantones donde se reportan plantaciones al 2006

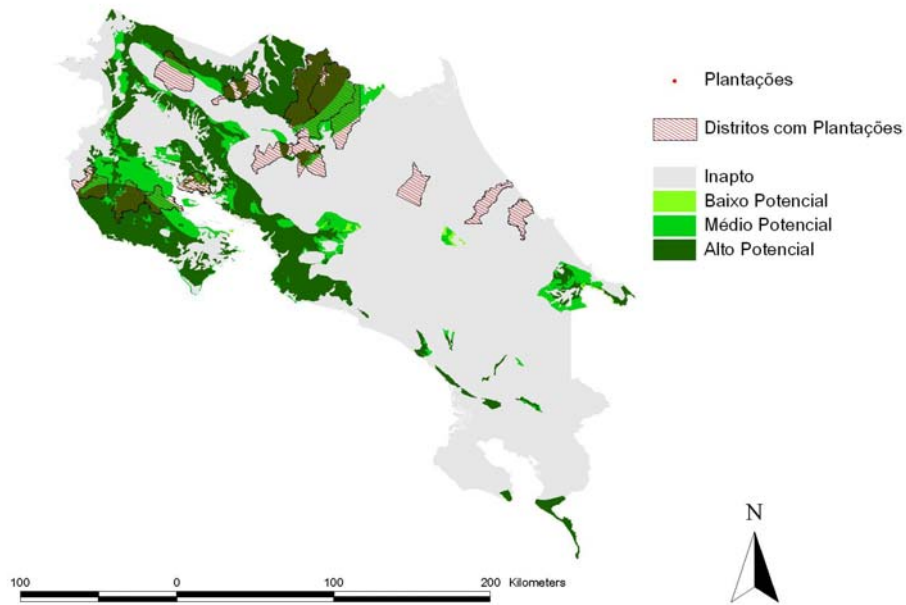


Figura 2.2. Zonas aptas y cantones donde se reportan plantaciones de *G. arborea* bajo el sistema de Pagos por Servicios Ambientales de FONAFIFO

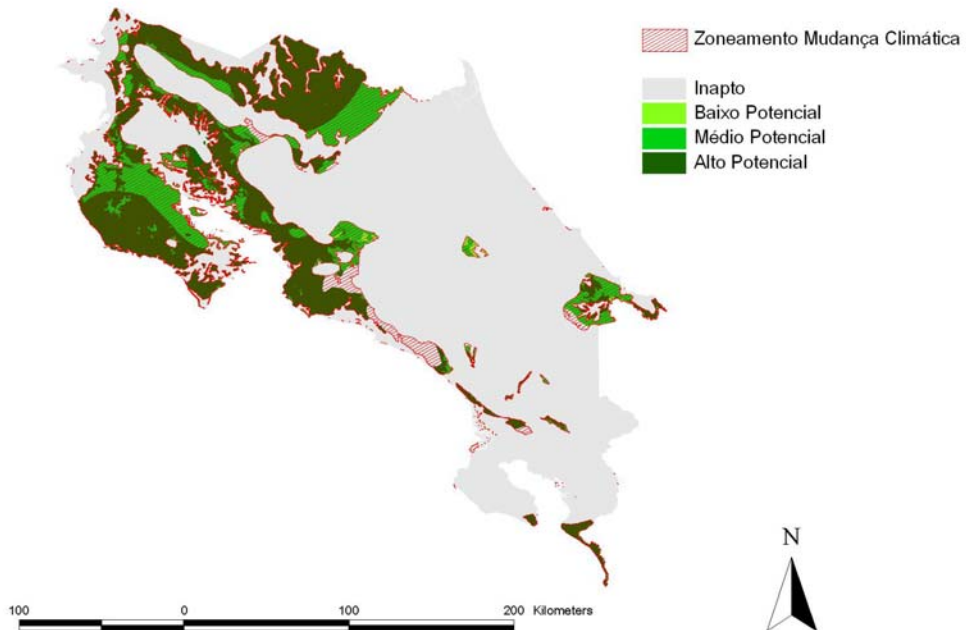


Figura 2.3. Zonas aptas para *G. arborea* bajo escenario de cambio climático

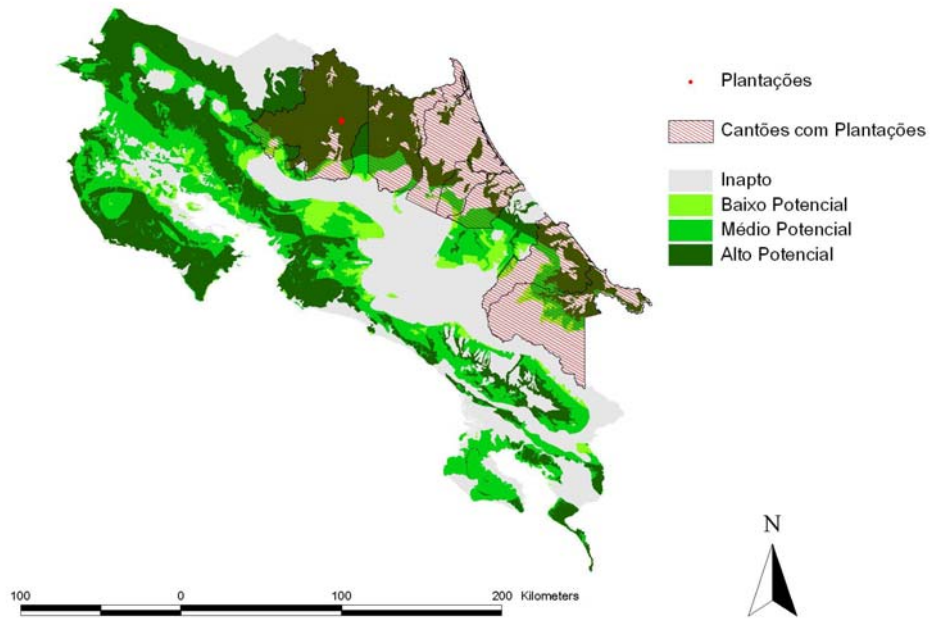


Figura 3.1. Zonas aptas para *C. alliodora* y cantones donde se reportan plantaciones al 2006

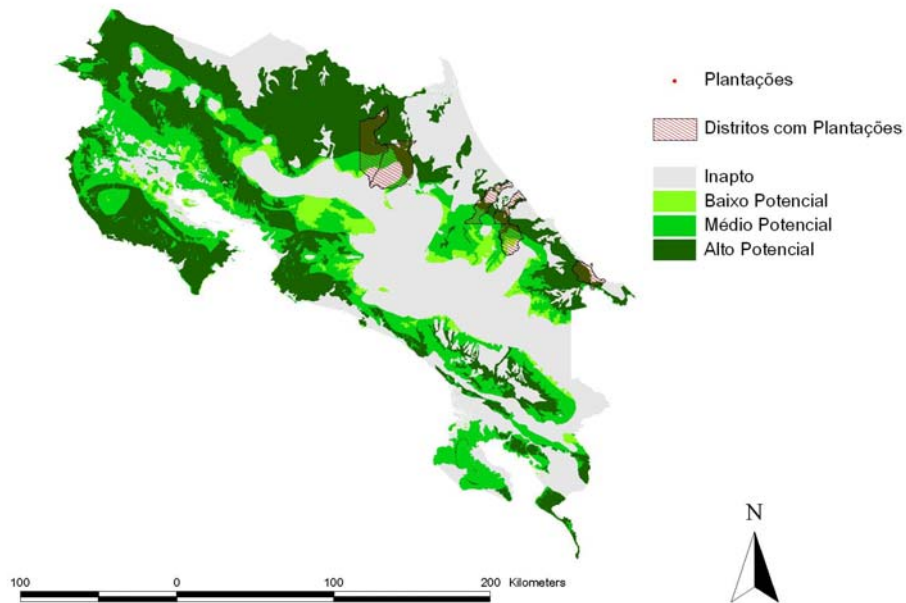


Figura 3.2. Zonas aptas y cantones donde se reportan plantaciones de *C. alliodora* bajo el sistema de Pagos por Servicios Ambientales de FONAFIFO

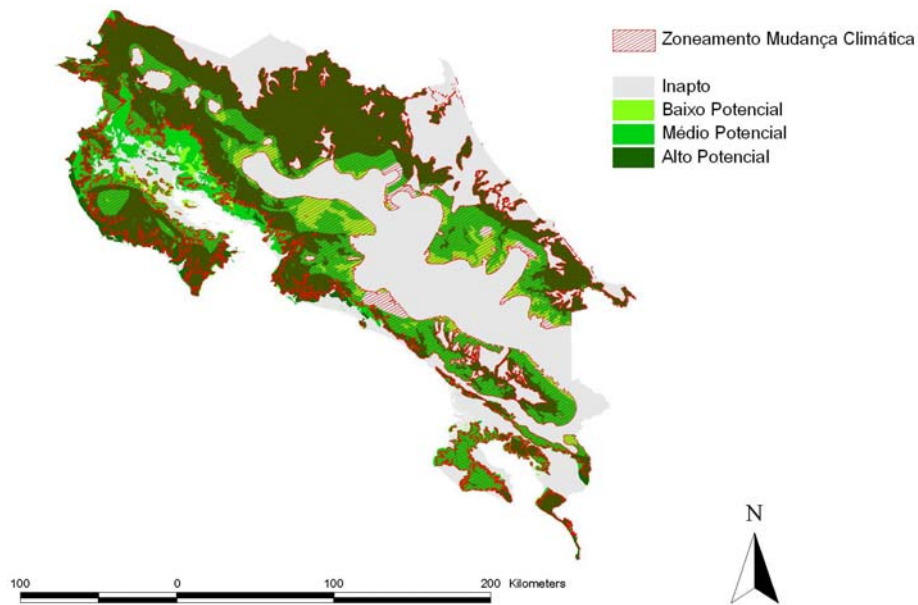


Figura 3.3. Zonas aptas para *G. arborea* bajo escenario de cambio climático

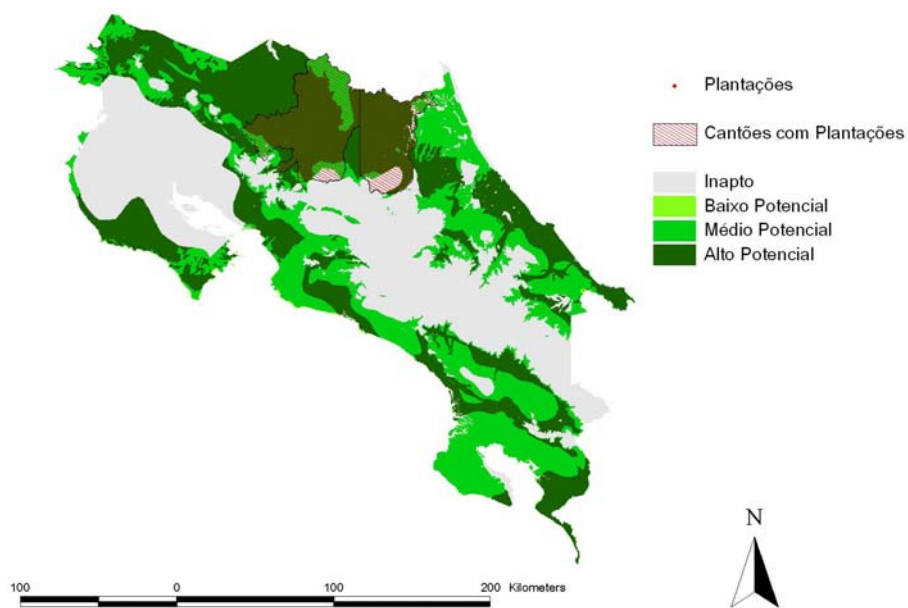


Figura 4.1. Zonas aptas para *H. alchorneoides* y cantones donde se reportan plantaciones al 2006

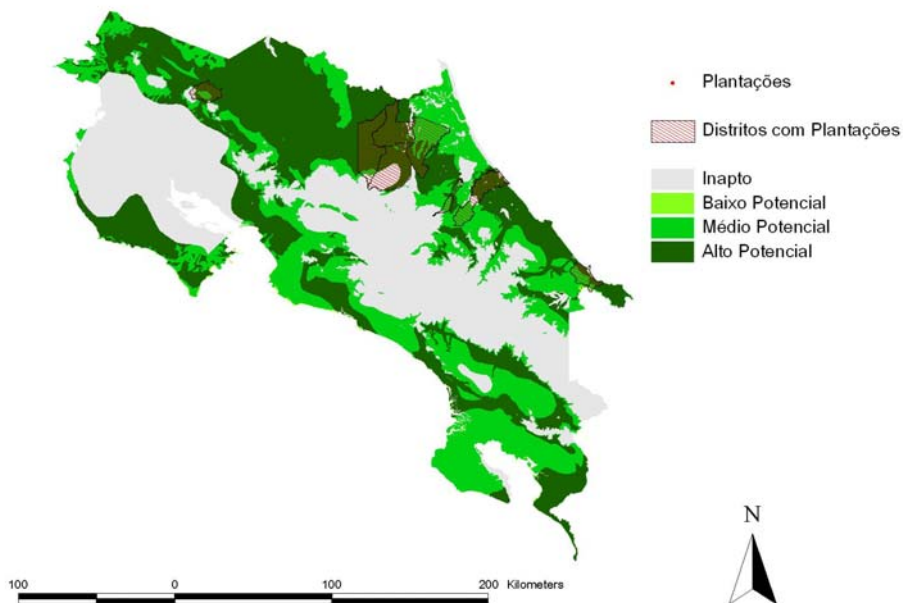


Figura 4.2. Zonas aptas y cantones donde se reportan plantaciones de *H. alchorneoides* bajo el sistema de Pagos por Servicios Ambientales de FONAFIFO

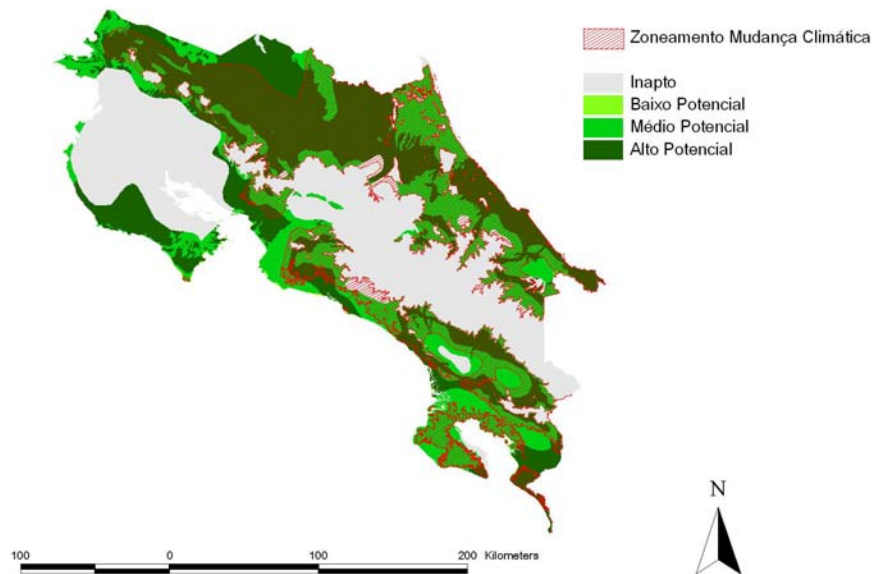


Figura 4.3. Zonas aptas para *H. alchorneoides* bajo escenario de cambio climático

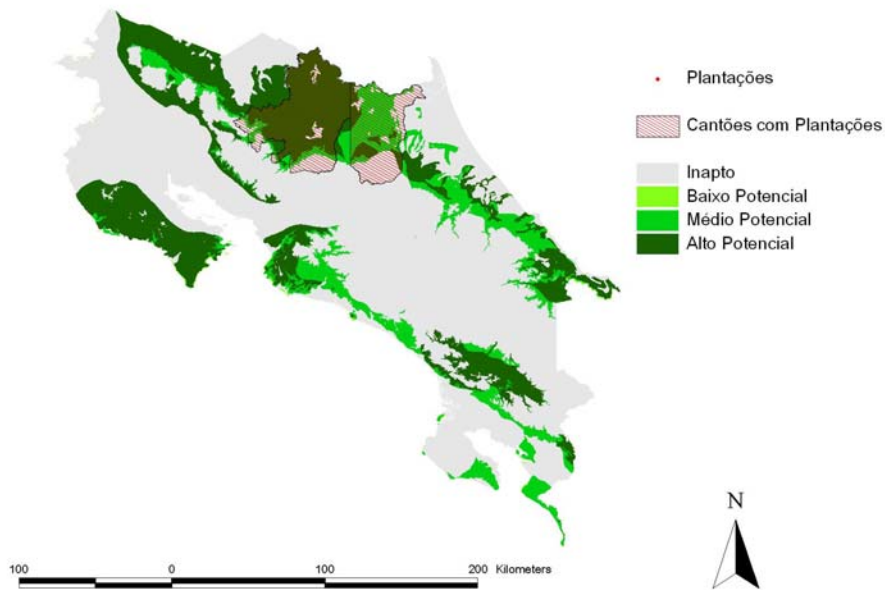


Figura 5.1. Zonas aptas para *V. guatemalensis* y cantones donde se reportan plantaciones al 2006

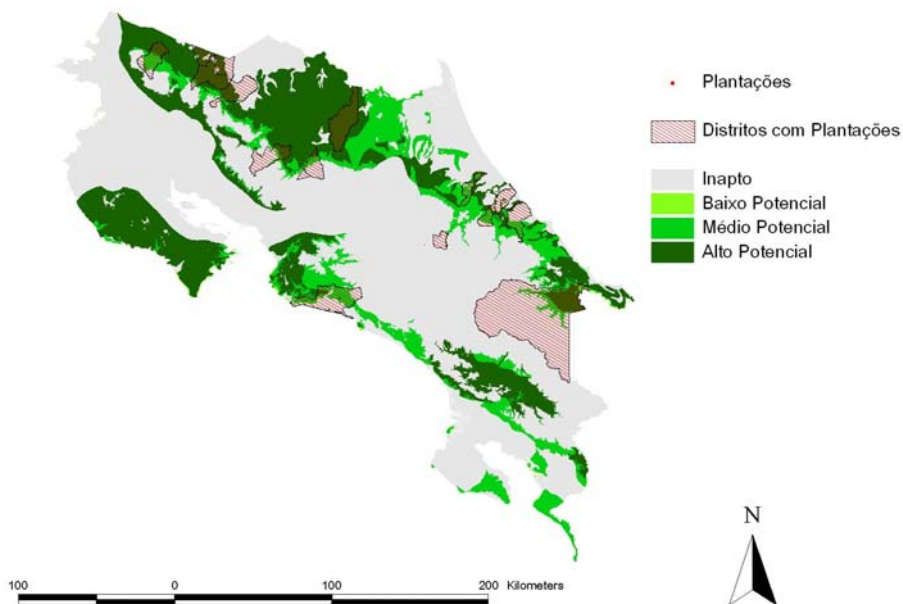


Figura 5.2. Zonas aptas y cantones donde se reportan plantaciones de *V. guatemalensis* bajo el sistema de Pagos por Servicios Ambientales de FONAFIFO

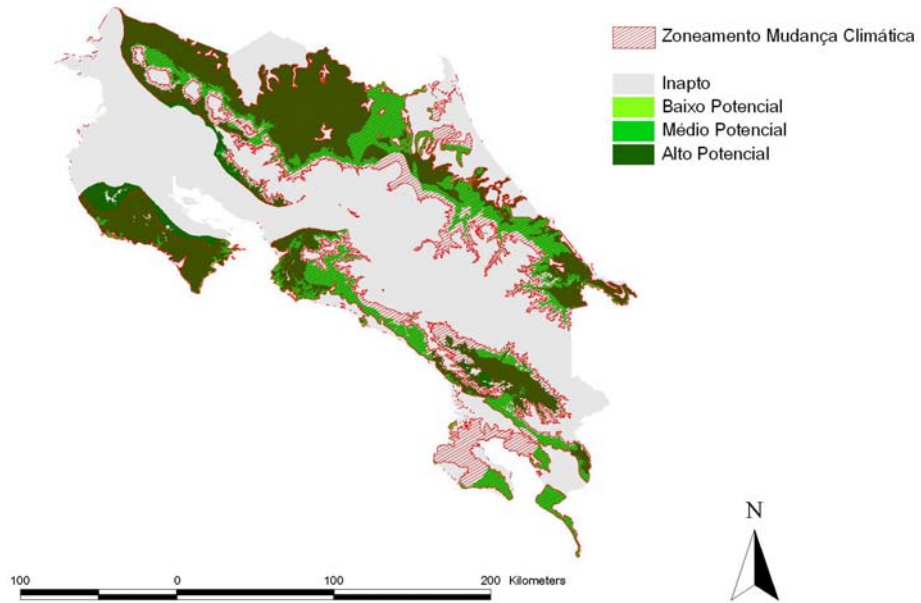


Figura 5.3. Zonas aptas para *V. guatemalensis* bajo escenario de cambio climático