



Solutions for environment and development
Soluciones para el ambiente y desarrollo

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

ESCUELA DE POSGRADO

Impactos del cambio climático en la distribución espacial de las zonas
de aptitud potencial del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*) en la
cuenca del río Reventazón, Costa Rica

por

Rique Babilonia Estrada

Tesis sometida a consideración de la Escuela de Posgrado
como requisito para optar por el grado de

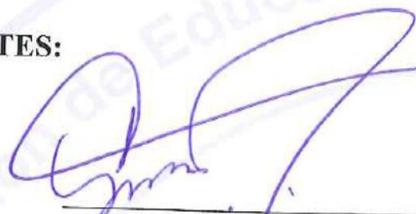
Magister Scientiae en Agricultura Ecológica

Turrialba, Costa Rica, 2011

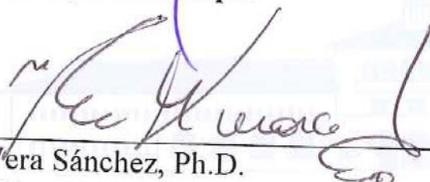
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del Estudiante como requisito parcial para optar por el grado de:

MAGISTER SCIENTIAE EN AGRICULTURA ECOLÓGICA

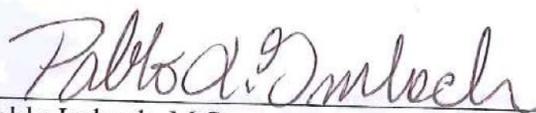
FIRMANTES:



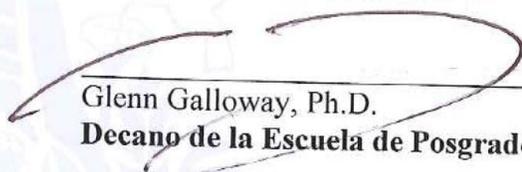
Sergio Velásquez, M.Sc.
Consejero Principal



Vera Sánchez, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Pablo Imbach, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Glenn Galloway, Ph.D.
Decano de la Escuela de Posgrado



Rique Babilonia Estrada
Candidato

DEDICATORIA

A mi santa abuela Judith, tía Ana María, tíos, tías, hermanos, primos y primas

En memoria de mi madre y hermana

Al legado de las luchas justas de los pueblos indígenas amazónicos del Perú en busca del
BIEN COMÚN

AGRADECIMIENTOS

Al Arutham, espíritu que provee de abundancia en el llano amazónico, y a la madre tierra fuente que produce vida.

A mis profesores consejeros Sergio Velásquez, Vera Sánchez Garita y Pablo Imbach, por sus consejos, comprensión y permanente apoyo.

A mi consejero principal MSc. Sergio Velásquez M., por su permanente e invaluable apoyo en la elaboración de esta propuesta. Gracias Maestro en todo sentido de la palabra.

A José Arze Borda por sus orientaciones en el uso de la metodología de evaluación de tierras de la FAO.

A Ford Foundation International Fellowships Program (IFP) por el apoyo financiero y su aporte para la construcción de una sociedad más inclusiva y justa.

A los agentes agrarios de la zona de Cartago del Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica. A los agricultores papeiros de la zona de Cartago, hombres que construyen desarrollo y patria en estas tierras.

A Fernando Carrera, y su familia por el apoyo y la confianza brindada estos años en CATIE.

A mis compañeros y compatriotas, Wilfredo, Alfredo, Fulvio, Annie, María, Sandra, Rafael, Rita, por todos sus apoyos y las ocurrencias y experiencias compartidas ¡Esa es mi gente!

A mis compañeros: Abner, Tinoco, Luis, Walker, Erick, el papá Esteban, Paco, Diana Marcela, Zanya, Jazmín y muy especial a Emilia Silva Cabral gracias por tu alegría.....!

A la gente linda de posgrado Aranjid, Jeaneth, Noyli, Martha y Alfonso. Como no agradecerle al gran Juanito por su enorme paciencia y don de servicio. Mil bendiciones a todos y todas.

Al CATIE y todos quienes allí conviven, forjadores del desarrollo agrícola en Latinoamérica. Muchas gracias y bendiciones a todos!!!!!!

BIOGRAFÍA

El autor nació en la ciudad de Iquitos conocida como la “*ciudad ecológica del mundo*” ubicada en la planicie amazónica del Perú, en el seno de una familia que cree en la justicia social y el bien común. Se graduó en la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana en la Facultad de Agronomía y obtuvo el título de Ing. Agrónomo. Trabajó fortaleciendo los derechos humanos de las comunidades indígenas y mestizas de la cuenca amazónica en actividades de incidencia política en los gobiernos de turno en temas de manejo de bosques y conflictos por contaminación de hidrocarburos. Es vicepresidente de la asociación civil Red Ambiental Loreana, asociación sin fines de lucro que busca un manejo adecuado de los recursos naturales de la Amazonía Peruana. Últimamente laboró en el Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana-IIAP, como facilitador del proyecto Modelo de Gestión Comunal de Manejo de Bosques Inundables, financiado por la Unión Europea-UE, en el Programa de Ecosistemas Terrestres-PET. En el año 2008 ganó la beca Ford Foundation International Fellowships Program-IFP en el Perú. Después de acumular experiencia profesional, en el año 2009 decidió regresar a las aulas para adquirir nuevas herramientas en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza-CATIE, al Programa de Agricultura Ecológica. Obtuvo su título en el 2011. Es defensor de un verdadero desarrollo sostenible con rostro humano donde pueda germinar la semilla del BIEN COMÚN en nuestras tierras fértiles de Latinoamérica.

CONTENIDO

| | |
|--|------|
| DEDICATORIA | II |
| AGRADECIMIENTOS | IV |
| BIOGRAFÍA..... | V |
| CONTENIDO | VI |
| RESUMEN | X |
| SUMMARY..... | XI |
| ÍNDICE DE CUADROS | XII |
| ÍNDICE DE FIGURAS | XIV |
| LISTA DE UNIDADES, ABREVIATURAS Y SIGLAS..... | XVII |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1 Objetivos del estudio | 4 |
| 1.1.1 Objetivo general..... | 4 |
| 1.1.2 Objetivos específicos | 4 |
| 1.1.3 Preguntas del estudio | 4 |
| 2. MARCO CONCEPTUAL | 5 |
| 2.1 Aptitud y cambio climático..... | 5 |
| 2.1.1 Aptitud | 5 |
| 2.1.2 Cambio climático..... | 8 |
| 2.2 Riesgo a plagas y degradación del suelo por cambio climático | 11 |
| 2.2.1 Tizón tardío..... | 11 |
| 2.2.2 Polilla guatemalteca..... | 14 |
| 2.2.3 Degradación de suelo..... | 15 |
| 2.3 Papa y cambio climático | 17 |
| 2.4 Impacto del cambio climático en la zona de aptitud..... | 21 |
| 2.4.1 Impacto biofísico | 21 |
| 2.4.2 Impacto socioeconómico | 22 |
| 2.5 Algunas medidas de mitigación al cambio climático | 24 |
| 3. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 25 |

| | | |
|---------|--|----|
| 3.1 | Localización del área de estudio | 25 |
| 3.1.1 | Descripción biofísica | 25 |
| 3.1.2 | Descripción demográfica | 27 |
| 3.1.3 | Descripción socioeconómica | 27 |
| 3.2 | Método | 28 |
| 3.2.1 | Ojetivo I: Determinación espacial de las zonas de aptitud del cultivo de la papa mediante un sistema automatizado de evaluación de tierras ALES-FAO | 30 |
| 3.2.2 | Objetio II: Determinación de los cambios en la distribución espacial de las zonas de aptitud del cultivo de la papa, bajo cambio climático..... | 40 |
| 3.2.3 | Objetivo III: Determinación de los cambios de rentabilidad actual asociados al cambio climático..... | 43 |
| 4. | RESULTADOS | 45 |
| 4.1 | Objetivo I: Determinación espacial de las zonas de aptitud del cultivo de la papa, mediante un sistema automatizado de evaluación de tierras ALES-FAO..... | 45 |
| 4.1.1 | Caracterización de las unidades cartográficas | 45 |
| 4.1.2 | Evaluación de la aptitud física actual del el cultivo de la papa | 47 |
| 4.1.2.1 | Determinación de la aptitud por variables climáticas | 47 |
| 4.1.2.2 | Determinación de la aptitud considerando la interrelación de las variables climáticas por subclases | 48 |
| 4.1.3 | Determinación en la distribución actual de las áreas con riesgo de ataque de plagas y degradación del suelo..... | 50 |
| 4.1.3.1 | Determinación de la aptitud física actual potencial considerando la interrelación de todas las variables biofísicas..... | 52 |
| 4.2 | Objetivo II: Distribución espacial de los cambios de las zonas de aptitud del cultivo de la papa bajo el modelo HadCM3 y CSIRO..... | 55 |
| 4.2.1 | Cambios en la aptitud física generados por el modelo HadCM3 bajo dos escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080 | 55 |
| 4.2.1.1 | Cambios en la aptitud física por precipitación bajo el modelo HadCM3 | 55 |
| 4.2.1.2 | Cambios en la aptitud física por temperatura máxima bajo el modelo HadCM3 | 57 |
| 4.2.1.3 | Cambios en la aptitud física por temperatura media bajo el modelo HadCM3 | 58 |
| 4.2.1.4 | Cambios en la aptitud física por temperatura mínima bajo el modelo HadCM3 | 60 |

| | |
|---|----|
| 4.2.1.5 Cambios en la aptitud climática del cultivo de papa por subclases bajo el modelo HadCM3..... | 62 |
| 4.2.1.6 Cambios en la distribución geográfica de las áreas con riesgo a “T. solanivora” bajo el modelo HadCM3..... | 64 |
| 4.2.1.7 Cambios en la distribución geográfica de las áreas con riesgo a “P. infestans” bajo el modelo HadCM3..... | 66 |
| 4.2.1.8 Cambios en la distribución geográfica de las áreas por riesgo a degradación del suelo bajo el modelo HadCM3..... | 68 |
| 4.2.1.9 Cambios en la aptitud física considerando la interrelación de todas las variables biofísicas bajo cambio climático..... | 70 |
| 4.2.2 Cambios en la aptitud física generados por el modelo CSIRO bajo dos escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080..... | 73 |
| 4.2.2.1 Cambios en la aptitud física por precipitación bajo modelo CSIRO..... | 73 |
| 4.2.2.2 Cambios en la aptitud física por temperatura máxima bajo el modelo CSIRO..... | 74 |
| 4.2.2.3 Cambios en la aptitud física por temperatura media bajo el modelo CSIRO..... | 76 |
| 4.2.2.4 Cambios en la aptitud física por temperatura mínima bajo el modelo CSIRO..... | 78 |
| 4.2.2.5 Cambios en aptitud climática del cultivo de la papa por subclases bajo el modelo CSIRO..... | 79 |
| 4.2.2.6 Cambios en la distribución geográfica de las áreas con riesgo a “T. solanivora” bajo el modelo CSIRO..... | 81 |
| 4.2.2.7 Cambios en la distribución geográfica de las áreas con riesgo a “P. infestans” bajo el modelo CSIRO..... | 83 |
| 4.2.2.8 Cambios en la distribución geográfica de las áreas con riesgo a degradación del suelo bajo el modelo CSIRO..... | 84 |
| 4.2.2.9 Cambios en la aptitud física considerando la interrelación de todas las variables biofísicas bajo cambio climático..... | 86 |
| 4.3 Resumen de las superficies por clase de aptitud bajo los modelos HadCM3 y CSIRO | 90 |
| 4.4 Cambio en los valores promedios de temperatura y precipitación en las zonas de aptitud bajo escenarios de cambio climático..... | 92 |
| 4.5 Objetivo III: Cambios en la rentabilidad económica actual bajo escenarios de cambio climático..... | 97 |
| 4.5.1 Aptitud actual por clases de Margen Bruto, bajo escenarios de cambio climático..... | 97 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.5.2 | Aptitud actual por Rendimiento bajo escenarios de cambio climático..... | 101 |
| 4.5.3 | Cambios de la aptitud económica actual en la zona productiva bajo escenarios de cambio climático..... | 105 |
| 5. | DISCUSIÓN | 110 |
| 5.1 | Sobre la evaluación de tierras con ALES | 110 |
| 5.2 | Sobre la aptitud climática bajo escenarios de cambio climático | 110 |
| 5.3 | Sobre la comparación de los escenarios de emisiones aplicados..... | 113 |
| 5.4 | Impacto en la aptitud final actual bajo escenarios de cambio climático..... | 113 |
| 5.5 | Sobre los cambios en la rentabilidad actual bajo escenarios de cambio climático..... | 114 |
| 5.6 | Algunas estrategias potenciales de mitigación y adaptación del cultivo de la papa al cambio climático..... | 116 |
| 6. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 119 |
| 6.1 | CONCLUSIONES..... | 119 |
| 6.2 | RECOMENDACIONES..... | 120 |
| 7. | Bibliografía | 122 |
| 8. | ANEXOS | 133 |

Babilonia Estrada, Rique. 2010. Impactos del cambio climático en la distribución espacial de las zonas de aptitud potencial del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*) en la cuenca del río Reventazón, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 132 p.

RESUMEN

Se evaluó el impacto del cambio climático en el desplazamiento de las zonas de aptitud del cultivo de la papa a través de la metodología de evaluación de tierras de la FAO apoyado por el software ALES, a partir de escenarios climáticos generados con dos modelos de circulación general. Mediante capas de información de suelo y clima (WorldClim) y dos escenarios de cambio climático desarrollados por los modelos HadCM3 y CSIRO con los escenarios A2 y B2 del IPCC, se generaron mapas de aptitud climática, de aptitud final por clases y subclases considerando sus limitaciones asociadas a riesgo a plagas y degradación del suelo, así como la rentabilidad actual, para la cuenca alta del río Reventazón y se modeló el cambio de las zonas de aptitud del cultivo de papa para el clima promedio futuro (2050-2080). Se determinaron dos clases de aptitud física A3 (Marginalmente Apto) y A4 (No Apto) y aptitud económica por MB, rendimiento y producción total en la zona productiva. Se encontraron MB actuales de 1962 millones de Colones y rendimientos no mayores a 23.98 tn/ha y una producción total de 754 mil tn/ha. En ambos escenarios, las zonas de aptitud física y económica sufrieron cambios en la reducción de sus áreas hacia altitudes mayores, se encontró un riesgo medio a alto de *T. solanivora*, *P. infestans* y degradación del suelo. La clase de aptitud más afectada es A3 para ambos modelos. El rendimiento es variable con el modelo HadCM3 y se mantiene igual con CSIRO respecto al escenario actual. La clase A3 presenta limitaciones por temperatura máxima, mínima, precipitación, pendiente y altitud. El modelaje de las zonas de aptitud ante escenarios de cambio climático genera información sobre el grado de sensibilidad y permite diseñar estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático.

Palabras claves: Cambio climático; Impacto climático; escenarios de emisiones; aptitud; mitigación; adaptación; modelos; zonas de aptitud; desplazamiento.

Babilonia Estrada, Rique. 2010. Climate change impacts on the spatial distribution of the zones with potential for the cultivation of potato (*Solanum tuberosum*) in the watershed of the Reventazón river in Costa Rica. Thesis MSc. Turrialba, CR. CATIE. 132 p.

SUMMARY

We evaluated the impact of climate change on the displacement of areas suitable for potato cultivation through the land evaluation methodology of the FAO-supported software ALES, based on climate scenarios generated by two general circulation models, using layers of climate and soil data (WorldClim) and two climate change scenarios developed by the CSIRO and HadCM3 models with scenarios A2 and B2 of the IPCC, generated climate suitability maps and final suitability maps by classes and subclasses considering their limitations associated with risks related to pest and degraded soils, as with the actual economic viability of the Reventazon river watershed and a model of the change in the zones with potential for the cultivation of potatoes (*Solanum tuberosum*) for projected average climate between 2050- and 2080. Two suitability classes were determined: A3 (marginally suitable) and A4 (not suitable) and the economic viability by gross margin (GM), yield and total production in the productive zone. Actual GM of 1962 million colones and yield no greater than 23.98 t/ha and total production of 754 million t/ha. In both scenarios, the physically and economically suitable zones demonstrated changes in the reduction of their areas toward higher altitude, a medium to high risk of pest (*T. solanivora*, *P. infestans*) infestation and soil degradation was found. The suitability class most affected was A3 for both models. The yield is variable with the model HadCM3 and remains the same with CSIRO when compared to the actual scenario. Class A3 presents limitations for maximum and minimum temperature and precipitation, in addition to gradient and altitude. Modeling of suitability zones based on climate change generates information on the grades of sensitivity and permits the design of strategies for the mitigation and adaptation to climate change.

Keywords: climate change, climate impact, emission scenarios, suitability, mitigation, adaptation, models, suitability areas, displacement.

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Cuadro 1. Prácticas de conservación del suelo como medidas de mitigación en la producción del cultivo de la papa | 24 |
| Cuadro 2. RUT y CAT para <i>T. solanivora</i> y <i>P. infestans</i> | 31 |
| Cuadro 3. RUT y CAT para riesgo a degradación del suelo | 31 |
| Cuadro 4. RUT y CAT por niveles de severidad para el cultivo de la papa..... | 36 |
| Cuadro 5. Esquema de un árbol de decisión por riesgo a <i>P. infestans</i> | 37 |
| Cuadro 6. Datos descriptivos de los escenarios de emisiones A2 y B2..... | 40 |
| Cuadro 7. Número de unidades cartográficas por rangos de áreas y porcentajes..... | 45 |
| Cuadro 8. Superficie por nivel aptitud climática por clases para el cultivo de la papa | 48 |
| Cuadro 9. Subclase de aptitud climática para el cultivo de la papa..... | 50 |
| Cuadro 10. Superficie por clase de aptitud climática y riesgo a plagas y degradación de suelo | 51 |
| Cuadro 11. Matriz de cambio de aptitud por precipitación, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080 | 56 |
| Cuadro 12. Matriz de cambio de aptitud por temperatura máxima, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080 | 58 |
| Cuadro 13. Matriz de cambio de aptitud por temperatura media, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080 | 60 |
| Cuadro 14. Matriz de cambio de aptitud por temperatura mínima, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080 | 62 |
| Cuadro 15. Matriz de cambio de aptitud climática por subclases, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080 | 64 |
| Cuadro 16. Matriz de cambio de aptitud por riesgo a <i>T. solanivora</i> , escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080 | 66 |
| Cuadro 17. Matriz de cambio de aptitud por riesgo a <i>P. infestans</i> , escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080 | 68 |
| Cuadro 18. Matriz de cambio de aptitud por riesgo a degradación del suelo, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080 | 70 |
| Cuadro 19. Matriz de cambios de aptitud final por clases, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080 modelo HadCM3 | 71 |

| | |
|---|-----|
| Cuadro 20. Matriz de cambio de aptitud por precipitación, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080 | 74 |
| Cuadro 21. Matriz de cambio de aptitud por temperatura máxima, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080 | 76 |
| Cuadro 22. Matriz de cambio de aptitud por temperatura media, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080 | 77 |
| Cuadro 23. Matriz de cambio de aptitud por temperatura mínima, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080 | 79 |
| Cuadro 24. Matriz de cambio de aptitud por interrelacionando las variables climáticas, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080 | 81 |
| Cuadro 25. Matriz de cambio de aptitud por T. solanivora, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080 | 82 |
| Cuadro 26. Matriz de cambio de aptitud por P. infestans, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080 | 84 |
| Cuadro 27. Matriz de cambio de aptitud por riesgo a degradación del suelo, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080 | 86 |
| Cuadro 28. Matriz de cambios de aptitud final por clases, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080 modelo CSIRO | 87 |
| Cuadro 29. Resumen de las clases de aptitud por superficie actual y de cambio bajo dos escenarios de emisiones A2 y B2 para los años 2050 y 2080..... | 90 |
| Cuadro 30. Resumen de cambios en los promedios actuales de temperatura y precipitación bajo escenarios de cambio climático | 93 |
| Cuadro 31. Resumen de las clases de aptitud por Margen Bruto condición actual bajo escenarios de cambio climático por el modelo HadCM3 | 98 |
| Cuadro 32. Resumen de las clases de aptitud por Margen Bruto condición actual bajo escenarios de cambio climático por el modelo CSIRO | 99 |
| Cuadro 33. Rendimiento actual por clases de aptitud bajo escenarios de cambio climático por el modelo HadCM3..... | 102 |
| Cuadro 34. Rendimiento actual por clases de aptitud bajo escenarios de cambio climático por el modelo CSIRO..... | 103 |
| Cuadro 35. MB y producción total en la zona productiva bajo escenarios de cambio climático..... | 107 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Mapa de ubicación de la cuenca alta del río Reventazón..... | 25 |
| Figura 2. Esquema metodológico para determinar la aptitud bajo escenarios de cambio climático..... | 29 |
| Figura 3. Esquema de funcionamiento del Sistema Automatizado de Tierras-ALES (Arze 2000)..... | 34 |
| Figura 4. Esquema de generación de mapas de aptitud a partir de ALES | 39 |
| Figura 5. Esquema de los cambios en la distribución geográfica de las zonas de aptitud..... | 42 |
| Figura 6. Mapa de las unidades cartográficas de la cuenca alta del río Reventazón | 46 |
| Figura 7. Mapas de aptitud determinadas por variables climáticas | 48 |
| Figura 8. Mapa de aptitud climática para el cultivo de la papa por subclases..... | 49 |
| Figura 9. Mapas de riesgo a plagas y degradación del suelo en las zonas de aptitud..... | 52 |
| Figura 10. Mapa de aptitud final actual potencial por sub clases | 54 |
| Figura 11. Mapa de cambios de aptitud por precipitación bajo escenarios de cambio climático..... | 55 |
| Figura 12. Mapa de cambios de aptitud por temperatura máxima bajo escenarios de cambio climático..... | 57 |
| Figura 13. Mapa de cambios de aptitud por temperatura media bajo escenarios de cambio climático..... | 59 |
| Figura 14. Mapa de cambios de aptitud por temperatura mínima bajos escenarios de cambio climático..... | 61 |
| Figura 15. Mapa de subclases de aptitud climática bajo escenarios de cambio climático..... | 63 |
| Figura 16. Mapa de riesgo por T. solanivora en las zonas de aptitud bajo escenarios de cambio climático..... | 65 |
| Figura 17. Mapa de riesgos por P. infestans en las zonas de aptitud bajo escenarios de cambio climático..... | 67 |
| Figura 18. Mapa de riesgos por degradación del suelo en las zonas de aptitud | 69 |

| | |
|---|----|
| Figura 19. Mapa de aptitud final por clases bajo escenarios de cambio climático para el modelo HadCM3..... | 71 |
| Figura 20. Mapa de aptitud final por subclases bajo escenarios de cambio climático para el modelo HadCM3..... | 72 |
| Figura 21. Mapa de cambios de aptitud por precipitación bajo escenarios de cambio climático..... | 73 |
| Figura 22. Mapa de cambios de aptitud por temperatura máxima bajo escenarios de cambio climático..... | 75 |
| Figura 23. Mapa de cambios de aptitud por temperatura media bajo escenarios de cambio climático..... | 77 |
| Figura 24. Mapa de cambios de aptitud por temperatura mínima bajo escenarios de cambio climático..... | 78 |
| Figura 25. Mapa de subclases de aptitud climática bajo escenarios de cambio climático..... | 80 |
| Figura 26 Mapa de riesgo por <i>Tecia solanivora</i> en las zonas de aptitud bajo escenarios de cambio climático..... | 82 |
| Figura 27. Mapa de riesgo por <i>P. infestans</i> en las zonas de aptitud bajo escenarios de cambio climático..... | 83 |
| Figura 28 Mapa de riesgo por degradación del suelo en las zonas de aptitud bajo escenarios de cambio climático..... | 85 |
| Figura 29. Mapa de aptitud final por clases bajo escenarios de cambio climático para el modelo CSIRO. | 87 |
| Figura 30 Mapa de aptitud final por subclases bajo escenarios de cambio climático para el modelo CSIRO..... | 89 |
| Figura 31 Cambios en superficie por clases de aptitud para <i>S. tuberosum</i> en condiciones actuales bajo escenarios de cambio climático modelo HadCM3 y CSIRO..... | 91 |
| Figura 32. Porcentaje de cambio neto en la superficie en las zonas de aptitud, para cada uno de los escenarios A2 y B2 para los modelos HadCM3 y CSIRO..... | 92 |
| Figura 33. Valores promedios de temperatura y precipitación actuales y de cambio generados por los modelos HadCM3 y CSIRO | 94 |
| Figura 34. Valores promedios de temperatura y precipitación actuales y de cambio generados por los modelos HadCM3 y CSIRO | 95 |

| | |
|--|-----|
| Figura 35. Valores promedios de temperaturas actuales y de cambio generados por los modelos HadCM3 y CSIRO..... | 96 |
| Figura 36. Mapa de aptitud económica actual potencial por Margen Bruto..... | 97 |
| Figura 37. Cambios en el Margen Bruto actual bajo escenarios de cambio climático para el modelo HadCM3 y CSIRO..... | 100 |
| Figura 38. Mapa de aptitud económica actual potencial por Rendimiento | 101 |
| Figura 39. Cambios en el Rendimiento actual bajo escenarios de cambio climático para el modelo HadCM3y CSIRO..... | 104 |
| Figura 40. Cambios en los rendimientos actuales bajo escenarios de cambio climático para los modelos HadCM3 y CSIRO | 105 |
| Figura 41. Cambios en el Margen Bruto y Producción actual potencial en la zona productiva, bajo escenarios de cambio climático para el modelo HadCM3 y CSIRO | 108 |
| Figura 42. Cambios en la producción actual en la zona productiva, bajo escenarios de cambio climático para el modelo HadCM3 y CSIRO | 109 |

LISTA DE UNIDADES, ABREVIATURAS Y SIGLAS

ALES: Sistema Automatizado de Evaluación de Tierras
CATIE: Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza
CEPAL: Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CIP: Centro Internacional de la Papa
CMCC: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático
FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación
GEI: Gases de efecto invernadero
ICE: Instituto Costarricense de Electricidad
IAM: Modelo de Evaluación Integral
IMN: Instituto Meteorológico Nacional
MCG: Modelo de Circulación General
MCR: Modelo de Circulación Regional
INTA: Instituto Nacional de Tecnología Agraria
IPCC: Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
MB: Margen Bruto
MAG: Ministerio de Agricultura y Ganadería
OMM: Organización Meteorológica Mundial
ONU: Organización de las Naciones Unidas
PBI: Producto Bruto Interno
PREVDA: Programa de Reducción de la Vulnerabilidad y Degradación Ambiental
PNUD: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
SIG: Sistemas de Información Geográfica
CAT: Características de la Tierra
CUT: Cualidades de la Tierra
RUT: Requerimientos de la Tierra
RBC: Relación Beneficio Costo
TUT: Tipo de utilización de la Tierra
SEPSA: Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuario

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es actualmente una de las mayores preocupaciones de la humanidad dadas las enormes repercusiones que tiene para la sostenibilidad futura de su desarrollo (Stott et al. 2004). Según el IPCC (2007) señala que el cambio climático es un cambio en el estado promedio del clima, a lo largo del tiempo, generalmente cifrado en decenios o en períodos más largos debido a la variabilidad natural o consecuencia de la actividad humana. Este concepto difiere del utilizado en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC) en donde se entiende por cambio climático, como un cambio atribuible de manera directa o indirecta a actividades humanas, que altera la composición de la atmósfera mundial y que viene a sumarse a la variabilidad climática natural observada en períodos de tiempos comparables (ONU 1992).

El cambio climático hoy en día es un tema de gran importancia para los científicos y decisores de políticas a nivel mundial, actualmente diversos estudios han podido comprobar, aumentos en la temperatura de 0.6 ± 0.2 °C desde 1900, y es probable que la temperatura media global aumentará entre 1.4 y 5.8 °C durante el período de 1990 a 2100 (Houghton *et al.*; 2001). Estos cambios pueden llegar a modificar procesos ecológicos y la distribución geográfica de las especies (Karl y Trenberth 2005, Begon *et ál.* 2006), la causa de estos cambios es el aumento de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera desde los tiempos preindustriales desde 280 ppm a 365 ppm actualmente (IPCC 1996), constituyendo una repercusión directa, en las variables climáticas claves como precipitación y temperatura, las cuales afectarán e impactarán severamente a la producción agrícola (Cline 2007). Estos cambios en el clima sobre la producción de los cultivos varía ampliamente de una región a otra (Parry et al. 2004), teniendo en cuenta un conjunto de factores biológicos y socioeconómicos (Sauri 2007; Savé et al. 2007).

Estudios realizados por Watson (1997) señalan que los principales efectos directos del cambio climático sobre los cultivos, serían principalmente la duración de los ciclos, alteraciones fisiológicas por exposición a temperaturas fuera del umbral permitido, deficiencias hídricas y respuestas a nuevas concentraciones de CO₂ atmosférico. Algunos efectos indirectos de los posibles cambios se producirían en las poblaciones de parásitos, plagas y enfermedades (migración, concentración, flujos poblacionales, incidencias, etc.)

planificación agrícola (fechas de siembra, laboreo, mercado, aumento de aplicación de insumos y pesticidas, etc.), disponibilidad de nutrientes en el suelo, riesgo a erosión y alteración en la aptitud de los cultivos (Porter 1991, Watson 1997). Uno de los cultivos de mayor importancia en el mundo que actualmente está siendo impactado por estos cambios, es el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*) (Hijmans et al 2003). Se considera a la papa como el cuarto cultivo en importancia, después del arroz, el trigo y el maíz; y es una fuente de ingresos para muchos agricultores pequeños en Latinoamérica (InforResources 2008). Hoy en día los agricultores se han visto obligados adaptarse a nuevas condiciones climáticas, así como a eventos extremos atribuidos al cambio climático global.

Actualmente diversos estudios han podido comprobar que la papa se cultiva en muchos entornos diferentes, pero se adapta mejor a climas templados (Haverkort 1990). Aunque también podría ser cultivada en cualquier mes en que la temperatura mínima fuera superior a 5 °C, teniendo alto riesgos a heladas a temperaturas inferiores a 5 °C (Hijmans et al. 2003).

Con temperaturas promedio superiores a 20 °C la tuberización disminuye (Stol et al, 1991), sumado a estos impactos la papa presenta limitaciones biológicas como el tizón tardío causado por *Phytophthora infestans* (Mont) y la polilla guatemalteca *Tecia solanivora* (Povolny) que afecta al cultivo de la papa a escala mundial, causando significativas pérdidas de rendimiento (Mantecon 2002), y desplazamiento del cultivo a zonas de altitud superiores donde la plaga tenga impactos mínimos en el rendimiento (Hijmans et al 2003).

Costa Rica no es ajena a estas aseveraciones, y es posible que estos impactos repercutan en la productividad del cultivo de la papa que es uno de los más importantes en la dieta de los costarricenses y ocupa un lugar fundamental en la canasta básica. En Costa Rica se consumen alrededor de 5000 toneladas métricas de papa por mes, lo que coloca a este cultivo en el tercer producto de mayor importancia nacional en lo que a seguridad alimentaria se refiere (MAG 2007). En Costa Rica, este cultivo está adaptado a temperaturas que oscilan entre 7 °C y 20 °C y una cantidad promedio de precipitación que oscila de los 1400 mm a los 2600 mm/año y altitudes que van desde 1200 msnm a 3400 msnm. (MAG 2007). Bajo estas condiciones ambientales que presenta Costa Rica, este tubérculo está expuesto a una serie de organismos (insectos, hongos, bacterias, etc.) que pueden ser de difícil control y como

resultado reducir los rendimientos e incrementar los costos de producción. Hay pocas investigaciones que se han desarrollado con respecto al impacto del cambio climático sobre el cultivo de la papa en Costa Rica.

Actualmente una de las herramientas científicas disponibles para simular y cuantificar la respuesta del sistema climático es utilizar escenarios climáticos futuristas, derivados de los modelos de circulación general de la atmósfera (MCG) (Giorgi 2005).

La mayoría de estudios realizados no consideran los impactos del cambio climáticos desde la perspectiva de la aptitud del suelo. Por tanto surge la necesidad de incorporar en el estudio de los impactos del cambio climático sobre la papa, modelos que puedan determinar las zonas potenciales de aptitud de los cultivos y sus posibles variaciones climáticas. En este sentido el objetivo del presente estudio fue determinar los impactos del cambio climático en la distribución espacial de las zonas de aptitud del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*) y riesgo a plagas y degradación de suelos en la cuenca del río Reventazón, Costa Rica.

Finalmente el estudio plantea aportar conocimiento científico innovador, integrando metodologías como el Sistema Automatizado de Evaluación de Tierras-ALES-FAO lo cual determinará las zonas de aptitud potencial de la papa, apoyado por los Sistemas de información geográfica-SIG y modelos climáticos. Como resultado se tendrá una zonificación de las tierras agrícolas óptimas actuales, su potencial socioeconómico asociado al riesgo de plagas y degradación del suelo. A su vez se generarán escenarios de cambio de aptitud biofísica y económica de la papa generados por los modelos de cambio climático.

El presente estudio representa un aporte fundamental para la toma de decisiones en las futuras planificaciones agrícolas, ya que consiste en el primer esfuerzo enfocado en los impactos del cambio climático sobre la agricultura desde la perspectiva de la aptitud.

1.1 Objetivos del estudio

1.1.1 Objetivo general

Contribuir al conocimiento de los impactos del cambio climático sobre la producción agrícola del cultivo de la papa y su riesgo a plagas y erosión del suelo.

1.1.2 Objetivos específicos

- Determinar las áreas de aptitud física productiva del cultivo de la papa y su riesgo a plagas y degradación del suelo bajo condiciones promedio actuales.
- Determinar los posibles cambios en distribución geográfica de las zonas de aptitud del cultivo de la papa, bajo dos modelos de cambio climático y dos escenarios de emisiones.
- Determinar los cambios de rentabilidad económica asociados al cambio climático.

1.1.3 Preguntas del estudio

- 1) ¿Cuáles son las zonas de aptitud física productiva actual del cultivo de la papa y su riesgo a plagas y degradación del suelo en la zona de estudio?
- 2) ¿Cómo va a cambiar la distribución geográfica de las zonas de aptitud del cultivo de la papa bajo escenarios de cambio climático?
- 3) ¿Cuáles son los efectos del cambio climático en la rentabilidad económica de las zonas de aptitud del cultivo de la papa?

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Aptitud y cambio climático

2.1.1 Aptitud

A lo largo de la literatura científica respecto al término “aptitud” se tiene una serie de definiciones donde una primera distinción según la FAO (1985) indica que es la capacidad de un tipo de tierra para una clase específica de utilización de la tierra.

En términos más específicos, la aptitud es considerada como una vocación, que es el grado en que una unidad de tierra reúne los requisitos particulares de una forma particular de uso. La aptitud o vocación debe ser evaluada para cada uso de suelo relevante (agrícola, forestal, paisaje, etc.) (Hermosillo 2007).

Por otra parte en estudios realizados por Avellaneda (2007); Brockman (1986); García *et al* (2002); Jiménez *et al* (2003); Zevallos *et al* (2003) mencionan que aptitud es la capacidad o vocación de producción de una unidad de tierra o paisaje, para un tipo de uso y manejo, considerando las limitaciones y potencialidades de los suelos, hidrológicas, morfológicas o topográficas, climáticas, de cobertura vegetal y riqueza biológica.

Un concepto más amplio es el que indica que la aptitud no solamente incluye el factor suelo, involucra también condiciones agroclimáticos, sociales y económicos para determinar las clases o niveles de aptitud de un ecosistema (FAO 2010). Por tanto la aptitud es sujeto de un proceso de evaluación para determinar sus niveles de aptitud de uno o varios tipos de usos específicos de la tierra (Rossiter 1998).

Actualmente existen diferentes métodos de evaluación para establecer la aptitud de tierras, desde muy generales a muy específicos, con diferentes enfoques entre los que encontramos: **1.** Métodos de evaluación cualitativa (clasificación de las tierras por su capacidad de uso y el esquema de evaluación de tierras según la FAO), **2.** Métodos paramétricos (Índice de Storie o índice de la tierra e índice de Pierce), **3.** Métodos de evaluación cuantitativa (Sistema automatizado de evaluación de tierras-ALES) (FAO 2003).

Para fines del presente estudio se asumirá la metodología de evaluación de tierras, según la Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la Alimentación (FAO). Por tanto podemos, la evaluación de tierras es específica porque agrupa las tierras de acuerdo a su aptitud para sostener determinados tipos de utilización de la tierra ¹(TUT). Cada TUT implica una combinación particular de productos, tecnologías, condiciones físicas y socioeconómicas (FAO 1985). Así también, tiene sus propios requerimientos agroecológicos, de acuerdo a las especies vegetales que le son características, así como requerimientos particulares de manejo y de conservación de suelos (FAO 1985).

Según Vallejo (1997) el principio fundamental de este esquema de evaluación de tierras, es la comparación entre la oferta de los recursos biofísicos y económicos de la tierra, con la demanda de los mismos, para diferentes usos alternativos. Por su parte, Camas (1995) menciona que el resultado de la evaluación de tierras surge de la confrontación de las características de la tierra ²(Cat), expresadas como cualidades ³(Cut), con las exigencias de los TUT, que pueden ser cultivos diversos, pasturas, uso forestal, expresados como requerimientos de tipos de utilización de tierra ⁴(RUT).

Pimentel (2009) describe que la aptitud, es el resultado de una evaluación de tierras, y se categoriza en: orden, clase, subclase y unidad de aptitud de tierras. El orden de aptitud expresa si una unidad es “apta” o “no apta”, para un uso determinado. Las clases hacen referencia a un grado de adaptabilidad. Para el orden apta, existen las clases: Altamente apta (A1); Moderadamente apta (A2); Marginalmente apta (A3). La no apta consta de las siguientes clases No apta actualmente (N1); y No apta permanentemente (N2). A su vez, las subclases indican el tipo de limitación presente (A2m); y las unidades de aptitud expresan variaciones de la clase debido a su producción o por exigencias de manejo (A2m-1, A2m-2).

Tomando en cuenta las apreciaciones anteriores, el esquema de evaluación de tierras según la FAO se base en el uso de modelos, que son poderosos asistentes en la toma de decisiones para la planificación. El Automated Land Evaluation System (ALES), es actualmente una herramienta que facilita la elaboración de modelos de información ecológica,

¹ Es la aptitud relativa de cada área para cada uso específico (cultivo de papa, arroz, etc.) (Rossiter *et al* 1995).

² Son atributos de la tierra que pueden ser medidos y estimados (precipitación, drenaje, etc.) (FAO 1985).

³ Son atributos complejos de la tierra que pueden influenciar su aptitud de una manera semi independiente (FAO 1985).

⁴ Son las condiciones necesarias de la tierra para la exitosa y sostenida práctica de un TUT dado (humedad disponible, disponibilidad de nutrientes, etc.) (Rossiter *et al* 1985).

económica y de relaciones clima-suelo-planta (Rossiter *et al* 1995). En estudios realizados por Cruz (2002); Lainez (1997); Orozco (1993) mencionan, que ALES es un programa de computación que permite a los evaluadores de tierra construir “⁵sistema expertos” para sus evaluaciones, de acuerdo al esquema de la FAO. Su diseño responde para uso tanto a escala regional y local.

La construcción de un modelo con base en ALES para la evaluación de tierras, responde a los siguientes criterios: **a)** Seleccionar el tipo de TUT representativo de la zona; **b)** Expresar los TUT en términos de RUT más importantes; **c)** Determinar cuáles CAT están disponibles a formar la base de evaluación; **d)** Construir los árboles de decisión para relacionar las CAT de la tierra con los RUT; **e)** Recolectar los parámetros económicos; **f)** Seleccionar algunas unidades cartográficas representativas o bien distribuidas; **g)** Recolectar e ingresar los datos de la tierra en dichas unidades (Rossiter *et al* 1995).

La construcción de un modelo toma mayor importancia cuando se considera la elaboración de árboles de decisión, que son considerados llaves multivías en orden jerárquico, construidas con características de la tierra y con criterios lógicos, cuyos resultados son las clasificaciones de las cualidades de aptitud física y económica de la tierra (Orozco 2003).

Pimentel (2009) menciona que en los modelos generados en ALES se pueden evaluar dos tipos de aptitud: 1) Evaluación física que indica el grado de aptitud para un TUT (⁶A1, ⁷A2, ⁸A3, ⁹N1 y ¹⁰N2), sin considerar las condiciones económicas, este tipo de aptitud solo enfatiza los aspectos relativamente permanentes de aptitud (clima y condiciones edáficas). 2) Evaluación económica, ALES después de haber calculado la evaluación física realiza una evaluación económica, mediante usos de parámetros, traducida en el Valor presente neto (VPN) de un TUT (dinero por hectárea), la Relación ¹¹Beneficio/Costo (basada en los valores

⁵ Utilizan, los conocimientos de técnicos, investigadores y agricultores, los cuales pueden sistematizarse en programas, amigables on usuarios, a través de preguntas y respuestas que ayudan a tomar decisiones a planificadores (Cruz 2002).

⁶ Tierras aptas, que no tienen limitaciones para una aplicación sostenida de un uso determinado (Rossiter *et al* 1995).

⁷ Tierras moderadamente aptas, con limitaciones que en conjunto son moderadamente graves (Rossiter *et al* 1995).

⁸ Tierras marginalmente aptas, con limitaciones, reducción de la productividad o los beneficios (Rossiter *et al* 1995).

⁹ Tiaras no aptas actualmnete, con limitaciones graves que impiden un uso sostenido de la tierra (Rossiter *et al* 1995).

¹⁰ Tierras no aptas, con limitaciones permanente de productividad (Rossiter *et al* 1995).

¹¹ También llamado "índice de rendimiento". En un método de Evaluación de Proyectos, que se basa en el del "Valor Presente", y que consiste en dividir el Valor Presente de los ingresos entre el Valor Presente de los egresos.

presentes de los ingresos y egresos), y el ¹²Margen Bruto predicho (basado en costos y retornos predichos). En términos específicos, ALES solo evalúa las unidades cartográficas con características homogéneas. Sin embargo si una unidad de tierra es clasificada no apta, no será evaluada económicamente (Rossiter *et al* 1995).

En Costa Rica, históricamente se han utilizado varios sistemas de clasificación de tierras: Sheng (1971), FAO (1976), Tosi (1985), MAGMIRENEM (1995), sin embargo actualmente se emplean los modelos SOLUS y ALES, los cuales utilizan la tecnología de los sistemas de información geográfica, hacen modelación o escenarios para estimar la aptitud física y económica, el uso potencial, conflictos de uso y sirven en la toma de decisiones para la evaluación de las tierras (Arroyo 1995, Stoorvogel et al. 1995).

2.1.2 Cambio climático

El cambio climático se refiere a las variaciones estadísticamente significativas en el estado promedio del clima o su variabilidad, siendo persistentes durante períodos largos, típicamente décadas o más. En las últimas décadas se ha llevado a cabo un enorme esfuerzo en investigación y desarrollo tecnológico para tratar de explicar las posibles causas de este fenómeno y generar información sobre su tendencia futuro. Actualmente se reconoce con un nivel de confianza muy alto (90 %) que el calentamiento observado es debido al aumento de concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a actividades humanas (IPCC-WGI 2007).

Dentro del contexto anterior diversos estudios señalan, que el CO₂ tiende a ser el principal GEI responsable del calentamiento climático (Kerr y Kharouba 2007). Por otra parte, estudios recientes han determinado que las fluctuaciones de CO₂ en la atmósfera se han incrementado en un 31 % (Trenberth 2005), desde los tiempos preindustriales, de 280 ppm a 365 ppm actualmente (IPCC 1996), por tanto se considera probable que la tendencia actual del calentamiento global, que ha sido de 0.6 +- 0.2 °C desde 1900, continúe, y que el nivel de temperatura media global aumente entre 1.4 y 5.8 °C durante el período de 1990 al 2100 (Houghton *et al* 2001), con este aumento de temperatura es probable que disminuya la disponibilidad de agua; que se de la extinción paulatina de algunos bosques, la pérdida de

¹² Diferencia entre los ingresos totales y costos de producción.

ciertos glaciares, la rápida acidificación del océano y el incremento en el nivel del mar con lo que algunas áreas quedarían inundadas (Parry *et al* 2008). Actualmente se cree que el calentamiento del sistema climático es inequívoco, como lo evidencian un número significativo de cambios observados y sus respuestas (Rosenzweig y Liverman, 1992; McCarthy *et al* 2001).

A partir de estos acontecimientos, la comunidad científica ha realizado un gran esfuerzo para desarrollar ¹³modelos físico-matemáticos del clima que puedan simular la dinámica de sus componentes, principalmente de la atmósfera y el océano (Bertrand *et al.* 2002) y estimar el cambio climático a nivel cuantitativo en el futuro (Gutiérrez *et al* 2006). Estos modelos se aplicaron por primera vez en la década de 1980 (Parry 1990), sin embargo, la resolución espacial de los modelos es todavía bastante limitada (entre 250 y 500 km) para obtener una apreciación a detalle del clima a nivel local y sus impactos. Por ello en los últimos años, se han comenzado a aplicar técnicas de *downscaling*, que permite aumentar la resolución de estos resultados (Gutiérrez *et al* 2006).

Los modelos físico-matemáticos del clima utilizan escenarios futuros de cambio climático, que consideran distintos escenarios socioeconómicos futuros, que se traducen en distintos ¹⁴escenarios de emisiones de GEI (Houghton *et al* 2001), a su vez, para cada uno de estos escenarios se ha realizado una cuantificación de las emisiones antropogénicas futuras de GEI; y se formularon 40 hipótesis diferentes, agrupadas en cuatro familias (IPCC 2001), estas cuatro líneas evolutivas proceden de dos familias de escenarios, los A y los B; cada uno está dividido en dos posibles tendencias, las 1 indican tendencia de un mundo globalizado y las 2 que describen tendencias más divergentes y regionalizadas, generando de esta manera los cuatro escenarios generales A1, A2, B1 y B2 (IPCC 2002)

Para el escenario A1. Se espera un crecimiento demográfico y económico rápido en combinación a la dependencia de combustibles fósiles, energía no fósil o una combinación de ambas. Este escenario se divide en tres posibles direcciones, **A1F** asociado al consumo de combustibles fósiles, **A1T** asociados a fuentes de energía alternativas y **A1B** donde existe un equilibrio en las fuentes de energía disponibles. **Para el escenario A2** se espera un menor

¹³ Proyectan la respuesta de muchas variables climáticas en función de un conjunto de escenarios de emisiones (IMN 2008).

¹⁴ Representación plausible de la evolución futura de las emisiones de sustancias que son en potencia, radiactivamente activas por ejemplo (gases de efecto invernadero o aerosoles) (IPCC 200).

crecimiento económico, menos globalización y un crecimiento demográfico alto y sostenido. **Para los escenarios B1 y B2** se observa cierto nivel de mitigación de las emisiones a través del uso más eficiente de la energía con tecnologías limpias, por medio de soluciones, locales y regionales para el desarrollo sostenible general (IPCC 2001). Estos escenarios de emisiones son utilizados actualmente para realizar proyecciones con modelos de clima (Nakicenovic *et al* 2001), por tanto para construir un escenario se hacen supuestos sobre factores socioeconómicos y sus interrelaciones. A partir de estos escenarios de emisiones se construyen a su vez, escenarios resultantes de GEI y aerosoles. Estos datos se introducen en un modelo climático para obtener, finalmente, proyecciones sobre el clima futuro (PACC 2008), la resultante de este proceso, es la proyección de cómo podría ser el clima en 20, 50 o 100 años, dependiendo del tipo de desarrollo que sigan las sociedades (Benioff *et al.* 1996).

Por otra parte Gutiérrez *et al.* (2006) mencionan que debido a la dificultad de este proceso, la evaluación de incertidumbres asociadas a las proyecciones de cambio climático se lleva a cabo con una aproximación probabilística en la que se recomienda utilizar varios escenarios. Por tanto en lugar de decidir si un determinado modelo es el más representativo de las proyecciones futuras, considerar varios modelos, esta amplía la opción de planificar diferentes estrategias de adaptación (Cifuentes 2010), por lo que todos los escenarios en cualquier análisis de cambio climático, se consideran igualmente válidos y probables (IPCC 2007).

Estudios realizados, sobre el impacto del cambio climático relacionados con sistemas agrícolas, inicialmente utilizaron datos simulados del tiempo, de ¹⁵Modelos de Circulación General (MCG) y en su mayoría se centraron en el impacto en primer orden biofísico (rendimiento de los cultivos) (Delecolle *et al.* 1995; Iglesias y Mínguez, 1995; Kenny *et al.* 2000, Smith y Lazo, 2001; CMNUCC, 2001). La mayoría de estos estudios no consideraron en sus análisis las consecuencias de los impactos biofísicos del cambio climático sobre las condiciones socio-económicas (Antle 1996; Schneider *et al.* 2000; Smith y Lazo 2001), o indirectas, tales como la disponibilidad de agua, la competencia con plagas, cambios en la fertilidad del suelo y la erosión (Aggarwal y Mall 2002).

¹⁵ Son modelos que tratan de explicar el clima global, por lo que tienen una resolución menos fina (IMN 2008).

Asimismo, Laderach *et al.* (2008) opinan que los modelos sólo consideran el clima, por lo que deberían tomar en cuenta las limitaciones de los suelos, las plagas y enfermedades. A su vez, los análisis deben ampliarse para incluir el impacto económico, utilizando modelos, que en forma general tengan en cuenta los posibles cultivos de sustitución e incorporen los componentes de los medios de vida y otros factores importantes que impulsan los cambios: como los mercados, las preferencias sociales, culturales y las políticas que deben ser incorporados en el modelado. Es por tanto necesario evaluar los impactos del cambio climático desde una perspectiva integral.

Por tanto se requiere la utilización de modelos de evaluación integrada (IAM por sus siglas en inglés), son una herramienta para apoyar a la toma de decisiones en cuanto a los impactos de cambio climático a nivel regional y global considerando distintos sectores (con mercado o sin mercado), políticas de reducción de emisiones y su costo/efectividad y costo/beneficio, el costo social del carbón, y posibles políticas de adaptación. Por tanto no son modelos predictivos, más bien crean escenarios posibles de lo que podría ocurrir bajo condiciones de cambio climático (Parson y Fisher-Vanden 1995)

Algunos modelos IAM y los sectores que incluyen son: DICE/RICE 99 (considera los sectores agrícola, forestal, energía, agua, construcción, pesquerías, recreación al aire libre, zonas costeras, ecosistemas y mortalidad por enfermedades relacionadas con el clima y contaminación), FUND 2.9 (este modelo considera el sector agrícola, forestal, agua, consumo de energía, zonas costeras, ecosistemas, salud humana (diarrea, enfermedades por vector, cardiovasculares y respiratorias), PAGE 2002 y MERGE (considera el sector económico y no económico).

Estos modelos fueron considerados y revisados por el Tyndall Center como parte de los estudios previos para la realización del Stern Review (Parson y Fisher-Vanden 1995).

2.2 Riesgo a plagas y degradación del suelo por cambio climático

2.2.1 Tizón tardío

El tizón tardío de la papa, causado por el oomycete fitopatógeno *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary; es la enfermedad más importante que afecta a este cultivo alrededor del

mundo. En varias oportunidades, la enfermedad ha alcanzado proporciones de ¹⁶epifitía. La más conocida fue la ocurrida en Irlanda en 1845, que ocasionó una gran hambruna y provocó la muerte de cerca de un millón de personas (CIP 1996 y Mantecón 2002), ya que el desarrollo de esta enfermedad es particularmente devastadora en zonas húmedas y templadas (Hijmans *et al.* 2000).

Mendoza (1996) mencionan que el desarrollo de una epidemia de tizón tardío (TT) está fuertemente relacionado a condiciones climatológicas específicas como, días nublados y lloviznas aunque requiere también noches frescas y días cálidos. La mayoría de los procesos que llevan al establecimiento de la enfermedad son afectados por la temperatura y la humedad relativa. Igualmente Abad *et al.* (1995) en un estudio de epidemiología del tizón tardío, determinó que la neblina o las lluvias constantes que se presentan generalmente en las zonas paperas, unidas a una baja temperatura de 12 a 15 °C y una humedad relativa entre 91 a 100 %, son condiciones apropiadas para que los ¹⁷esporangios formen ¹⁸zoosporas. Estas se movilizan en una película de agua, germinan y penetran en la hoja. La infección concluye cuando las gotas de lluvia lavan los esporangios del hongo en las hojas infectadas y los transportan al suelo, donde infectan especialmente a los tubérculos más superficiales, expuestos al medio ambiente.

Según Fernández (1994) menciona que a temperatura de 21 °C sería la óptima para la formación del hongo, pero es capaz de mantenerse vivo a temperaturas de entre 0 y 28 °C como límite en tejido hospedero. Así mismo indica que a 12 °C ocurre la germinación indirecta a través de zoosporas y a 22 °C y mayor de 95 % de humedad ocurre la germinación directa a través del tubo germinativo. En cuanto a la humedad relativa, esta debe ser superior a 95 %. Sin embargo a temperatura superior a 30 °C se considera como no favorable a la enfermedad (Torres 1997). Por otra parte Harrison (1992) indica que los rangos propicios para el desarrollo del patógeno oscilan entre 18.3 a 23.3 °C y una humedad relativa óptima entre 75 a 100 %. En condiciones actuales de Costa Rica el tizón tardío se encuentra en todas las

¹⁶ Enfermedad de las plantas que aparece de improviso en una región o que aumenta su incidencia con respecto a la habitual. Puede deberse a agentes químicos, físicos o biológicos (Osman 2010).

¹⁷ Es la estructura de los hongos que producen y contiene esporas

¹⁸ Es una espora sexual motil provista de flagelos para locomoción producida dentro de los esporangios

áreas paperas de Cartago, entre 1000 y 3200 msnm con mayor incidencia en altitudes de entre 1000 a 2600 msnm y temperaturas que oscilan entre 18 a 21 °C (MAG 2007).

Según menciona Bindi (2008) las variables climáticas están estrechamente ligadas a la presencia o ausencia del TT sobre las áreas del cultivo de la papa en el mundo. Estima que 22 °C, es el límite térmico del TT, el aumento de la temperatura por encima de ese umbral puede prevenir las infecciones. Sin embargo la precipitación es otra variable de gran importancia tanto en la cantidad y la frecuencia de la lluvia que crearían condiciones de riesgo más favorable.

Un estudio realizado en Perú por Giraldo *et al.* (2010) sobre la severidad del TT de la papa en zonas agrícolas, asociadas al cambio climático, permitió generar mapas de riesgo, relacionados al número de aplicaciones necesarias de fungicidas para el control de la enfermedad. En este estudio se usaron modelos agroclimáticos como GEOSIMCAST, bajo un escenario de cambio climático según la variación del modelo CCCMA. Como resultado del estudio se determinó que la temperatura y la humedad relativa fueron los factores que influyeron significativamente en el desarrollo de la enfermedad.

En trabajos desarrollados por Hijmans (2003) para estimar la severidad global del TT, relacionados al cambio climático; se integraron dos modelos utilizando los Sistemas de Información Geográfico (SIG) este enfoque permitió zonificar la severidad con base al número de aplicaciones de fungicidas para el control de la plaga. Los modelos utilizados por Hijmans en su estudio fueron Blitecast y Sincast. Ambos modelos parten de la premisa lógica de que el TT se desarrolla cuando hay períodos prolongados de humedad de las hojas; así mismo estiman la pérdida de fungicidas basados en el tiempo y la lluvia. Como resultado de este estudio se determinó una zonificación de riesgo, con base al número de aplicaciones observadas, que significativamente superan el número previstos en países donde la producción de papa es intensiva, tales como Costa Rica e Indonesia. Por tanto se considera que estos países debieran adoptar un sistema más eficaz de aplicaciones que reduzca el uso de plaguicidas. Actualmente los agricultores necesitan fortalecer sus capacidades de adaptación frente a posibles escenarios de riesgo por TT. Estas capacidades de adaptación dependen de la adopción de sistemas modernos y eficientes de riego, manejo altamente tecnificado de la

fertilidad del suelo, de la técnica de cultivo, de los pesticidas, de la existencia de alertas tempranas y de adoptar materiales genéticos resistentes al TT (GCOS 2003 y Treharne 1989).

2.2.2 Polilla guatemalteca

La polilla de la papa *Tecia solanivora* (Povolny) (Lepidoptera: Gelechiidae), es originaria de Centroamérica, en Guatemala se reportaron daños desde 1956. Sin embargo hasta 1973 descrita por Povolny a partir de ejemplares colectados en Guatemala. Ese mismo año se reportó en Panamá, afectando principalmente la zona productora de papa ubicada en Cerro Punta, también se ha reseñado su presencia en Honduras y Salvador (Niño y Nozt 2000). Posteriormente, fue introducido a Sur América en una importación de semilla hecha a Venezuela desde Costa Rica en 1983 (Vargas *et al.* 2004).

Según el MAG (2007), *Tecia solanivora* (TS) fue introducida en Costa Rica en 1970, y actualmente se encuentra distribuida en todo el país y particularmente en la zona norte de Cartago, con altitudes mayores a 2500 msnm. TS es una especie típica de zonas cálidas, pero también se le encuentra en zonas altas, como en Perú desde 0 a 4000 msnm y en Centroamérica, Venezuela, Colombia y Ecuador desde los 2400 a 3500 msnm. (Torres 1997). TS pasa por una metamorfosis completa que comprende cuatro estados de desarrollo: huevo, larva, pupa y adulto. La duración de cada uno de éstos estados y consecuentemente la duración total del desarrollo de ésta especie es afectada por las condiciones ambientales, siendo la temperatura y la humedad relativa los factores que más influyen.

Notz (1995) utilizando cámaras calibradas a diferentes temperaturas de 10, 15, 20, 25 y 30 °C determinó que cuando la temperatura se incrementaba, el tiempo de desarrollo de TS en cada fase disminuía significativamente. El mismo autor menciona que TS es capaz de producir entre 2 a 10 generaciones por año a 10 y 25 °C respectivamente. A temperaturas superiores a 30 °C la mortalidad de larvas es del 100 %. Sin embargo indica que la temperatura más favorable para el desarrollo de esta especie es 15 °C. Otro factor importante es que a temperaturas por debajo de los 8 °C pueden ser utilizadas como método de control, debido a que la plaga no sobrevive o no se reproduce (Nozt 1995). Otros hallazgos de demostraron que esta plaga es capaz de adaptarse a diferentes áreas ecológicas. Esto significa

que se puede dispersar de las zonas altas donde actualmente está concentrada, a zonas más bajas, donde la temperatura promedio se encuentra alrededor de los 25 °C.

Un estudio realizado en Costa Rica, por Barroso (1974) sustenta que a 25.5 °C y 70 % de humedad relativa en un período de 50.45 días en promedio el ciclo de TS se desarrolla sin problema alguno. Sin embargo Casados (1984) comprobó que a 24.5 °C y 66 % de humedad relativa y un período de 56.58 días TS se desarrolla con toda normalidad. Otros autores como Torres (1989); Herrera (1997); Álvarez y Trillos (1999) mencionan que el ciclo de vida de TS se desarrolla a temperatura promedio de 15.5 °C. Inferiores a 15.5 °C con presencia de lluvias es un factor limitante para su desarrollo (Econex 2010).

Por otra parte Alvarado *et al.* (1993) menciona que las hembras de TS depositan sus huevos en el suelo, cerca de la base de las plantas. Una vez que la larva emerge, se orienta hacia el tubérculo, raspa su superficie, penetra debajo de la epidermis y luego barrena más profundamente hasta formar galerías dentro del tubérculo, permaneciendo en este hasta el momento de pupar. Otras observaciones científicas realizado por Torres (1989) en zonas paperas, reporta que los adultos de TS se congregan en los bordes de los cultivos, escondidos en el follaje de las malezas y arbustos, y al atardecer copulan y ovipositan sobre los tubérculos expuestos en el terreno. Así mismo Okunaga y Ochoa (1987), encontraron que la mayor actividad sexual de la polilla ocurre a las 6:00 a.m.

Por otro lado se supone que los cambios en los promedios de temperatura, humedad relativa y concentración de gases atmosféricos, impulsen las tasas de crecimiento y regeneración de TS. A su vez, se considera probable que altere las interrelaciones con sus enemigos naturales (Hijmans 2003). En resumen se espera que los insectos sean muy sensibles al cambio climático, dado que tienen ciclos de vida cortos, que están fuertemente influenciados por la temperatura (Wilson 2010).

2.2.3 Degradación de suelo

Según la FAO (1984) la degradación es el proceso que rebaja la capacidad actual y potencial del suelo para producir, cuantitativa y cualitativamente, bienes y servicios.

Lal *et al.* (1997) define a la degradación del suelo, como la pérdida de la productividad real o potencial o de utilidad del suelo como resultado de factores naturales o antropológicos. Otra definición similar citado por Cadeti (2004) menciona que la degradación del suelo, viene a ser una reducción o la pérdida de la productividad biológica o económica, ocasionada por los sistemas de utilización de la tierra o por un proceso o una combinación de procesos, sumado a actividades humanas. Un principal factor de degradación de tierras, es la erosión del suelo, causada por el viento o el agua, proceso que afecta de forma generalizada en el mundo y que es posible que se agrave por el cambio climático; el deterioro de las propiedades físicas, químico y biológico; disminución de la materia orgánica; contaminación; salinización; y pérdida de biodiversidad; o en general de las propiedades económicas del suelo (FAO 1984).

Esta importancia se hace más relevante cuando Odelman (1994) en sus estudios realizados sobre degradación del suelo a nivel global, indica que la erosión hídrica es la que causa más daños masivos. Este tipo de degradación de suelo afecta a casi 11 millones de km² de tierras en la superficie del globo terráqueo (8.5 % de los 130 millones de km²), así mismo la erosión eólica (5.9 millones de km²), la degradación química (2.39 millones de km²) y la degradación física (0.83 millón de km²) afectan, en diferentes niveles de intensidad, casi 20 millones de km² esto es, 15 % de la superficie global.

A escala más pequeña, un estudio reportado por Marchamalo (2003) realizado en la cuenca del río Reventazón, se reporta que la tasa de erosión es significativa en la subcuenca del Birrís (28.3tn/ha/año), mayor incluso que la de la subcuenca de Aguascalientes-Reventado (23tn/ha/año), el resto de las subcuencas de la vertiente norte de la cuenca del Reventazón presentan tasas cercanas a (20tn/ha/año). Un aspecto importante es que los pastos de corta tienen un comportamiento hidrológico más favorable que otros usos, reduciendo la escorrentía en un 73 % con respecto a los potreros tradicionales.

Estudios similares realizados en la cuenca del río Reventazón por MAG-FAO-UNED (1994) determinaron que la erosión hídrica se agudiza en la estación lluviosa y se relacionan con el grado de cobertura de los suelos durante las labores de labranza y cosecha, ya que la mayoría de cultivos de la zona no dejan rastros en el campo. Otro factor que acelera la degradación del suelo, es la preparación de la misma, a favor de la pendiente, empleando maquinaria pesada, como arado de rastra y rotavator; equipos que pueden provocar

compactación y pulverizan el suelo. Esta forma de preparación impermeabiliza el suelo y facilita la escorrentía y arrastre de la capa arable. Además, ocasiona sedimentación de embalses y taponamiento de carreteras (Gómez *et al.* 2004).

Por otra parte PASOLAC (2000) recomienda que los agricultores adopten prácticas específicas de manejo y conservación de suelos como: siembras en contornos, barreras vivas, gavetas de infiltración, etc., con el fin de minimizar los riesgos de erosión en sus fincas que ayuden a conservar el suelo como medidas de adaptación al cambio climático. En casos extremos, debe prohibirse la utilización de tierras con riesgo a erosión, para cultivos anuales. Asimismo el CEPAL (2007) recomienda que a los agricultores que opten por prácticas de conservación del suelo reciban externalidades por reducir este tipo de impacto en el suelo.

Edwards (1990) indica que los cambios en los patrones de precipitaciones y el aumento de las temperaturas medias, están estrechamente ligados a la degradación de suelos. Un aumento en la temperatura global acelera considerablemente las pérdidas de carbono en los suelos con intensas actividades de labranza, lo que eleva la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera. A su vez, las variaciones de los patrones de lluvia y temperatura, sobre suelos con riesgo de erosión, asociados a condiciones topográficas y prácticas agrícolas inadecuadas, y el cambio climático pondrá más presión sobre la calidad de estos suelos (Marelli 2003, INTA 2010).

2.3 Papa y cambio climático

La papa (*Solanum tuberosum*) es una planta herbácea de porte medio (0.5-1.00 m) pertenece a la familia de las Solanáceas, es una planta dicotiledónea anual, aunque puede ser considerada como perenne debido a su capacidad de reproducirse vegetativamente por medio de tubérculos (Chacón 1993, Meza 2005, Jaramillo 1979). Este cultivo se originó en los Andes del Perú y ha sido cultivada y mejorada al menos durante 8000 años. Actualmente se conocen dos mil especies del género *Solanum* al cual pertenece la papa. Sin embargo solo alrededor de 180 especies producen tubérculos; y de ellas solamente ocho especies se cultivan como alimento, y sólo *Solanum* es de distribución mundial (FAO 2008, Chacón 1993).

En Costa Rica se siembra papa desde hace 90 años. La cual por su consumo, es el tercer producto en importancia a nivel nacional, luego del arroz y los frijoles (Amador, 1991;

Brenes, 1995). Se produce en el cantón de Alfaro Ruiz de la provincia de Alajuela, pero principalmente en la zona norte de la provincia de Cartago (Chacón, 1993; SEPSA, 1993). Más del 90 % de la producción se produce en Cartago, donde además, se concentra el 95 % del área nacional dedicada al cultivo (Villalobos 1979, Thompson 1983, SEPSA 1993).

En el cantón de Alvarado compuesto por los distritos de Pacayas, Cervantes y Capellades, es la mayor región productora de papa en Costa Rica, aporta el 60 % de la producción nacional (Sibaja, 1995). Actualmente se siembran 2.425 ha/año, con una producción promedio de 25.33 tn/ha, se estima más de 600 productores (CSRCO 2007) y el 85 % de la variedad Floresta es cultivada por los productores de Cartago (MAG 2007).

Por otro lado el cultivo de la papa es exigente a las condiciones climáticas por razones productivas y de vulnerabilidad a plagas y enfermedades (Amador 1991, SEPSA 1993). Considerando esta afirmación, Quevedo (1977), comprobó que los rendimientos de la papa son inversamente proporcionales al aumento de la temperatura; parece que el efecto sobre el rendimiento es diferencial entre la temperatura máxima y la mínima. Cuando la temperatura mínima es más alta, la producción disminuye, mientras que si ésta se mantiene entre un rango de 12 a 18 °C, la producción de follaje, tallos y tubérculos es mejor (Amador, 1991).

Otros estudios indican que la papa se desarrolla a temperaturas medias relativas bajas, inferiores a 25 °C, temperatura que establece el límite por sobre el cual deja de ocurrir la tuberización (Domínguez 1989). Así mismo, Doorembos y Kassam (1986) señalan que las temperaturas más favorables oscilan entre los 15 a 20 °C, siendo las temperaturas nocturnas inferiores a 15 °C las óptimas para dar inicio a la tuberización. Estudios similares realizado por Hijmans (2003) reportan que la temperatura nocturna tiene una influencia crucial en la formación del almidón en los tubérculos siendo lo ideal de 15 a 18 °C cuando la temperatura supera los 20 °C el desarrollo de los tubérculos se ve severamente afectado.

La FAO (2008) indica que la papa se cultiva en más de 100 países, en clima templado, subtropical o tropical, donde la temperatura representa el principal límite de la producción; por que a temperaturas inferiores a 10 °C y superiores a 30 °C inhiben el desarrollo del tubérculo, mientras que la mejor producción ocurre donde la temperatura se mantiene en promedio de 18 a 20 °C. A los 22 a 25 °C la formación de tubérculos se retrasa. En Costa

Rica la papa se cultiva entre 15 a 20 °C considerados como temperaturas óptimas para crecimiento y tuberización (Ramírez y Schnell 1983).

Con respecto a los requerimientos hídricos Guerrero (1984) y Amador (1991) mencionan que el cultivo de la papa requiere de un buen suministro de agua, tanto en cantidad como en distribución, porque es poco tolerante a la sequía. Sin embargo, excesos hídricos pueden ocasionar un pobre desarrollo radicular, pudrición de tubérculos y estimular enfermedades fungosas. La etapa crítica para la deficiencia de agua en la producción, es durante la formación de tubérculos (Amador 1991). Al respecto Martínez y Moreno (1992) determinaron al menos dos períodos críticos de necesidades hídricas en el cultivo de la papa: inmediatamente después de la emergencia y durante la tuberización. Estas fases en la fenología de la papa, se consideran como las más importantes del ciclo según (Soboh *et al.* 2000). Así mismo un déficit de agua durante estos períodos tiene el mayor efecto negativo, por que favorece además la formación de tubérculos fusiformes y pequeños (Doorembos y Kassam 1979), por tanto los requerimientos hídricos del cultivo de la papa varían entre 400 y 600 mm por temporada (Jérez y Simpfendofer 2000) y de 400 a 800 mm (Haverkort 1986). Al respecto Bosnjak y Pejik (1996) reportan que 460 y 480 mm, en tanto Klassen *et al.* (2001) señalan que la papa necesita aproximadamente 455 mm/temporada.

Considerando el análisis anterior, Hijmans (2003) indica que un incremento de las variables limitantes del cultivo de la papa, puedan disminuir los rendimientos por efectos del cambio climático. Estos efectos, se manifiestan en un aumento de la temperatura superficial del planeta de 1.8 a 4 °C, considerando que la tasa de tuberización disminuye a temperaturas superiores a 17 °C. Un aumento de temperatura podría reflejarse en la disminución de la producción de papa que se cultivan actualmente en los límites climáticos del cultivo (Bindi 2008).

Sin embargo, Cline (2007) en su estudio, sobre evaluación del impacto del cambio climático, reporta que los efectos del cambio climático varían de una región a otra, por tanto indica, que un clima más cálido en los países del norte de Europa prolongaría la temporada agrícola y aumentaría la producción. Al respecto, las regiones que actualmente, son demasiadas frías para producir papas, como algunas partes del Canadá, Siberia y Escandinavia, así como las zonas altas del altiplano peruano y boliviano podrían volverse

viables. Similar estudio realizado por Walker *et al.* (1999) en otras zonas como Argelia, Marruecos, China y Sudáfrica, sugieren que el rendimiento puede aumentar debido a un clima más cálido que permite un cultivo de invierno (en lugar de un cultivo de otoño o primavera), esto favorece los rendimientos y da lugar a una expansión de la producción hacia zonas más altas y situadas a mayor latitud. No obstante, la expansión hacia zonas de mayor altitud, conlleva riesgos, ya que en ellas, las tierras agrícolas suelen tener pendientes más pronunciadas, por lo que el cultivo de papa puede generar degradación del suelo debido al alto grado de labranza que requiere (Inforesources 2008).

Otro reporte científico de Hijmans (2003) con relación al impacto del cambio climático sobre la papa, indica que el cultivo sin tomar medidas de adaptación, al aumento de las temperaturas, reduciría la producción del 10 % al 19 % de 2010 a 2039, y del 18 % al 32 % de 2040 a 2069. También indica que la región más vulnerable es la franja tropical, donde la pérdida podría superar el 50 %.

Por su parte Bindi (2008) revela que un incremento de CO₂ repercute en un aumento considerable del número de tubérculos y de un mayor tamaño de los mismos, en condiciones actuales de 385 ppm y los niveles hipotéticos más recientes del IPCC para el año 2100 van de 540 a 970 ppm. Por consiguiente por cada 100 ppm el incremento de producción de papa es de alrededor del 10 %. Sin embargo Taub *et al.* (2008) revela un descenso significativo (del 10 al 15 %) en el contenido de proteínas, si el CO₂ de la atmósfera alcanza 540-960 ppm, un rango previsto para la mitad y fines de este siglo.

Las experiencias en Costa Rica sobre evaluación de los impactos del cambio climático en el cultivo de la papa, es mínima, se encontró solo un estudio realizado por Villalobos y Retana (1999), los autores se basaron en el criterio del Programa Centroamericano sobre Cambio Climático (PCCC), el cual se fundamenta en los pronósticos de los modelos de circulación general (GISS y GCM) (Campos 1998), por tanto consideraron que los rangos de variación máxima en la precipitación serían de -20 y +20 %, mientras que el rango de variación moderada sería de -10 y +10 %. Las variaciones en la temperatura media se establecieron en +1 y +2 °C, y consideraron la posibilidad de que la concentración de CO₂ se duplique. Los resultados indican, una disminución en el rendimiento con un aumento de 2 °C de temperatura, combinado con una reducción del 15 % de precipitación

2.4 Impacto del cambio climático en la zona de aptitud

2.4.1 Impacto biofísico

El cambio climático tendrá serias consecuencias sobre la agricultura por ser uno de los ecosistemas más vulnerables a las variaciones del clima. Estos cambios físicos alterarán los rangos de diversos cultivos, que actualmente se encuentran en los umbrales fisiológicos de tolerancia a la temperatura y precipitación. Es probable que ocasionen pérdidas en su rendimiento, reducción de sus zonas de aptitud y desplazamiento a nuevas zonas (Kleidon y Money, 2000; Gian-Reto *et al* 2002).

Dentro de este marco un estudio realizado, en México sobre el impacto físico del cambio climático en la agricultura, utilizando modelos de cambio climático (GDFL, HADLEY y ECHAM), bajo dos escenarios de emisiones (A2 y B2) determinó una disminución neta de la superficie apta para cultivar maíz de temporal de 11 % a solo el 4.2 % (INE 2006; Flores *et al.* 1996).

Sin embargo un estudio realizado en Nicaragua por Laderach *et al* (2010) indican que el cambio climático desplazará las zonas óptimas del café a elevaciones mayores a 1200 msnm donde actualmente se cultiva y se espera para el año 2020 tenga un desplazamiento a 1400 msnm y en el 2050 se estima a 1600 msnm. El mismo autor indica, que en el año 2050 habrá zonas que perderán entre 40 a 60 % su capacidad de adaptabilidad productiva.

Igualmente Pinto *et al* (2008) en su estudio sobre el calentamiento global en la agricultura brasileña, supone pérdidas de hasta un 10 % de las zonas óptimas del cultivo del café a 1 °C + 15 % de precipitación, y a 5.8 °C + 15 % de precipitación se espera el 97 % de pérdida de las áreas óptimas de café. Otros informes consideran, que habría zonas como el piedemonte en Venezuela, donde el rendimiento del maíz se reduciría hasta en un 100 %, obligando a trasladar la producción a otras zonas. Así mismo se estima que para el arroz, la reducción será generalizada y está estimada entre un 3 % y un 16 % en Guyana, y entre un 2% y un 15 % en Bolivia (CEPAL, 2009a).

Según FAO (2009), olas de friaje, en el año 2008, causaron en el Perú pérdidas considerables en las plantaciones de papa, trigo, quinua, cebada, kiwicha y forrajes: 47 % en

la provincia de Cusco, 38 % en Puno, 37 % en Apurímac, 24 % en Huancavelica, 22 % en Arequipa y 21 % en Ayacucho. Dentro de este contexto el cultivo más afectado fue la papa, alimento base de la seguridad alimentaria en la región, con pérdidas de hasta un 65 % y posibles desplazamientos de estas zonas a altitudes más elevadas.

Con respecto a Costa Rica, se espera que el cambio climático, incida en el sector agrario de diversas maneras, ya sea por una mayor ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos (inundaciones, sequías, huracanes, heladas, etc.), la pérdida de suelos, la pérdida de especies esenciales; la expansión de plagas, etc. (Bastidas 2008, Villalobos y Retana 1999). En 1998 Costa Rica fue impactada por el huracán Mich, el cual sumado a sucesivas sequías, ha provocado daños económicos de alrededor de US\$ 100 millones de dólares entre 1998 y 2001 (Ordaz *et al* 2010). Igualmente por causas de sequía, en el año 1958, en la zona papera de Cartago, el cultivo de la papa fue sujeto a pérdidas de aproximadas de 16 millones de colones (Retana 1990).

Actualmente, estudios realizados, en la región Central de Costa Rica, el IMN (2009) informó, una disminución progresiva de la precipitación anual, hasta alcanzar valores de disminución entre el 16 y el 23 % hacia fines del siglo XX. La zona de mayor impacto es el Valle Oriental donde la temperatura máxima y la mínima tienden a aumentar. La máxima puede subir entre 4 y 5 °C, mientras que la temperatura mínima puede aumentar entre 2 y 4 °C aproximadamente. Con base en las apreciaciones anteriores, es probable que el índice actual de sostenibilidad para la agricultura de Costa Rica 0.567, sea vulnerable al cambio climático y el mayor impacto lo sufrirán las hortalizas orgánicas, frijol, maíz y arroz seco. El menor impacto, el plátano, yuca, raíces y otros tubérculos, caña de azúcar orgánica y café orgánico (Consulting Group 2010), y una disminución en la disponibilidad de agua provista por la precipitación considera que los cultivos con mayor vulnerabilidad al cambio climático son en orden: tomate, papa, cebolla, frijol, maíz, naranja, arroz seco, banano, melón, piña, café y palma (Consulting Group 2010).

2.4.2 Impacto socioeconómico

De acuerdo al informe Stern (2006) la evidencia científica indica que el cambio climático afectará, el acceso a agua, la producción de alimentos, la salud y el ambiente. En

caso de tomarse acciones, los costos de riesgos podrían ser equivalentes a perder entre el 5 % y 20 % del PBI global. Una de las actividades económicas sobre la que más se resentirán los efectos del calentamiento global es la agricultura (Adams *et al* 1988).

De acuerdo al estudio realizado por CEPAL (2010) sobre la economía del cambio climático, si se asume que los cambios de temperatura y precipitación de las últimas décadas son parte del cambio climático y que los impactos de los eventos extremos se han manifestado con mayor intensidad en Centroamérica, los costos incurridos pueden ser estimados. Para Costa Rica arrojaría un costo de US\$ 2 mil millones de dólares para el período 2014.

Sin embargo el PNUD (2010) en su estudio “Evaluación de los flujos de inversión y financieros para la adaptación de los sectores de biodiversidad e hídrico necesario para hacer frente al cambio climático”, asume que Costa Rica necesita US\$ 5.8 millones de dólares para la adaptación al cambio climático. Un promedio de US\$ 2.1 millones de dólares para el sector hídrico y para el sector biodiversidad US\$ 3.7 millones de dólares durante los próximos 20 años.

En Costa Rica el sector agropecuario representan alrededor del 10 % del PBI. En el futuro se espera que esta participación se vea afectada a consecuencia del calentamiento global (Ordaz *et al* 2010), y se considera que podría enfrentarse a un proceso de descapitalización. Actualmente los créditos agropecuarios presentan una disminución notable entre los años 2000 y 2008, pasando de 8.2 % al 3.7 %. En cuanto al gasto total del gobierno central, se observa que nunca ha sido mayor al 1.2 % (dato del año 2000) y tan solo 0.5 % para el 2008. Ello representa un margen minúsculo de financiamiento para el sector con mayores dificultades para enfrentar los impactos del cambio climático (Ordaz *et al* 2010). Otro tema de gran importancia son los créditos y seguros agrícolas, el acceso a éstas fuentes de financiamiento es más difícil para los agricultores en especial los más pequeños y más vulnerables a enfrentar cualquier cambio (Ordaz *et al* 2010).

En Brasil un estudio estableció una zonificación de riesgos, que es aplicada para todos los agricultores que solicitan un seguro agrícola o financiamiento. Este mecanismo permite establecer “qué, cuando y donde plantar” (Pinto *et al* 2008). Otro aspecto importante del impacto del cambio climático, es sobre el valor de las tierras. Por tal razón existe una relación entre el valor de la tierra y las tendencias de cambio en la temperatura local. Esta relación

explica que los valores comerciales de la tierra serán altos para zonas templadas y marginales para las zonas tropicales (Ordaz *et al.* 2010).

2.5 Algunas medidas de mitigación al cambio climático

Los espacios agrícolas ofrecen un gran potencial para mitigar los impactos de los GEI debido principalmente a su capacidad de absorción de CO₂. Por tanto es un factor esencial a tener en cuenta en diseño de futuras estrategias de mitigación al cambio climático. A continuación se muestran algunas medidas a tener en cuenta:

Cuadro 1. Prácticas de conservación del suelo como medidas de mitigación en la producción del cultivo de la papa

| Medidas de mitigación | Impactos positivos de las medidas de mitigación | Implementación con relación al nivel de costo |
|---------------------------------------|---|---|
| Cubiertas vegetales | Cultivar simultáneamente en las fincas con papas otras especies de vegetación. | Bajo |
| Laboreo reducido | Laboreo superficial, perpendicular a la pendiente o no, laboreo con el objetivo de reducir la descomposición. Permite el incremento de CO ₂ en el suelo. A su vez Permite la reducción de emisiones de GEI mediante reducción de la aireación. | Bajo |
| Utilización de restos de cosecha | Incorporación de restos de cosecha al suelo, mejor conservación del agua, retorno e incorporación de CO ₂ al suelo facilitando el secuestro de carbono. | Bajo |
| Optimización del uso de fertilizantes | Cambios en las cantidades establecidas o en el tipo adecuado de fertilizantes. | Bajo/Medio |
| Rotación de cultivos | Introducir distintos cultivos en la misma parcela, a lo largo del tiempo, con el objetivo de mejorar el aprovechamiento de los nutrientes del suelo. | Bajo |
| Asociación con leguminosas | Introducir distintos cultivos en la misma parcela, con el objetivo de aumentar la fijación de nitrógeno en el suelo y mejorar el aprovechamiento de los nutrientes del suelo. | Bajo |
| Barreras vivas | El fin principal del establecimiento es el de lograr controlar en cierto grado los niveles de erosión de los suelos. Ellas actúan como reductoras de la velocidad del agua de escorrentía pendiente abajo, y además sirven como filtros vivos, que retienen los sedimentos de suelo y residuos vegetales que transporta el agua que escurre sobre el terreno. | Bajo/Medio |
| Siembra en contorno | Es una práctica de conservación del suelo que ayuda a reducir la erosión laminar y en canalillos, reduce el transporte de sedimentos y otros contaminantes del agua, reduce la velocidad del escurrimiento superficial y promueve la infiltración de agua en el suelo, a su vez, aumenta la humedad disponible para el crecimiento de las plantas | Bajo/Medio |
| Gavetas de infiltración | Es una práctica de conservación del suelo que ayuda a reducir la erosión laminar, deslizamiento de lodo y lavado de minerales, producto de un manejo inadecuado al momento de preparar el terreno. | Medio |

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización del área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la cuenca alta del río Reventazón (Figura 1), que corresponde a la vertiente Atlántica de Costa Rica. Se encuentra dentro de la provincia de Cartago (cantones de Cartago, Paraíso, Oreamuno, Jiménez, Alvarado, El Guarco y Turrialba) y las planicies de la provincia de Limón. El área de estudio abarca 657 km² (ICE 2005) y está localizada entre los meridianos 83°33' y 84°02' de Longitud Oeste, y entre los paralelos 09°33' y 10°02' de Latitud Norte (Sogreah Ingenierie SNC *et al.* 1999a; Pérez *et al.* 2001). Con una altitud media de 1660 msnm, máxima de 3491 msnm y mínima de 410 msnm (ICE 2005).

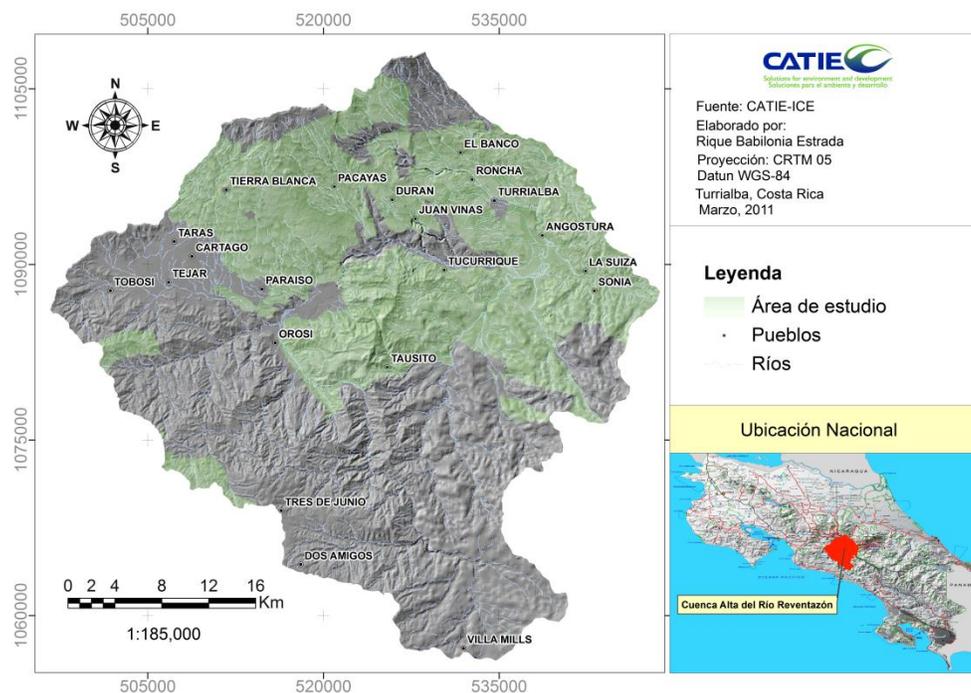


Figura 1. Mapa de ubicación de la cuenca alta del río Reventazón

3.1.1 Descripción biofísica

Esta cuenca es una de las más importantes por su recarga hídrica. Está compuesta por once subcuencas: Río Aguacaliente-Reventado, Río Paez-Barrisito, Río Barris, Río Chiz-Maravilla, Río Turrialba, Río Guayabo, Río Navarro, Río Grande de Orosi, Río Pejibaye, Río Atirro y Río Tuis (ICE 2005) indican que la precipitación media en la cuenca es de 3777 mm

anuales y la escorrentía media es de 2646 mm. A su vez, reporta variaciones fuertes en la precipitación desde 7686 mm en Cachí hasta 1259 mm en Cartago. La precipitación se concentra en el mes de mayo en adelante, aunque prácticamente hay lluvias todo el año, a excepción de los alrededores de la ciudad de Cartago y Paraíso, donde la estación seca puede prolongarse desde diciembre hasta mayo. La temperatura promedio anual es de 19 °C.

El punto de drenaje “La Angostura” y Turrialba está cerca de los 600 msnm, pero sitios como los volcanes Irazú, Turrialba y Villa Mills superan los 3000 msnm. El clima tiende a ser variado, predominantemente húmedo y caliente, sin embargo existen áreas donde el balance hídrico es negativo, es decir la evapotranspiración potencial es mayor a la precipitación promedio anual (ICE 2005).

De acuerdo a la clasificación de zonas de vida Holdridge (1987), en la zona de estudio se distinguen al menos seis diferentes zonas de vida: Bosque Pluvial Montano Tropical, Bosque Pluvial Montano Bajo Tropical, Bosque Muy Húmedo Montano Bajo Tropical, Bosque Muy Húmedo Premontano Tropical, Bosque Pluvial Premontano Tropical y Bosque Húmedo Premontano Tropical. Predominando las de Bosque Húmedo a muy Húmedo.

Los suelos predominantes son inceptisoles y entisoles, derivados de cenizas volcánicas al oeste y noroeste de la cuenca, derivados de rocas sedimentarias, intrusivas y basálticas del terciario en las estribaciones de la cordillera de Talamanca, derivados de depósitos laháricos en el área de piedemonte de los volcanes Irazú y Turrialba y derivados de materiales aluviales y/o coluviales, presentes en las llanuras del norte y los valles intermontanos (León 1994).

En la parte media y alta de la cuenca, solo un 14 % del área tiene capacidad de uso agrícola (clases I a IV), pero si se incluye la clase VI (apta para cultivos perennes y reforestación comercial), esa cifra sube a un 26 %. El resto del área debería estar bajo cobertura forestal, pero uso actual demuestra que existe un 37 % del área dedicada a actividades agropecuarias (PREVDA 2008).

Mientras que en la parte baja de la cuenca un 35 % aproximadamente tiene capacidad de uso agrícola. El resto del área debería estar bajo cobertura forestal permanente y bajo régimen de área silvestre protegida o parque nacional (PREVDA 2008).

3.1.2 Descripción demográfica

En 1984 el total de habitantes de la zona era de 210.9, en 1997 de 325.7, con un crecimiento promedio anual de 8.8 personas, y una proyección para el 2015 de 607.8 habitantes (Sogreah Ingenierie SNC *et al.*1999a).

El sector sur de la cuenca se encuentra poco poblado, mientras el sector norte se encuentra muy poblado y explotado económicamente. Actualmente casi toda el área de la cuenca, con excepción de la zona sur, está siendo utilizada para fines agropecuarios, industriales y residenciales. Las mayores densidades y crecimientos de población se presentan en los cantones de Cartago, Paraíso, Oreamuno, Jiménez, Cot, El Carmen, Guadalupe y parte de Turrialba colocando a la cuenca como una de las más pobladas (Sogreah Ingenierie SNC *et al.*1999a). La estructura familiar está compuesta por los cónyuges y los hijos solteros, con un tamaño promedio de 4.68 personas por familia (PREVDA 2008).

Con respecto a las viviendas un 96.2 % están ubicadas en zonas eminentemente rurales. El 98 % de las viviendas cuentan con servicio sanitario exclusivo y el 92.70 % tienen tanque séptico (González y Poltronieri 2002).

Un 43.20 % de las viviendas de la cuenca y un 62 % de los locales comerciales y de servicios de la cuenca, se abastecen de agua potable por medio de acueductos comunales o municipales. Las fuentes de agua que se utilizan para las labores de la finca provienen en un 68 % de quebradas o nacientes, solamente en un 12.56 % de los casos el agua proviene de cañería municipal (González y Poltronieri 2002).

3.1.3 Descripción socioeconómica

En la cuenca del río Reventazón, con un 3 % de la extensión del país, se produce el 11 % del valor total de las exportaciones de productos agrícolas del país, el 38 % de la energía hidroeléctrica y el 50 % de la producción de cemento. El 50 % del agua que consume el área metropolitana de San José (fuera de la zona) es producida en la cuenca (Arce 2004). Además aporta a la economía nacional más del 85 % de la producción de papa y cebolla. Así como el 30 % de la leche y carne a escala nacional. (UMCRE y MAG 2000; UIPRE, 2001). Es una región próspera, comparada con otras zonas agrícolas de Costa Rica (PREVDA 2008)

La preparación del suelo en las áreas hortícolas está dominada por el uso de arados de disco y rotador dos veces al año, se usa la labranza en diagonal o a favor de pendiente al final de la época seca, con condiciones no apropiadas de humedad del suelo, destruyéndose la estructura del suelo con la pulverización de la capa labrada y la compactación de la capa subyacente (Sogreah Ingenierie SNC *et al.* 1999a), donde la zona norte de la cuenca se ha identificado como la mayor productora de sedimentos, con un total de 70 %, debido principalmente al uso inadecuado de los suelos y la carencia de prácticas y técnicas de conservación de los mismos (UIPRE, 2001).

En la zona de estudio se ha dado un proceso de fraccionamiento de la propiedad donde a partir de 1978 se segregaron algunas fincas ganaderas, para ser convertidas en fincas familiares destinadas a la producción comercial de hortalizas, con tamaños promedio entre 1 y 2 ha (fincas adjudicadas por el IDA), y desde 1990, con la caída de los precios del café y la apertura de los mercados, la actividad agrícola se ha vuelto más intensiva y mecanizada, con énfasis en productos de alta rentabilidad como hortalizas, ganadería de leche, flores y plantas ornamentales para exportación, y hacia la diversificación con actividades tales como comercio, turismo, industria y servicios (Sogreah Ingenierie SNC *et al.*, 1999a).

Actualmente, el fenómeno de poblamiento sumado al proceso de fraccionamiento de la propiedad en la cuenca, genera presión sobre la frontera agrícola, por cuanto los alrededores de Cartago, Paraíso, Cot y Turrialba ya no tienen capacidad de expandirse y pueden llegar a niveles insostenibles para la economía familiar, máxime si no están acompañados de procesos de capacitación y desarrollo tecnológico (Sogreah Ingenierie SNC *et al.*, 1999a).

3.2 Método

La metodología propuesta incluyó un procedimiento de evaluación lógico para determinar la aptitud física y económica de un área específica y su variación a consecuencia de los cambios climáticos. Por lo tanto se propone tres fases consecutivas que corresponden al cumplimiento de los objetivos planteados (Figura 2):

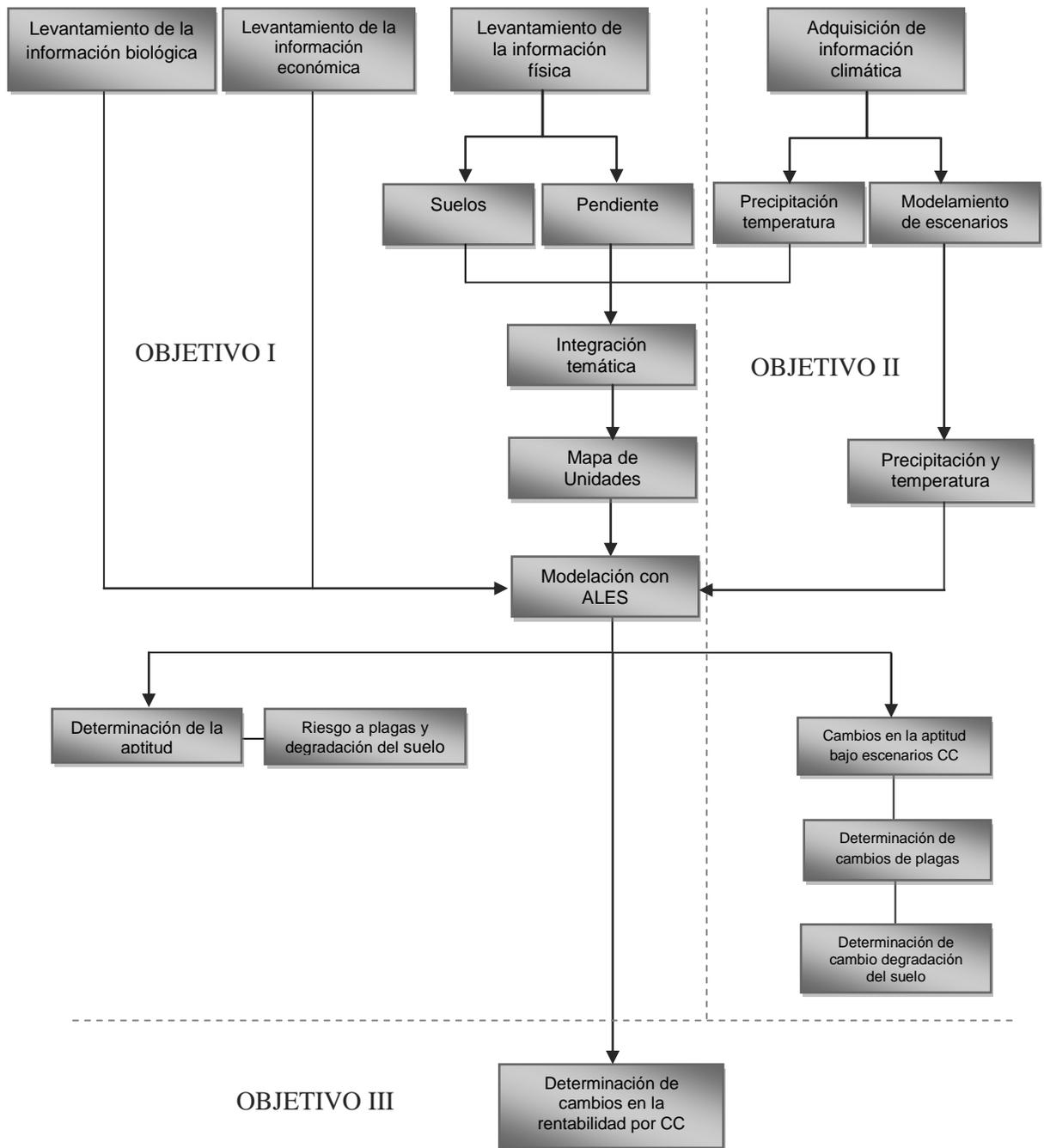


Figura 2. Esquema metodológico para determinar la aptitud bajo escenarios de cambio climático

3.2.1 Ojetivo I: Determinación espacial de las zonas de aptitud del cultivo de la papa mediante un sistema automatizado de evaluación de tierras ALES-FAO

Para el desarrollo eficiente del modelo de evaluación de tierras, es de vital importancia la elaboración de una base datos y de conocimientos, y por tanto la recopilación de toda la información pertinente:

A. Levantamiento de información física

Se recabó la información cartográfica base, de importancia fundamental para la delimitación de las unidades de mapeo, así como la información sobre características agroclimáticas de la zona y de los suelos. Para la información cartográfica con base en suelos con sus rasgos físico-morfológico-químicos y el modelo de elevación digital de 30 metros del proyecto SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de la NASA fue adquirida a través del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza-CATIE. A su vez, se adquirió la información base de capacidad de uso del suelo elaborado por el Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible-ProDUS-UCR a escalas 1:50000.

B. Levantamiento de información biológica

Para el levantamiento de la información biológica se recurrió a fuentes secundarias y consulta a expertos. Se consideró expertos a profesionales especialistas con un nivel considerable de experiencias en investigaciones sobre el tema y desempeño laboral en la zona de estudio. Se identificaron 35 expertos de diferentes instituciones y centros de investigación (CATIE, Instituto Nacional de Tecnología Agraria-INTA-MAG, agencia Pacayas, Tierra Blanca, Llano grande, central de Cartago y MAG San José, ect.), para obtener sus juicios de valor, opiniones y conocimientos del manejo de plagas y del cultivo. Se utilizó una ficha semi-estructurada con la finalidad de obtener los RUT óptimos y sus limitantes del cultivo y de las plagas en estudio. Esta consulta se realizó en dos fases, una previa o exploratoria con la finalidad de determinar los RUT, con sus cualidades y sus limitantes (Cuadro 2).

A su vez, con la ayuda del conocimiento de los expertos se determinó los niveles de riesgo tanto para *T. solanivora* y *P. infestans*: La clase A1 presenta un riesgo bajo (RB), A2 riesgo medio (RM) y A3 riesgo alto (RA).

Cuadro 2. RUT y CAT para T. solanivora y P. infestans

| Nivel de severidad | RUT <i>Tecia solanivora</i> | | | RUT <i>Phytophthora infestans</i> | |
|--------------------|-----------------------------|------------------|--------------|-----------------------------------|------------------|
| | Características CAT | | | Características CAT | |
| | Temperatura °C | Precipitación mm | Altitud msnm | Temperatura °C | Precipitación mm |
| Baja | 0-15 | - | 0-1000 | 0-16 | 0-400 |
| Media | - | - | - | 16-26 | 400-1000 |
| Media baja | 15-20 | - | 1000-2500 | - | - |
| Media alta | 20-25 | - | 2500-2800 | - | - |
| Alta | 25-40 | - | 2800-700 | 26-40 | 1000-7000 |
| Baja 1 | - | 0-500 | - | - | - |
| Media 1 | - | 500-700 | - | - | - |
| Alta | - | 700-1200 | - | - | - |
| Media 2 | - | 1200-1400 | - | - | - |
| Baja 2 | - | 1400-7000 | - | - | - |

De igual manera se levantó información relacionada al riesgo por degradación del suelo, a través de consulta a expertos de Instituto Nacional de Tecnología Agrícola-INTA, ICE y CATIE. Se determinaron los requerimientos y sus características que definen el nivel de riesgo en las zonas de aptitud, es así que la clases A1 representa un riesgo bajo (RB) A2 riesgo medio (RM) y A3 presenta un riesgo alto (RA). (Cuadro 3).

Cuadro 3. RUT y CAT para riesgo a degradación del suelo

| Nivel de severidad | RUT- Riesgo Degradación del suelo | | |
|----------------------|-----------------------------------|---------------|---------|
| | Características CAT | | |
| | Precipitación (mm) | Pendiente (%) | Textura |
| Baja | 0-300 | - | - |
| Media | 300-800 | - | - |
| Alta | 800-8000 | - | - |
| Plano | - | 0-8 | - |
| Ligeramente ondulado | - | 8-15 | - |
| Moderadamente plano | - | 15-30 | - |
| Fuertemente ondulado | - | 30-60 | - |
| Escarpado | - | 60-3000 | - |
| Gruesa | - | - | Gruesa |
| Media | - | - | Media |
| Fina | - | - | Fina |

C. Levantamiento de información económica

Para el levantamiento de la información económica se usó información secundaria del MAG a través de los avíos actualizados al 2010 y del Banco Nacional de Costa Rica para actualizar el valor de la tasa de interés. El avío de papa consta de los costos detallados por rubros de inversión para la producción de una hectárea de papa así como rendimiento estimado (MAG 2010). (Anexo 13).

D. Levantamiento de información climática

Para determinar la información del clima se usó la base de datos de clima mundial WORLDCLIM (2008) que ofrece promedios para parámetros climáticos en formato raster para condiciones actual y escenarios futuros A2 y B2, para los años 2050 y 2080, así para los modelos HadCM3 y CSIRO con una resolución de 1 km² o 30 arc-segundos, las cuales se pueden usar para modelar espacialmente en un Sistema de Información Geográfica (Hijmans *et ál* 2005). Para la climatología actual se obtuvieron datos promedios mensuales de precipitación, temperaturas máximas, medias y mínimas como variables principales de entrada del modelo (Lugo *et ál* 1999).

Para el clima futuro se obtuvieron los datos promedios mensuales de precipitación, temperatura máxima y mínima, de los datos obtenidos se extrajo la climatología para los meses que concierne al ciclo de la papa (mayo, junio, julio y agosto) luego fueron proyectados para Costa Rica, a su vez, cortados para trabajar con la información correspondiente a la cuenca alta del río Reventazón. Con respecto a la temperatura media del clima futuro, no se encuentra en la base de datos de clima mundial WORLDCLIM. Para determinar esta variable, se procedió a sumar las capas de las temperaturas mínimas y máximas para cada mes, para esta operación se agenció del programa ArcGis 9.3.1 a través de la función Spatial Analyst y luego Raster Calculator para generar: $\text{Float} [(temperatura\ mínima_mayo) + (temperatura\ máxima_mayo)]/2 = \text{Promedio mes de mayo}$, de la misma manera se hizo para los meses de junio, julio y agosto.

Como siguiente paso se determinó el promedio de las temperaturas y precipitaciones para todo el ciclo de la papa a través de: $\text{Float} [(precipitación_mayo) + (precipitación_junio) + (precipitación_julio) + (precipitación_agosto)]/4 = \text{Precipitación del periodo}$.

$\text{Float} [(temperatura\ media_mayo) + (temperatura\ media_junio) + (temperatura\ media_julio) + (temperatura\ media_agosto)]/4 = \text{Temperatura media del periodo}$.

E. Integración temática

Se generó un mapa Hipsométrico a través del MED a partir de ello se sobrepusieron los mapas de suelos, capacidad de uso, pendientes y clima para generar una base de datos integrada. Como resultado de la integración temática con la ayuda del programa ArcGis 9.3.1

y ArView 3.3 se obtuvo 1302 unidades cartográficas o unidades de mapeo homogéneos (FAO 2008). A estas unidades cartográficas se le atribuyeron características físicas y químicas del suelo. Estos datos fueron extraídos de los datos de evaluación del manual descriptivo del mapa de asociaciones de sub-grupos de suelos de Costa Rica actualizado en 1986 por la Oficina de Planificación Sectorial Agropecuaria-MAG. Para atribuirle el nivel de pendientes se elaboró un mapa de pendientes con base en un mapa digital de curvas de nivel de 30 m otorgado por (ProDus 2010), del mismo modo se le atribuyó las variables climáticas actuales de (temperatura máxima, media, mínima y precipitación) de la base de datos Worldclim con un horizonte de tiempo de 1950-2000 y con una resolución de 1 km² o 30 arco segundos (Tyndall Center 2005). La información se ajustó sobre cuatro imágenes satélite ASTER 2007 (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) con una resolución espacial de 15 metros y resolución espectral de 9 bandas. La proyección utilizada es CRTM 05 Datum WGS-84.

F. Modelación con ALES

El desarrollo de esta fase se basó en una adaptación del proceso de evaluación de tierras para determinar las clases de aptitud propuesto por Rossiter (1994) (Figura 3). Este proceso parte de comparar la oferta (características de la tierra expresadas en cualidades) de los recursos de la tierra (biofísica y socioeconómica), con la demanda la cual está expresada por los requisitos o requerimientos del TUT, que son las condiciones de la tierra necesarias para la implementación exitosa y sustentable de un TUT en estudio (FAO 2008). Para la evaluación se utilizó el método de **abajo-arriba** (“bottom-up”) y el **intermedio** (“middle-out”) (Rossiter 1990), por ser los más apropiados a los objetivos y a la estructura del trabajo. El primer método se utilizó para manejar la información disponible en las bibliotecas, base de datos, informes anuales y otros. El método intermedio se utilizó para completar el mínimo de información requerida, en este caso se realizaron consultas a expertos y visitas a las unidades cartográficas en el campo.

G. Generación del tipo de uso de la tierra (TUT)

El TUT está referido al cultivo de la papa asociados a riesgo a plagas y degradación de la tierra. El TUT considerado en la presente evaluación fue seleccionado con base en los siguientes criterios: **1.** Presencia del TUT en la zona evaluada, **2.** Disponibilidad de

información, **3.** Superficie de la zona de estudio, **4.** Importancia del cultivo en mundo (tercer cultivo de importancia mundial después del trigo y el arroz), **5.** Importancia en la zona de estudio y el país (se produce el 85 % de papa para el país y la cuenca de mayor importancia), **6.** Sensibilidad a plagas, **7.** Zona de estudio donde se produce el 85 % de papa en Costa Rica es sumamente susceptible a degradación del suelo, **8.** Sensibilidad a posibles cambios en su sistema productivo asociados al cambio climático y plagas.

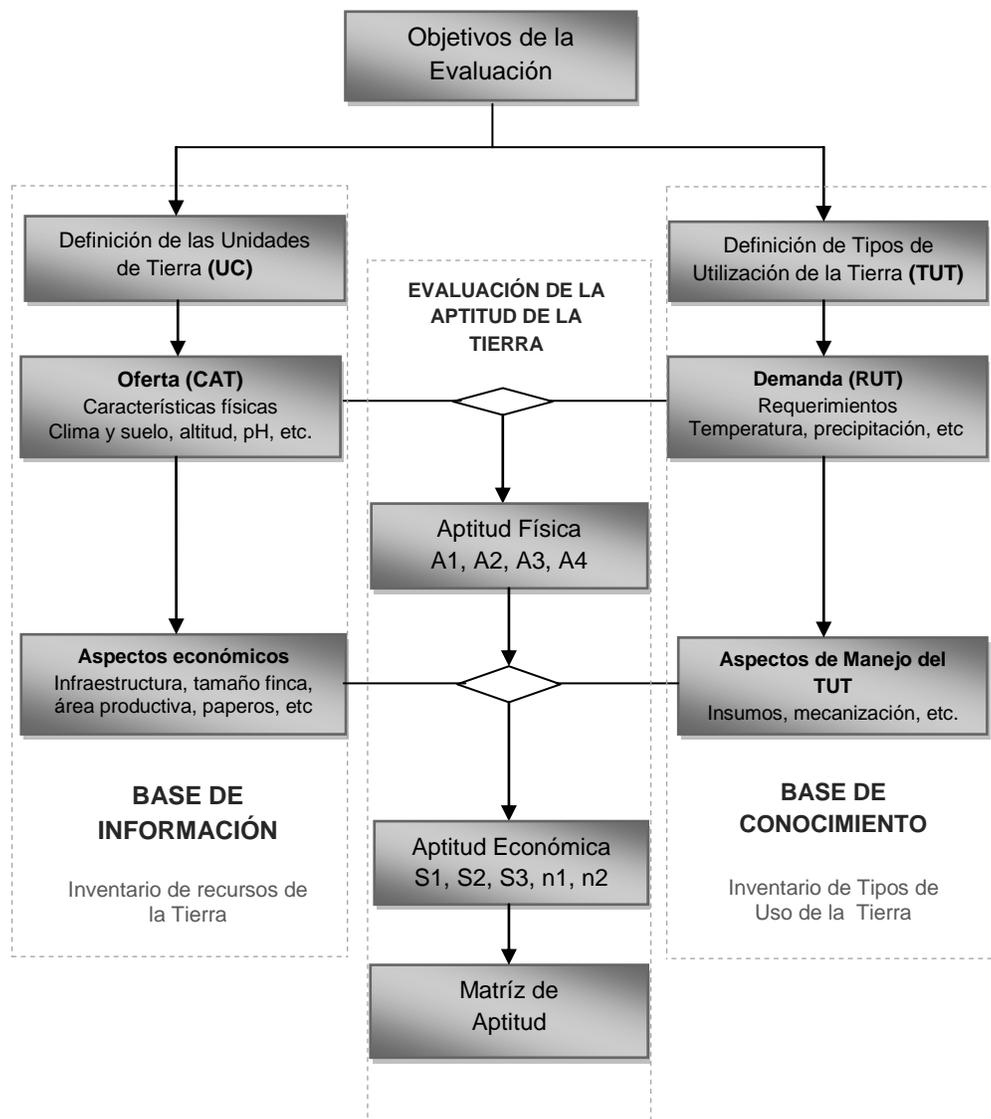


Figura 3. Esquema de funcionamiento del Sistema Automatizado de Tierras-ALES (Arze 2000)

H. Generación de las características de la tierra y los requerimientos de uso de la tierra

Para generar las características de la tierra (CAT) y los requerimientos del uso de la tierra (RUT) se aplicó la metodología “**Intermedia**” que consta, en consultas a expertos, para tal efecto se identificó y seleccionó un grupo de expertos a nivel nacional, con 10 a 30 años de experiencia en el tema y trabajo en la zona de estudio de los cuales 26 con experiencias en el manejo del cultivo y 8 especialistas con experiencia en plagas y enfermedades. Para seleccionar adecuadamente las CAT y los RUT se tomaron en cuenta los siguientes criterios: **1.** la importancia para el uso; **2.** la existencia de valores críticos en la zona de estudio; **3.** disponibilidad de los datos; **4.** disponibilidad de conocimiento (Rossiter 1995).

La selección de las CAT y los RUT se realizaron mediante dos consultas a expertos, una primera con la finalidad de extraer datos sobre requerimientos y características de manera genérica. Previo a la segunda consulta se aplicó el método de “**arriba-abajo**” (FAO 1976 y León 1994, Camas 1995, Rodas 1996, Vallejos 1997, Jarquin 2000, Parrado 2004, Bautista 2005), el cual consiste en una revisión muy detallada de las características y requerimientos como así sus limitaciones del cultivo en estudio, esta revisión detallada se realizó en las bibliotecas Orton-CATIE, Universidades-UCR, UNA, biblioteca MAG, Journal especializados, Internet, etc.

Después del proceso de investigación y consulta se definió una ficha final con sus CAT y RUT (Cuadro 4) para ser validado por los expertos en la segunda consulta. Para la validación de la ficha final solamente se consultó a 10 expertos. Los RUT que se consultaron fueron medidos mediante juicios de valor, jerarquizando una o más características de la tierra (Rossiter *et al* 1995).

Igualmente para evitar la sobrestimación, la literatura recomienda no se debe incluir más de una vez la misma CAT en diferentes RUT, principalmente por que los árboles de decisión son más fáciles de construir y entender por el usuario y evaluador (Rossiter *et al* 1995), en este sentido solo se consideraron los requisitos que planteaban diferencias y limitaciones para el desarrollo del cultivo a evaluar entre las UC por ejemplo los RUT que definen el clima fueron determinados por los expertos consultados y por la revisión de estudios de evaluación de tierras, a su vez para cada RUT seleccionado se asignó un número

de niveles de aptitud para cada cualidad, se asignó 4 clases: Apta, Moderadamente Apta, Marginalmente Apta y No Apta (FAO 1976 y León 1994, MAG 2000).

Cuadro 4. RUT y CAT por niveles de severidad para el cultivo de la papa

| Cualidades de la tierra (RUT) | Característica de la tierra (CAT) | Unidades (CAT) | Niveles de Severidad | | | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------|----------------------|---------------------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Humedad disponible | Drenaje | Clase | Lento | Moderado | Bueno | Mod. Excesivo | Excesivo |
| | Textura | Clase | Gruesa | Media | Fina | - | - |
| Disponibilidad de nutrientes | CIC | meq/100gr | Bajo | Medio | Alto | - | - |
| | | | 0-5 | 5-20 | 20-100 | - | - |
| | pH | % | Bajo | Medio | Alto | - | - |
| | | | 0-5.5 | 5.5-6 | 6.5-8 | - | - |
| MO | % | Bajo | Medio | Alto | - | - | |
| | | 0-3 | 3-10 | 10-50 | - | - | |
| Condición de enraizamiento | Profundidad del suelo | cm | Superficial | Mod. Superficial | Mod. profundo | Profundo | Muy profundo |
| | | | 0-10 | 10-40 | 40-90 | 90-120 | 120-600 |
| | Pedregosidad | % | Sin Pedregosidad | Poco Pedregosidad | Pedregoso | Muy Pedregoso | Excesiva. Pedregoso |
| | | | 0-5 | 5-15 | 15-25 | 25-65 | 65-100 |
| Capacidad de laboreo | Pendiente | % | Plano | Ligeramente Ondulado | Mod. Ondulado | Fuertemente Ondulado | Escarpado |
| | | | 0-8 | 8-15 | 15-30 | 30-60 | 60-300 |
| | Pedregosidad | % | Sin Pedregosidad | Poco Pedregosidad | Pedregoso | Muy Pedregoso | Excesiva. Pedregoso |
| | | | 0-5 | 5-15 | 15-25 | 25-65 | 65-100 |
| Requerimiento de Potasio | K | Meq/100gr | Muy Bajo | Bajo | Óptimo | Alto | Muy Alto |
| | | | 0-0.12 | 0.12-0.23 | 0.23-0.33 | 0.33-0.38 | 0.38-0.50 |
| Relación Magnesio -Calcio | RelCaMg | Meq/100gr | Baja | Media | Alta | - | - |
| | | | 0-2.5 | 2.5-3.5 | 3.5-10 | - | - |
| Req. Temperatura Máxima | Temperatura Máxima | °C | Apto | Mod. Apto | Crítico | No Apto | - |
| | | | 10-22 | 22-25 | 25-27 | 30-40 | - |
| Req. Temperatura Media | Temperatura Media | °C | Baja | Mod. Baja | Óptima | Mod. Óptima | Alta |
| | | | 0-8 | 8-16 | 16-20 | 20-22 | 22-40 |
| Req. Temperatura Mínima | Temperatura Mínima | °C | No Apto | Muy Crítico | Crítico | Apto | No Apto |
| | | | 0-2 | 2-4 | 4-8 | 8-15 | 15-50 |
| Requerimiento de Elevación | Elevación | msnm | Muy Bajo | Bajo | Óptimo | Mod. Óptimo | Muy Alto |
| | | | 0-1000 | 1000-1200 | 1200-2800 | 2800-3400 | > 3400 |
| Precipitación del ciclo | Precipitación | mm | Muy Baja | Baja | Óptima | Alta | Excesiva |
| | | | 0-200 | 200-400 | 400-1000 | 1000-1500 | 1500-7000 |

Con respecto a las cualidades de la tierra se sabe que es imposible medirlos en un estudio; por lo que se recomienda sea inferido con las características de la tierra en los árboles de decisión. En este estudio, la evaluación de la degradación del suelo, se infirió con las características de precipitación, pendiente y textura del suelo o para evaluar riesgo por *P. infestans*, se infirió con las características de temperatura media y precipitación (Cuadro 5) (León 1994, Rossiter 1995, Pimentel 2009, Cruz 2002).

Para evaluar la aptitud del cultivo de la papa se construyó un solo modelo que corresponde al TUT en estudio, considerando los requisitos biofísicos y económicos, utilizando el programa ALES. De la confrontación de las CAT y los RUT se obtuvieron las evaluaciones de la tierra en términos de aptitud física y económica.

En este estudio se evaluó la aptitud física de una cualidad de la tierra mediante dos métodos: la elaboración de árboles de decisión y por la limitación máxima (León 1984, Vallejo 1997, Cruz 2002, FAO 2008, Pimentel 2009). Por medio del diseño de los árboles de decisión, se determinaron los niveles de severidad de los RUT a partir de las CAT. Por ejemplo para riesgo por *P. infestans* se midió en tres niveles (Baja, Media y Alta), con base a las características de temperatura medias (3 clases) y precipitación (3 clases).

Cuadro 5. Esquema de un árbol de decisión por riesgo a P. infestans

| Nivel de la cualidad Papa Secano 2010 Temp_pl (Temperatura Tizón) | RiTizón |
|--|---------|
| Ba (Baja) [0-16 Grados centígrados] > Prec_pl Precipitación Tizón | |
| B (Baja) [0-400mm].....: 1 | |
| M (Media) [400-1000mm]..: 2 | |
| A (Alta) [1000-7000mm].....: 3 | |
| Me (Media) [16-26 Grados centígrados] > Prec_pl Precipitación Tizón | |
| B (Baja) [0-400mm].....: 2 | |
| M (Media) [400-1000mm]..: 3 | |
| A (Alta) [1000-7000mm].....: 3 | |
| Alt (Alta) [26-40 Grados centígrados] > Prec_pl Precipitación Tizón | |
| B (Baja) [0-400mm].....: 1 | |
| M (Media) [400-1000mm]..: 2 | |
| A (Alta) [1000-7000mm].....: 3 | |

El método de la limitación máxima, se aplicó mediante un formato en matriz, con filas (características) y columnas (aptitud de las características), donde la cualidad se define con base al valor más limitado. Por este método no se tomó en cuenta las interacciones entre las características evaluadas (Rossiter 1995).

Después de las confrontaciones entre las CAT y los RUT, se determinaron la aptitud y se establecieron diferencias entre clases y subclases de aptitud física. Las clases se usaron para expresar la aptitud física. Dentro de cada clase de aptitud se definieron las subclases, con el fin de designar el tipo de limitación, por medio de las cuales se ubica una unidad cartográfica en una clase determinada. Se definieron cuatro niveles de aptitud para el TUT evaluado los cuáles son:

- **A1:** Apto, para unidades de tierra que cumplen con los requisitos óptimos para el desarrollo y aptitud del TUT en estudio.
- **A2:** Moderadamente Apto, se consideran aquellas tierras que tiene una o dos limitantes para el desarrollo o aptitud del TUT en estudio.
- **A3:** Marginalmente Apto, con tres limitantes para la aptitud física o los niveles de severidad de los RUT son críticos.
- **A4:** No Apto, para unidades con más de tres limitantes o un nivel crítico del RUT.

Las matrices resultantes, de la evaluación en ALES se exportaron en formato “CSV” e importaron en el programa Excel, las cuales fueron agregadas a la tabla de las UC mediante la función “Join and relate” en ArcGis 9.3.1, con la finalidad de generar los mapas de aptitud potencial para el TUT en evaluación. Como primer paso se determinaron las aptitudes por variables climáticas independientemente por (temperatura máxima, media, mínima y precipitación), como segundo paso se determinó la aptitud climática considerando la interrelación de todas las variables climáticas con la finalidad de generar un mapa de aptitud climática, a su vez, se determinó la distribución geográfica de las áreas con riesgo a plagas (*P. infestans* y *T. solanivora*) y riesgo a degradación del suelo.

Finalmente se generó un mapa de aptitud final donde interactúan todas las variables considerándose el factor suelo y clima, como resultado se obtuvo un mapa de aptitud final por clases y otro por subclases con el objetivo de apreciar sus limitaciones (Figura 4).

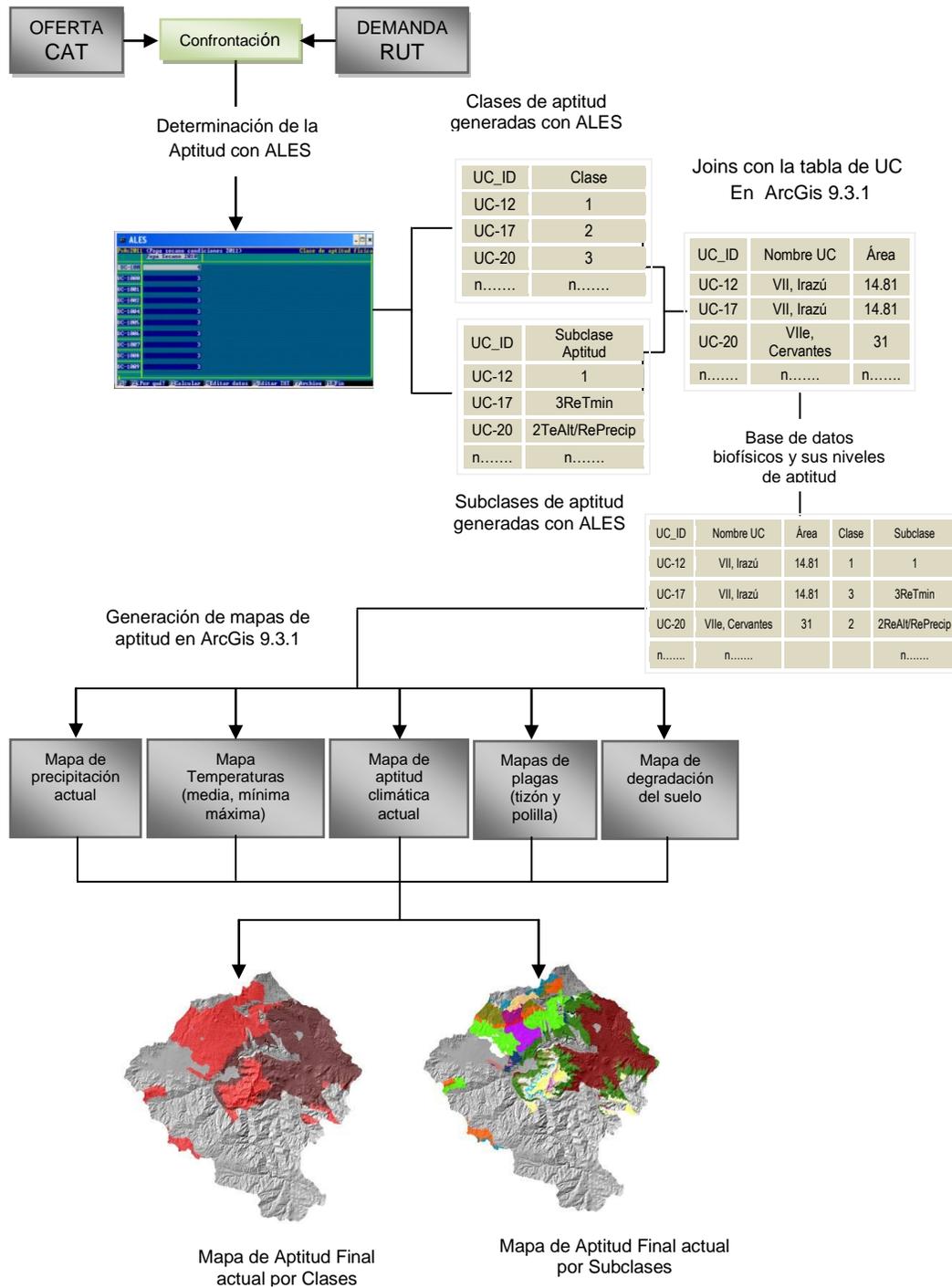


Figura 4. Esquema de generación de mapas de aptitud a partir de ALES

3.2.2 Objeto II: Determinación de los cambios en la distribución espacial de las zonas de aptitud del cultivo de la papa, bajo cambio climático

A. Modelación de escenarios futuros de clima

Para el presente trabajo de investigación se utilizaron dos modelos, HadCM3 y CSIRO. El HadCM3 es un modelo oceánico-atmosférico acoplado, desarrollado en el Centro Hadley del Reino Unido, usa una rejilla de 2.5° x 3.75°, que equivale a crear celdas de unos 400 x 270 km, considera la atmósfera dividida en 19 capas y el océano en 20 más (IPCC 2007).

Un estudio sobre escenarios de cambio climático elaborado por el IMN (1999) concluyó que el modelo inglés HadCM3, comparado con otros siete modelos, fue el que mejor representó el clima real de Costa Rica, por eso fue seleccionado para la preparación de los mapas de distribución potencial futura de las zonas de aptitud para el cultivo de la papa, en contraste para una comparación entre escenarios de cambio se seleccionó a su vez, el modelo de Circulación General del CSIRO de origen australiano; que incorpora los componentes más importantes de los sistemas climáticos, incluyendo la atmósfera, los océanos, la criósfera y la biósfera, usa una cuadrícula de unos 150 km de lado y considera a la atmósfera en 18 capas (IPCC 2007).

Se seleccionaron dos escenarios de emisiones A2 y B2 disponibles para los años 2050 y 2080, correspondientes a cada modelo, de la base de datos de WordClim (Cuadro 6).

Cuadro 6. Datos descriptivos de los escenarios de emisiones A2 y B2

| Escenarios | Crecimiento económico | Crecimiento poblacional | Cambio tecnológico | Emisiones CO2 |
|------------|---|-------------------------------------|--|--|
| A2 | Lento a nivel regional | Población en continuo crecimiento | Hay fragmentación entre regiones | Valores intermedios altos y que aumenten progresivamente |
| B2 | Intermedio; diferencias se dan a nivel local y regional hacia la sostenibilidad | Progresivo pero más lento que en A2 | Más diverso y lento aunque busca también soluciones locales de tecnologías limpias | Valores estables |

B. Determinación de los cambios en la distribución geográfica del TUT en estudio

A partir de la base de datos que se utilizó para generar los mapas de distribución actual potencial de las zonas de aptitud para el cultivo de la papa; se generaron los mapas de cambio de distribución espacial de las zonas óptimas futuras. En la base de datos actual donde cada UC contienen las CAT suelo y clima; se hizo una modificación de las variables que definen el clima base por variables que definen el clima del futuro proyectados para los años 2050 y 2080 para dos escenarios de emisiones A2 y B2 de la base de datos de WorldClim.

La nueva base de datos con variables de cambio atribuidas a cada UC se volvió a evaluar dentro el modelo ALES generando de esta manera cambios en las clases de aptitud basados en la reducción o incrementos de las áreas con respecto al escenario base de aptitud para papa.

Los nuevos cambios en la aptitud se exportaron en formato de hoja electrónica Excel al ArcGis 9.3.1 con la finalidad de generar un “Joins and relates” con la tabla de las UC. Finalmente se generaron los mapas de cambios para las variables de clima que se evaluaron independientemente y mapas de cambio de aptitud climática, a su vez, se generaron mapas de aptitud final por clases y subclases bajo escenarios de cambio climático (Figura 5). A través de un modelo generado en ArcGis 9.3.1 (Anexo 10) se generó unas matrices de cambios entre las clases de aptitud generando pérdidas y ganancias netas de superficies.

C. Determinación de los cambios en la distribución geográfica de las áreas con riesgo a plagas y degradación del suelo

Para la generación de los mapas de cambio, por riesgos a plagas y degradación del suelo, bajo cambio climático, se determinó las variables que definen el riesgo, es así que (temperatura media y precipitación) para el caso de *T. solanivora*, para *P. infestans* (precipitación) y para degradación del suelo (precipitación en el ciclo). Estos cambios se realizaron en la base de datos actual con la finalidad de generar cambios al ser evaluados nuevamente con el modelo ALES. A partir de ello con la ayuda de ArcGis 9.3.1 se generaron los mapas de cambio con riesgo a plagas y degradación del suelo, para los escenarios de emisiones A2 y B2 bajo dos modelos climáticos HadCM3 y CSIRO.

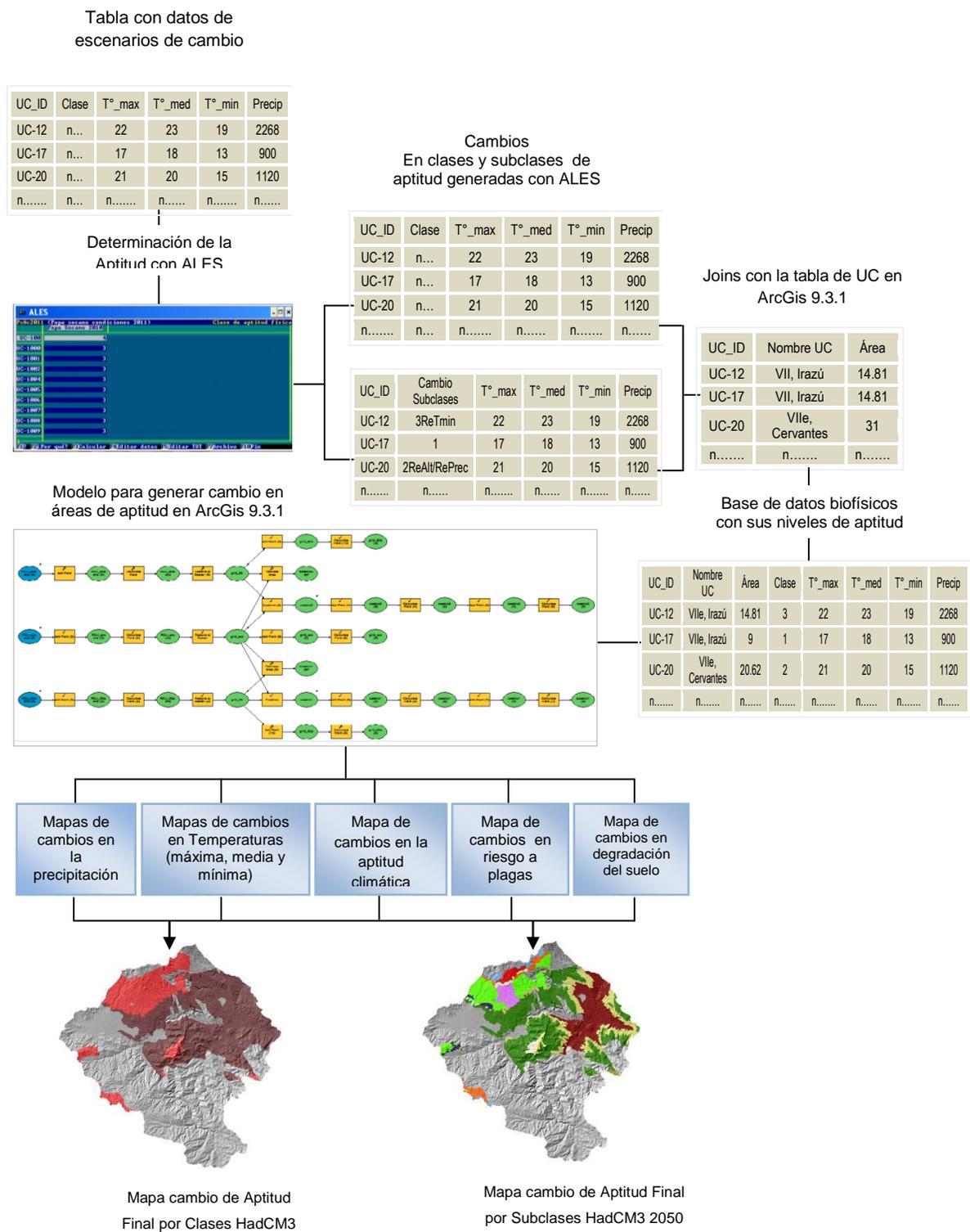


Figura 5. Esquema de los cambios en la distribución geográfica de las zonas de aptitud

3.2.3 Objetivo III: Determinación de los cambios de rentabilidad actual asociados al cambio climático.

ALES siempre, después de haber calculado la evaluación física, calcula una evaluación económica (FAO 2008). ALES no efectúa una evaluación económica en aquellas tierras ubicadas en la peor clase de aptitud física “n2” es decir físicamente no Apta para el TUT (Rossiter 1995).

Para este estudio se determinó un rendimiento óptimo para el TUT, basado en los ingresos y egresos caracterizados en los avíos del MAG con datos económicos actuales a Mayo 2010. Se elaboraron árboles de decisión para definir rendimiento proporcional según cada nivel de aptitud física del TUT (León 1984, Camas 1995 y Cruz 2002).

Sin embargo la evaluación requiere una comparación entre los beneficios y los insumos que se necesitan para el TUT en estudio. La tierra por sí misma no tiene un potencial productivo satisfactorio, sino que depende de una serie de insumos tales como semillas, agro-tóxicos, prácticas de conservación del suelo, etc. En ciertos casos la aptitud que se evalúa depende de la disponibilidad de los insumos.

Para este estudio se consideró incrementos en los costos de producción de papa por hectárea por nivel de aptitud para cada UC, ya que los rendimientos pueden ser reducidos por las limitaciones. Sin embargo las limitaciones para el TUT en estudio fueron compensadas completamente o parcialmente, mediante un incremento de insumos en los costos de producción. Los incrementos en los costos están expresados en el listado de insumos adicionales, para el escenario actual potencial y futuro (Anexo 14). Los incrementos asumidos en el estudio fueron establecidos para un año (recurrentes).

En ALES se especificó los costos para cada nivel de aptitud, siendo estos considerados como una opción de manejo. Por ejemplo: riesgo a degradación del suelo se puede compensar con prácticas de conservación del suelo, riesgo a plagas se puede compensar con un adecuado número de aplicaciones de agro-tóxicos.

Para degradación del suelo se consideró insumos adicionales por cada nivel aptitud: La clase A1 incrementó sus costos en la implementación de Siembra en cortorno, la clase A2 incrementó sus costos en la implementación de Barreras vivas y finalmente la clase A3

incrementó sus costos en la implementación de Gavetas de infiltración y Barreras vivas (Ver anexo 14).

Posteriormente se analizó el Margen Bruto (MB), definido como la diferencia entre los costos variables y retornos, en unidades de dinero por año (FAO 2008). Para la evaluación económica actual se determinó cinco clases de aptitud económica propuestas por la FAO: S1: Apta, S2: Moderadamente Apta, S3: Marginalmente Apta, n1: Físicamente no Apta, n2: Económicamente no Apta

A su vez, se evaluó el rendimiento actual para el cultivo de la papa. A través de los juicios de valor de los expertos se clasificó el rendimiento en rangos toneladas por hectárea en cuatro categorías: Alto (> 24 tn/ha), Medio (20 a 24 tn/ha), Bajo (18 a 20 tn/ha y Nulo (No Apto). Seguidamente se generó un mapa actual potencial de MB y rendimiento por clases, asociados al número de productores para cada clase económica. Posteriormente se generaron los mapas de cambio bajo dos escenarios de emisiones A2 y B2 para los horizontes 2050 y 2080. Estos cambios en la aptitud económica están en función a las variables que definen el clima y determinan las limitantes del cultivo en estudio. Por consiguiente se realizó una Análisis de Varianza (ANAVA) con la finalidad de determinar las diferencias estadísticas en rendimiento del área total que existen entre modelos y escenarios de emisiones con respecto al escenario actual potencial.

A su vez, se generó un análisis del Margen Bruto total, producción total y costos totales de toda el área productiva de papa en la cuenca del río Reventazón. Finalmente se generaron los cambios de rentabilidad en el Margen Bruto total, producción total y costos totales bajo escenarios de emisiones A2 y B2 hacia los años 2050 Y 2080 para los modelos climáticos HadCM3 y CSIRO.

4. RESULTADOS

4.1 Objetivo I: Determinación espacial de las zonas de aptitud del cultivo de la papa, mediante un sistema automatizado de evaluación de tierras ALES-FAO.

4.1.1 Caracterización de las unidades cartográficas

Previo a la evaluación de aptitud física, se obtuvieron 1302 unidades cartográficas (UC) homogéneas distribuidas en la parte alta de la cuenca del río Reventazón, con un área en total de 65,681.95 ha (657 km²) (Figura 6). La unidad con mayor superficie corresponde a la UC-966, IISe, Turrialba (15.6832 km²) y solamente 0.1 km² del área total representa a la UC-1545 IIISe, Tucurrique como la UC de menor superficie.

En el (Cuadro 7), se presenta las UC distribuidas por rango en función de sus áreas, donde se observa que el mayor número de UC (419) se encuentra en los rangos de 10 a 20 ha equivalente a 55 km² esto ocupa el 8 % del área total. El mayor porcentaje en superficie ocupan 107 UC distribuidas en rangos de 100 a 200 ha que equivale a 143 km².

Cuadro 7. Número de unidades cartográficas por rangos de áreas y porcentajes

| Rango área (ha) | Total área (ha) | Total área (Km ²) | Área (%) | Nº UC |
|-----------------|-----------------|-------------------------------|----------|-------|
| 10 - 20 | 6104 | 61 | 9 | 419 |
| 20 - 30 | 5513 | 55 | 8 | 225 |
| 30 - 40 | 5187 | 52 | 8 | 149 |
| 40 - 50 | 5120 | 51 | 8 | 114 |
| 50 - 60 | 5122 | 51 | 8 | 93 |
| 60 - 70 | 3466 | 35 | 5 | 54 |
| 70 - 80 | 2631 | 26 | 4 | 35 |
| 80 - 90 | 3402 | 34 | 5 | 40 |
| 90 - 100 | 2977 | 30 | 5 | 31 |
| 100 - 200 | 14334 | 143 | 22 | 107 |
| 200 - 300 | 5706 | 57 | 9 | 24 |
| 300 - 400 | 2126 | 21 | 3 | 6 |
| 400 - 500 | 465 | 5 | 1 | 1 |
| 500 | 1157 | 12 | 2 | 2 |
| 800 | 802 | 8 | 1 | 1 |
| 1568.32 | 1568 | 16 | 2 | 1 |
| Total | 657 | 657 | 100 | 1302 |

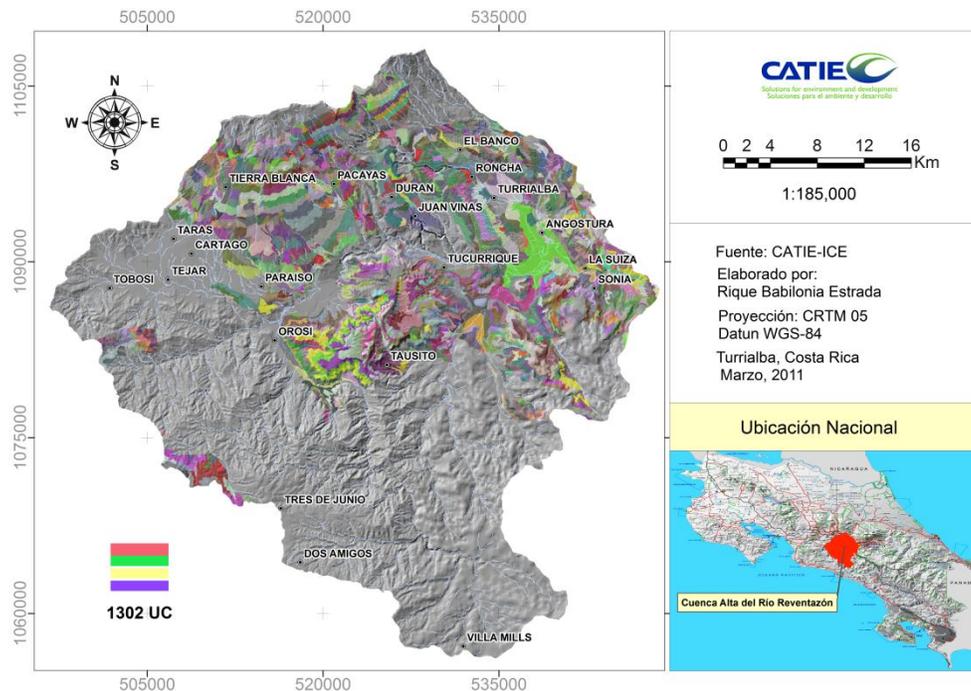


Figura 6. Mapa de las unidades cartográficas de la cuenca alta del río Reventazón

En general las UC en estudio están ubicadas entre los 435 a 3058 msnm con un rango aproximado de temperatura máxima que oscila entre 14 a 30 ° C, temperatura media entre 10 a 24 °C y una temperatura mínima que va desde los 6 ° hasta los 20 °C.

Con respecto a la precipitación, esta, oscila entre los 800 a 2268.59 mm/ciclo; este rango corresponde a los meses de mayo, junio, julio y agosto, meses en que los agricultores aprovechan las primeras lluvias de la época de invierno para sembrar papa. Considerando que en esta época de siembra, el cultivo de la papa requiere de un rango en precipitación de entre 400 a 1000 mm por ciclo para su mejor desarrollo en su periodo vegetativo; porque debajo o por encima de este rango óptimo el cultivo tiende a tener problemas fisiológicos asociados al riesgo de plagas como *P. infestans* y *T. solanivora* (León 1994, FAO 2008).

Las UC en estudio están distribuidas en los grupos de suelos: Andic Haplohumult-Typic Humitropept con un área de aproximado de (14870.70 ha) distribuidas en 281 UC, Lithic Troporthent-Typic Dystropept (2929.92 ha) distribuidas en 74 UC, Lithic Troporthent-Typic Troporthent (11808.51) distribuidas en 211 UC, Typic Dystrandepet (2467.04) distribuidas en 43 UC, Typic Dystropept-Fluvaquentic Eutropept (2502.85 ha) distribuidas en

20 UC, Typic Haplohumult (2475.36 ha) distribuidas en 62 UC, Typic Vitrandept-Lithic Dystrandept (6191.86 ha) distribuidas en 96 UC, Typic Vitrandept-Typic Dystropept (15646.79 ha) distribuidas en 379 UC, Ustic Humitropept (2746.14 ha) distribuidas en 54 UC) y Afloramientos rocosos (4042.78 ha) distribuidas en 82 UC (Anexo 18-A).

La UC más representativa en el área de estudio es la UC-966 Turrialba, esta unidad tiene un área de aproximadamente de 1568.32 ha (16 km²), pertenece al grupo de suelos Typic Dystropept-Fluvanquetic Eutropept, son suelos con pendiente de 8%, suelos moderadamente profundos (70 cm), tiene una textura fina con buen drenaje, Materia Orgánica (MO) de 3.6% con un pH de 5.75 y CIC elevado de 55.15. La temperatura media de esta UC oscila en 23°C con una precipitación de 1190.77 mm/ciclo, rango moderadamente apto para el cultivo de la papa.

La UC-12 Irazú es la unidad de mayor altura (3058 msnm) en la zona de estudio. Presenta valores promedios de temperatura media de 11 °C y una precipitación que oscila en 1028.92 mm durante el ciclo. El suelo que caracteriza a esta UC es Typic Vitrandept-Typic Dystropept suelo profundo (105 cm), texturas gruesas y buen drenaje con 7.10 % de MO y pH 6.45; según estas características que corresponden a esta UC el cultivo de la papa muestra sus limitaciones en cuanto a altitud y precipitación considerándose un nivel de aptitud por temperatura mínima (7 °C) y máxima (15 °C) de moderadamente apto.

4.1.2 Evaluación de la aptitud física actual del el cultivo de la papa

4.1.2.1 Determinación de la aptitud por variables climáticas

Los resultados de las evaluaciones realizadas con el ALES que se presentan en el (Cuadro 8) muestran las superficies cubiertas por un nivel de aptitud y sus rangos a partir de las variables climáticas de acuerdo a los requerimientos del cultivo. Para el caso de la variable precipitación se determinó tres niveles de aptitud (A1, A2 y A3) siendo el nivel más alto A1 (Apto) esta clase ocupa un área aproximado de 80 km² que representa el 12% del área total en estudio. A su vez, presenta un rango en precipitación que oscila entre 800 a 997 mm por ciclo, rango que se encuentra en el nivel óptimo de producción (400-1000 mm/ciclo).

El factor más restrictivo lo presenta la clase A4 por temperatura mínima con un rango de 15 a 20 °C rango que se encuentra por encima de los RUT del TUT en estudio. Esta clase prácticamente ocupa más de la mitad de la superficie estudiada 52 % (341 km²), sin embargo la clase A3 presenta a la temperatura media como el factor más restrictivo con un rango que oscila entre 25 a 30 °C rango que limita la tasa de formación y tuberización de los tubérculos (Hijmans 2003, FAO 2008).

Cuadro 8. Superficie por nivel aptitud climática por clases para el cultivo de la papa

| Variable | Superficie por nivel de Aptitud y rango de clima | | | | | | | | | | | |
|---------------|--|----|---------|-------------------------|----|-----------|-------------------------|----|-----------|-------------------------|----|-------|
| | A1 | | | A2 | | | A3 | | | A4 | | |
| | Área km ² | % | Rango | Área km ² | % | Rango | Área km ² | % | Rango | Área km ² | % | Rango |
| Precipitación | 80 | 12 | 800-997 | 525 | 80 | 1000-1498 | 52 | 8 | 1510-2268 | - | - | - |
| Temp máxima | 129 | 20 | 14-22 | 144 | 22 | 22-25 | 384 | 58 | 25-30 | - | - | - |
| Temp. media | 210 | 32 | 16-20 | 182 | 28 | 20-22 | 265 | 40 | 10-24 | - | - | - |
| Temp. mínima | 306 | 47 | 8-15 | 10 | 1 | 6-7 | | | | 341 | 52 | 15-20 |

En la Figura 7 se muestra la distribución de las clases de aptitud por variables climáticas independientemente evaluadas. La aptitud (A3) por temperatura máxima es la que muestra mayor restricción en 754 UC y representa el 58 % del área total estudiada. Sin embargo la aptitud determinada por la temperatura mínima restringe a 544 UC que representan el 52 % del área total estudiada.

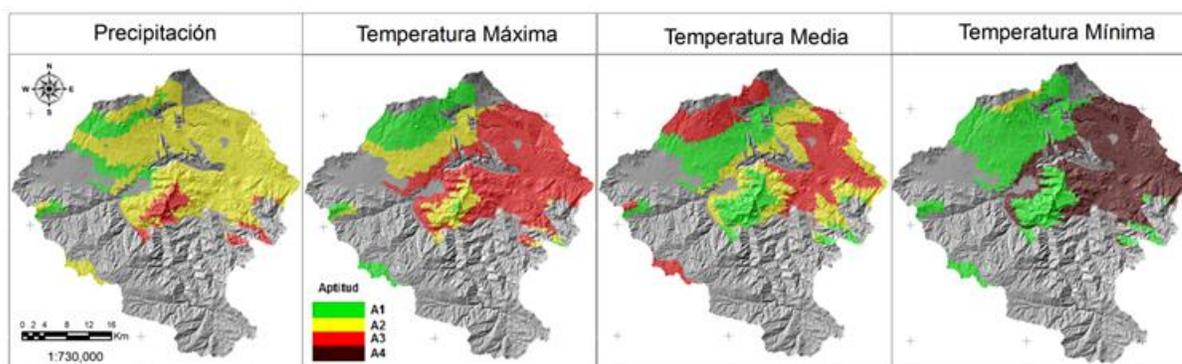


Figura 7. Mapas de aptitud determinadas por variables climáticas

4.1.2.2 Determinación de la aptitud considerando la interrelación de las variables climáticas por subclases

En la Figura 8 y el Cuadro 9, se muestran las áreas distribuidas en la zona de estudio con sus limitaciones por subclases para variables climáticas en estudio (precipitación, temperatura máxima, media y mínima), donde se observa que las áreas de mayor restricción en

la clasificación de escalas de aptitud es la clase A4 que muestra sus limitaciones por temperatura mínima (4ReTmin) esta subclase está distribuida en 673 UC que ocupa el 52 % (341.15 km²) del área total en estudio. El rango de la variable limitante de esta subclase oscila entre 15 a 20 °C rango que ALES determina como crítico permitiendo el no desarrollo del tubérculo (FAO 2008), estas UC están ubicadas en los rangos de altitud entre 435 (UC Pascua) hasta los 1351 msnm (UC Irazú).

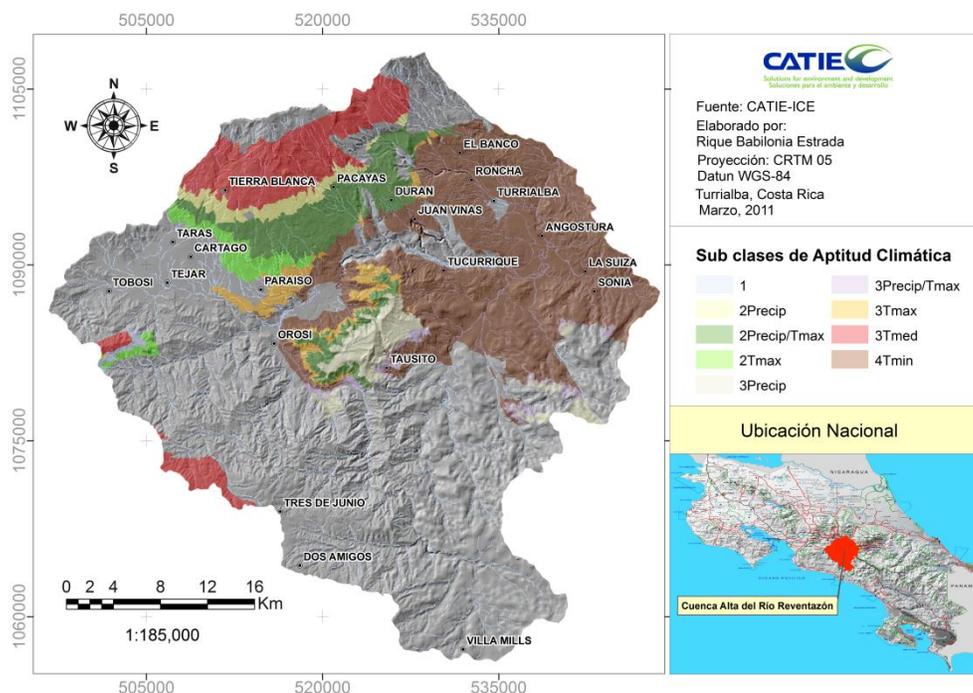


Figura 8. Mapa de aptitud climática para el cultivo de la papa por subclases

La subclase 3ReTmed agrupa a 233 UC que se encuentran limitadas por rangos inferiores a los óptimos que requiere el TUT en estudio. Este rango oscila entre 10 a 16 °C ocupa un área de 101.42 km² que representa el (15.4%) con respecto al área de estudio. Estas UC están ubicadas en un rango altitudinal desde los 1946 hasta los 3058 msnm.

Sin embargo la clase A2 es limitada por 2RePrecip/ReTmax con rangos en temperatura máxima que oscila entre 22 a 25 °C, si este este rango de temperatura media se presenta en el inicio de la fase de tuberización tiende a inhibir su crecimiento y formación de los tubérculos. A su vez, permite el incremento del riesgo a *T. solanivora* en la categoría de riesgo medio a alto. Para la misma clase 29 UC presentan limitaciones por precipitación ya que los rangos se

encuentran por encima de los RUT óptimos (1523-2147) esto hace que la presencia de *P. infestans*, tenga un riesgo alto. Solamente 6 UC de nombre La Selva agrupadas en 3.41 km² equivalente al 0.5 % del área total no muestran limitación alguna; por lo que el desarrollo de la papa es óptimo (A1).

Cuadro 9. Subclase de aptitud climática para el cultivo de la papa

| N° | Clase | Subclase | Área (km ²) | Área (%) | Rango variable limitante | | | |
|-------|-------|----------------|-------------------------|----------|--------------------------|---------|---------|---------|
| | | | | | RePrecip | ReTmax | ReTmin | ReTmed |
| 1 | A1 | 1 | 3.41 | 0.5 | - | - | - | - |
| 2 | | 2RePrecip | 20.64 | 3.1 | 1022 - 1264 | - | - | - |
| 3 | A2 | 2RePrecip/Tmax | 86.33 | 13.1 | 1003 - 1490 | 22 - 25 | - | - |
| 4 | | 2ReTmax | 24.05 | 3.7 | - | 22 - 25 | - | - |
| 5 | | 3RePrecip | 37.47 | 5.7 | 1511 - 2269 | - | - | - |
| 6 | A3 | 3RePrecip/Tmax | 12.19 | 1.9 | 1523 - 2147 | 25 - 26 | - | - |
| 7 | | 3ReTmax | 30.16 | 4.6 | - | 25 - 26 | - | - |
| 8 | | 3ReTmed | 101.42 | 15.4 | - | - | - | 10 - 16 |
| 9 | A4 | 4ReTmin | 341.15 | 51.9 | - | - | 15 - 20 | - |
| Total | | | 657 | 100 | | | | |

4.1.3 Determinación en la distribución actual de las áreas con riesgo de ataque de plagas y degradación del suelo

Los resultados que se muestran en el Cuadro 10 indican que la zona de estudio presenta condiciones meteorológicas adecuadas para el desarrollo de las plagas durante el ciclo vegetativo del cultivo. Para el caso de *T. solanivora* es una plaga que se puede adaptar a diferentes áreas ecológicas. Esto significa que se puede dispersar de las zonas altas donde actualmente está concentrada a zonas más bajas, donde la temperatura promedio se encuentra alrededor de los 25 °C (Nozt 1995).

La afirmación anterior demuestra, que *T. solanivora* está presente en toda la zona de estudio, donde la clase A2 tiene un RM (riesgo medio) con aproximadamente 166 km² con una temperatura que oscila entre 10 a 24 °C y un rango en altitud que demarca su presencia desde los 435 msnm hasta las UC que se encuentran alrededor de los 3058 msnm. Este nivel de aptitud está distribuido en 345 UC.

La clase A3 está determinada por 957 UC con un área aproximada de 491 km² esto representa el 75 % del área en estudio y la de mayor riesgo a esta plaga.

Cuadro 10. Superficie por clase de aptitud climática y riesgo a plagas y degradación de suelo

| Superficie por clase de aptitud | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-----------------|---|----------|-----------------|----|----------|-----------------|----|-----------|
| Riesgo | A1 | | | A2 | | | A3 | | |
| | Área | | Rango | Área | | Rango | Área | | Rango |
| | km ² | % | | km ² | % | | km ² | % | |
| <i>Tecia solanivora</i> | | | | | | | | | |
| Superficie | - | - | - | 166 | 25 | - | 491 | 75 | - |
| Temp. media | - | - | - | - | - | 10-24 | - | - | 13-23 |
| Precipitación | - | - | - | - | - | 948-2268 | - | - | 801-1735 |
| Altitud | - | - | - | - | - | 435-3058 | - | - | 550-2497 |
| Riesgo | - | - | - | - | - | Medio | - | - | Alto |
| <i>Phytophthora infestans</i> | | | | | | | | | |
| Superficie | - | - | - | 38 | 6 | - | 619 | 94 | - |
| Temp. media | - | - | - | - | - | 10-15 | - | - | 11-24 |
| Precipitación | - | - | - | - | - | 822-996 | - | - | 800-2268 |
| Riesgo | - | - | - | - | - | Medio | - | - | Alto |
| Degradación de suelo | | | | | | | | | |
| Superficie | 54 | 8 | - | 343 | 52 | - | 260 | 40 | - |
| Precipitación | - | - | 805-1379 | - | - | 822-1608 | - | - | 1000-2269 |
| Pendiente | - | - | 2-30 | - | - | 8-60 | - | - | 9-144 |
| Textura | - | - | Fi,Gr,Me | - | - | Fi | - | - | Fi,Gr,Me |
| Riesgo | - | - | Bajo | - | - | Medio | - | - | Alto |

Este riesgo hace que los paperos indiscriminadamente apliquen dosis más altas de plaguicidas, de lo adecuado, llegando a aplicar entre 17 a 27 aplicaciones de fungicidas por ciclo. Esta medida exagerada redundo en altos costos de producción (entre el 25-45 % del costo total) pero sobre todo en altos costos ambientales (Muller 1997) y de salud humana (MAG 1995, Gamboa 1998), considerándose al cultivo de la papa la hortaliza más contaminada de Costa Rica (MAG 2011) ya que en términos de ingrediente activo (i.a.) podrían utilizar entre 7 y 40 kg de i.a./ha/año (IRET-UNA, 2003), esto cataloga a Costa Rica como uno de los países que más uso hace de plaguicidas (Arbeláez y Henao, 2002; Castillo, 1997; de los Santos Sans-Bustillo *et al.*, 1997; Galvao, et al., 2002; García, 1997).

Sumado al problema anterior la mayoría de las tierras explotadas en este cultivo se ubican actualmente en terrenos con un relieve físico con pendientes superiores a 30° clasificándose estas tierras como marginales a no aptas para la producción de papa; por su alto riesgo a erosión del suelo; se estima en 100 tn/ha/año (equivalente a 1cm/año, densidad del suelo 1 Tm³) y en promedio 32 tn/ha/año; donde la pérdida del suelo se consolida como una limitante para el cultivo de la papa y se agudiza en temporadas de lluvias, sumadas al tipo de textura y manejo inadecuado de las tierras (ICE 2000).

En la Figura 9 se muestran tres clases de riesgo a degradación del suelo (A1, A2 y A3), donde la clase de aptitud A3 (Riesgo alto) ocupa un 40 % del área total con pendientes de 9 a 144% (ligeramente ondulada a escarpado) y con altas lluvias que oscilan entre 1000 a 2269 mm. Esta clase A3 está distribuída en 542 UC con un área total 260 km². Estas UC presentan texturas desde finas, medianas y gruesas. Siendo la textura gruesa (arenosa, arenosa franco fina y gruesa media) de mayor dominancia

Para este tipo de riesgo se debe incluir en el sistema de producción, prácticas de manejo de conservación de suelos (PASOLAC 2000), según el nivel de riesgo en las zonas de aptitud. Por tal razón para la clase A1 (Riesgo Bajo) siembra en contorno, clase A2 (Riesgo Medio) gavetas de infiltración y para la clase A3 (Riesgo Alto) barreras vivas, gavetas de infiltración y siembra el contorno. Actualmente los paperos no adoptan estas prácticas que ayuden a conservar el suelo y minimizen el riesgo a degradación del suelo.

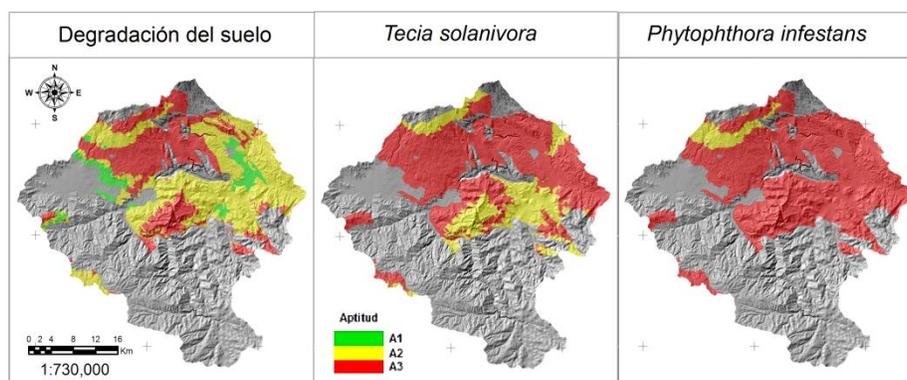


Figura 9. Mapas de riesgo a plagas y degradación del suelo en las zonas de aptitud

4.1.3.1 Determinación de la aptitud física actual potencial considerando la interrelación de todas las variables biofísicas

Las áreas de aptitud física por subclases de acuerdo a la interrelación de todas las variables se presentan en la Figura 10 y Anexo 1, estas subclases presentan la ausencia de UC con aptitud física A1 (Apto), debido a la existencia de cualidades que limitan el desarrollo potencial del TUT en estudio. Sin embargo se reportan las clases A3 (Marginalmente apto) y A4 (No apto) con sus respectivas limitantes.

La clase A3 son las áreas donde mayor concentración de productores de papa vienen desarrollando esta actividad agrícola, se estima un aproximado de 316 km² esto representa el 48 % del área total distribuidas en 629 UC. Estas áreas están caracterizadas por tener un rango en precipitación que oscila entre 800 a 2268 mm, una temperatura máxima de 14 a 26 °C, de 10 a 20 °C temperatura media y una temperatura mínima que oscila entre 6 a 15 °C muy favorable cuando la papa está en la fase de formación, desarrollo y llenado de almidón de los tubérculos (Doorembos y Kassam 1996). Esta clase se encuentra ubicada desde los 1084 msnm en la parte inferior pertenece a la UC Humo y la parte de mayor altura corresponde a la UC Irazú ubicada entre los 3058 msnm. A su vez dentro de esta clase predominan el tipo de suelo Typic Vitrandept-Typic Dystrandept agrupadas en 329 UC con un área aproximado de 130 km² este tipo de suelo presenta una textura gruesa, suelos profundos (105 cm), materia orgánica (MO) (7.10 %), con un nivel bajo en pedregosidad (1 %), pH (6.45) y una Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) de 19.6.

Sin embargo esta clase A3 tiene niveles de limitaciones que determinan la óptima producción de la papa representadas por subclases. La subclase que mayor limitación presenta en la zona de estudio es ReqPoli/RiDegSue/RiTizón esto quiere decir que la zona donde actualmente se cultiva papa está limitada por riesgo a *T. solanivora*, riesgo a degradación del suelo y riesgo a *P. infestans*. Con respecto a la clase A4 ocupa un 52 % (341 km²) agrupadas en 673 UC. Si se toma en cuenta la distribución espacial de esta clase abarca desde los 435 hasta los 1351 msnm, esta clase no muestra condiciones agroecológicas adecuadas para la producción de papa clasificándose en la escala de evaluación de tierras según la FAO como No Apto (A4) (FAO 2000). A su vez, está restringida por tres limitantes CaLabor/Altura/Tmin (capacidad de laboreo, altura y temperatura mínima).

La subclase 4ReAltura/Tmin es la que mayor predominancia tiene dentro la clase (A4) con un área aproximado de 209.59 km² (31.90 %), es decir presenta una restricción por requerimiento de altura (435 a 999 msnm) considerándose que actualmente en Costa Rica el cultivo de la papa está adaptada desde los 1200 msnm hasta los 2800 y a una temperatura mínima de entre 8 a 15 °C (MAG 2003).

Sin embargo el cultivo de la papa se puede adaptar a altitudes menores a los 1200 msnm siempre y cuando las temperaturas nocturnas oscilen entre 10 a 15 °C como óptimas para dar inicio al desarrollo de los tubérculos (FAO 2008).

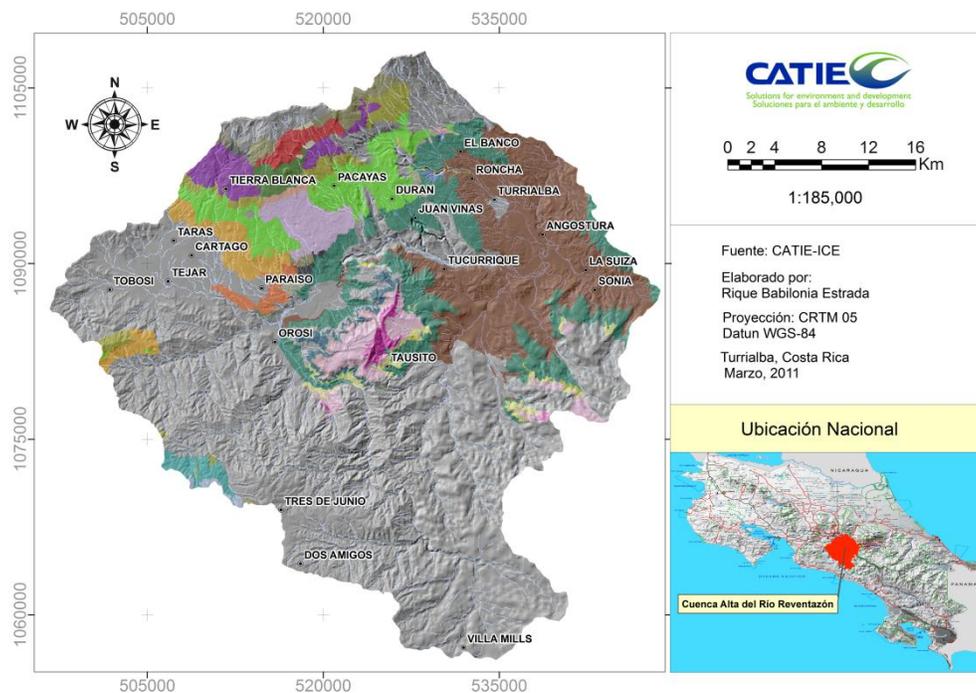


Figura 10. Mapa de aptitud final actual potencial por sub clases

4.2 Objetivo II: Distribución espacial de los cambios de las zonas de aptitud del cultivo de la papa bajo el modelo HadCM3 y CSIRO

4.2.1 Cambios en la aptitud física generados por el modelo HadCM3 bajo dos escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080

4.2.1.1 Cambios en la aptitud física por precipitación bajo el modelo HadCM3

Con respecto a la precipitación el cultivo de la papa, requiere un buen suministro de agua, tanto en cantidad como en distribución (Guerrero 1984, Amador 1991). Los resultados que se presentan en la Figura 11 se aprecian tres clases de aptitud para la zona de estudios, A1 (Apto), A2 (Moderadamente Apto) y A3 (Marginalmente Apto). A su vez, se muestran los cambios en la aptitud bajo escenarios de emisiones A2 y B2 para los horizontes de tiempo 2050 y 2080.

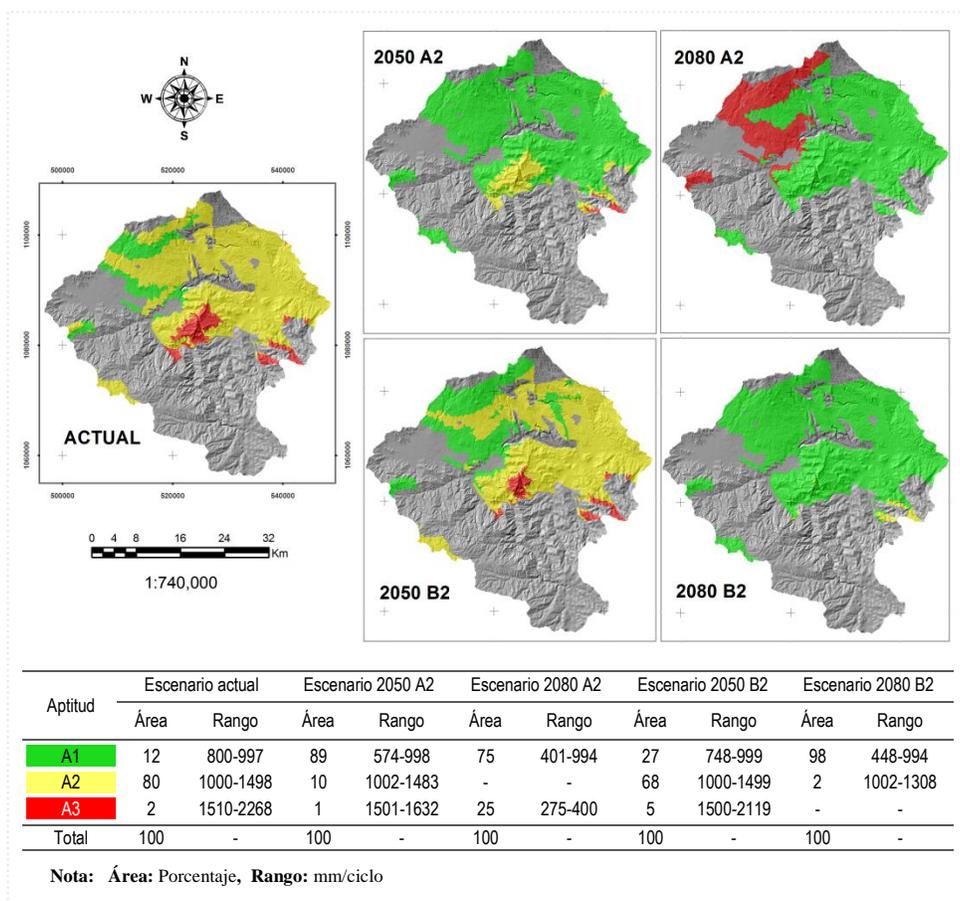


Figura 11. Mapa de cambios de aptitud por precipitación bajo escenarios de cambio climático

Los resultados muestran que la clase A1 para el escenario actual potencial presenta un 12 % (80 km²) del área total. Sin embargo estas áreas de mejor aptitud tienden a incrementarse para los escenarios 2050 A2 en 89 % (587 km²), 2080 A2 en 75 % (490 km²), 2050 B2 en 27 % (179 km²) y para el escenario 2080 B2 en 98 % equivalente a 646 km² con respecto al escenario actual potencial. Esta clase no presenta limitación alguna por lo que el rango óptimo abarca desde los (448 a 994 mm/ciclo) Sin embargo las áreas de menor aptitud (No Apta) presentan rangos por encima del óptimo (1500 a 2268 mm/ciclo). En consecuencia estos rangos excesivos pueden ocasionar un pobre desarrollo radicular, pudrición de tubérculos y estimular enfermedades fungosas como *P. infestans* (Amador 1991).

En el Cuadro 11 se puede observar las matrices de cambios de superficies que se generan entre cada una de las clases de aptitud con valores en Km². Es así que la clase aptitud Moderadamente Apto (A2) pierde superficie considerablemente para los escenarios 2050 A2 507 km², 2080 A2 438 km², 2050 B2 99 km² y para el 2080 B2 525 km². Estas pérdidas hacen que las mejores tierras (clase A1) se incrementen en superficie, donde las condiciones agroecológicas son óptimas para emprender unidades de producción de papa. Sin embargo solamente para el escenario 2080 A2 esta clase pierde el 100 % de sus áreas productivas. Esto quiere decir que las condiciones agroecológicas por precipitación cambien sus rangos de mejor aptitud a rangos Marginalmente Aptos (A3). Por otra parte la clase A1 tiende a desplazarse a mayores altitudes (3058 msnm) con respecto al escenario actual potencial (973-3001 msnm). Sin embargo existen UC que se encuentran desde 435 msnm y presentan una aptitud favorable para el cultivo de la papa por precipitación.

Cuadro 11. Matriz de cambio de aptitud por precipitación, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080

| Esc. Actual Aptitud km ² | Escenario 2050 A2 | | | | Escenario 2080 A2 | | | | |
|--|-------------------|-----|----|-------|-------------------|-----|----|-------|-----|
| | A1 | A2 | A3 | Total | A1 | A2 | A3 | Total | |
| A1 | 80 | 80 | 0 | 0 | 80 | 0 | 0 | 80 | 80 |
| A2 | 525 | 507 | 18 | 0 | 525 | 438 | 0 | 87 | 525 |
| A3 | 52 | 0 | 47 | 5 | 52 | 52 | 0 | 0 | 52 |
| Total | 657 | 587 | 65 | 5 | 657 | 490 | 0 | 167 | 657 |

| Esc. Actual Aptitud km ² | Escenario 2050 B2 | | | | Escenario 2080 B2 | | | | |
|--|-------------------|-----|-----|-------|-------------------|-----|----|-------|-----|
| | A1 | A2 | A3 | Total | A1 | A2 | A3 | Total | |
| A1 | 80 | 80 | 0 | 0 | 80 | 80 | 0 | 0 | 80 |
| A2 | 525 | 99 | 426 | 0 | 525 | 525 | 0 | 0 | 525 |
| A3 | 52 | 0 | 23 | 29 | 52 | 41 | 11 | 0 | 52 |
| Total | 657 | 179 | 449 | 29 | 657 | 646 | 11 | 0 | 657 |

4.2.1.2 Cambios en la aptitud física por temperatura máxima bajo el modelo HadCM3

La temperatura máxima tiene un efecto sobre los procesos químicos y, con frecuencia sobre los biológicos, hasta alcanzar un óptimo de aproximadamente 20 a 22 °C para el cultivo de la papa (CIP 1988). Es posible que estos procesos tengan cierta limitación en la producción del cultivo de la papa. Por consiguiente en la Figura 12 se presentan los resultados de la evaluación con el modelo ALES y a su vez, asociados a escenarios de cambio climático. Donde se aprecia que la clase A1 en condiciones actuales ocupa un 20% del área total. Sin embargo tiende a reducirse a 14% para el escenario 2050 A2, 10% para el 2080 A2, 15% para el 2050 B2 y 12% para el escenario 2080 B2.

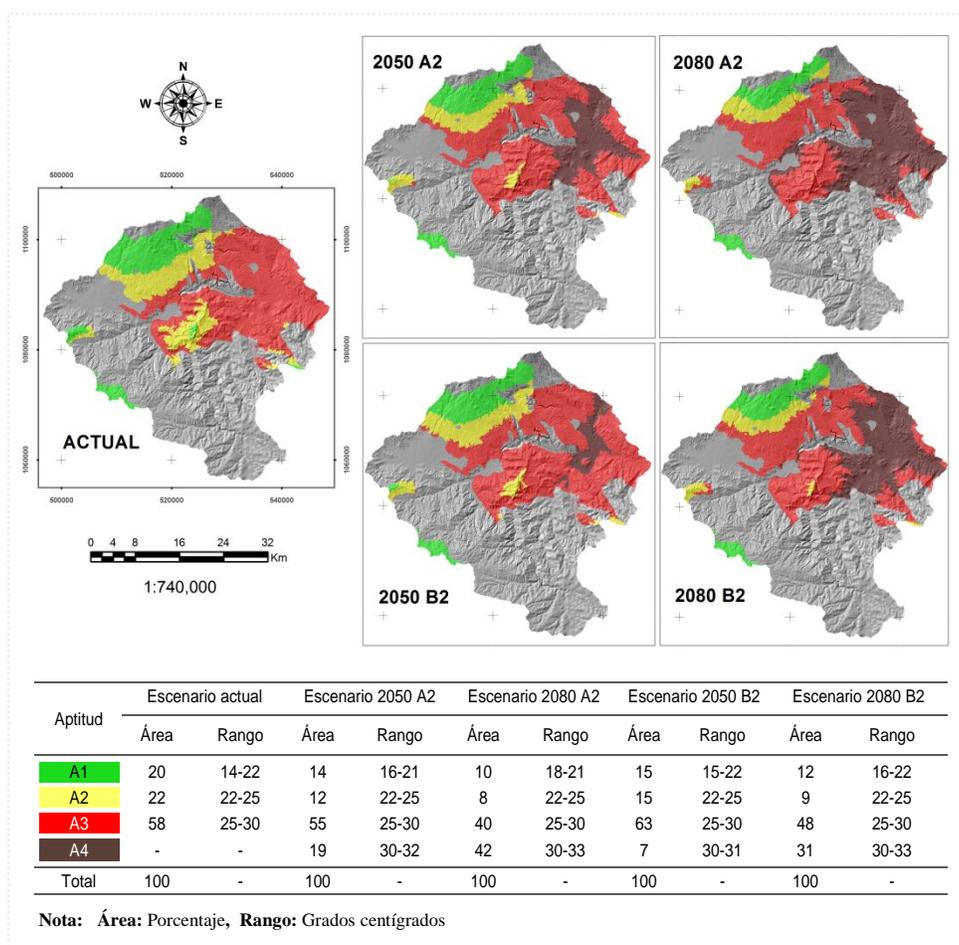


Figura 12. Mapa de cambios de aptitud por temperatura máxima bajo escenarios de cambio climático

También se muestran que las clases A3 y A4 presentan las mayores superficies, sin embargo estas clases tienen UC que se caracterizan por tener temperaturas que oscilan entre los 25 °C a 33 °C. Este rango de temperatura máxima es crítico ya que mayores a 22 °C el cultivo de la papa presenta dificultad en desarrollar normalmente tubérculos por lo que retrasa el crecimiento y desarrollo del mismo (Hijmans 2003, FAO 2008, CORTBAQUI 1993) o deja de ocurrir la tuberización (Domínguez 1989), a su vez, la longevidad de las hojas es mucho más corta, y el crecimiento de las raíces es menor, lo que produce inhibición de la absorción de los iones (Midmore 1998).

Para el caso de las matrices de cambio de superficies netas de pérdidas y ganancias en las clases de aptitud, el Cuadro 12 muestra que la clase A1 cede superficie a la clase A2 para todos los escenarios de emisiones. Por otro lado la clase A2 tiene similar comportamiento que la clase A1 por lo que sus áreas pasan de ser Moderadamente Aptos a aptitudes Marginalmente Aptos (A3) constituyéndose en la clase con las mayores superficies en la zona de estudio. Sin embargo la clase A4 presenta condiciones agroecológicas no aptas para la producción del cultivo de la papa.

Cuadro 12. Matriz de cambio de aptitud por temperatura máxima, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080

| Esc. Actual | Escenario 2050 A2 | | | | | Escenario 2080 A2 | | | | | |
|-------------|-------------------|----|----|-----|-------|-------------------|----|----|-----|-------|-----|
| | A1 | A2 | A3 | A4 | Total | A1 | A2 | A3 | A4 | Total | |
| A1 | 129 | 91 | 38 | 0 | 0 | 129 | 66 | 53 | 10 | 0 | 129 |
| A2 | 144 | 0 | 40 | 104 | 0 | 144 | 0 | 0 | 144 | 0 | 144 |
| A3 | 384 | 0 | 0 | 257 | 127 | 384 | 0 | 0 | 110 | 274 | 384 |
| Total | 657 | 91 | 78 | 361 | 127 | 657 | 66 | 53 | 264 | 274 | 657 |

| Esc. Actual | Escenario 2050 B2 | | | | | Escenario 2080 B2 | | | | | |
|-------------|-------------------|----|----|-----|-------|-------------------|----|----|-----|-------|-----|
| | A1 | A2 | A3 | A4 | Total | A1 | A2 | A3 | A4 | Total | |
| A1 | 129 | 98 | 31 | 0 | 0 | 129 | 80 | 49 | 0 | 0 | 129 |
| A2 | 144 | 0 | 65 | 79 | 0 | 144 | 0 | 8 | 136 | 0 | 144 |
| A3 | 384 | 0 | 0 | 337 | 47 | 384 | 0 | 0 | 178 | 206 | 384 |
| Total | 657 | 98 | 96 | 416 | 47 | 657 | 80 | 57 | 314 | 206 | 657 |

4.2.1.3 Cambios en la aptitud física por temperatura media bajo el modelo HadCM3

A partir de los resultados generados en ALES y con el modelo HadCM3 utilizando como horizontes de tiempo 2050 y 2080 bajo escenarios de emisiones A2 y B2 en la Figura 13 se observa que las áreas de mayor superficie son Marginalmente Aptos (A3).

Sin embargo también se muestran las clases de mejor aptitud A1 y A2. Los resultados muestran que la clase A1 para el escenario actual potencial presenta un 32 % (210 km²) del área total. Sin embargo estas áreas de mejor aptitud tienen una tendencia a reducir similarmente tanto para los escenarios 2050 A2 y 2050 B2 a 19 % y para los escenarios 2080 A2 y 2080 B2 a 16 % con respecto al escenario actual potencial. Esta clase de aptitud tiene un rango de temperatura media que oscila entre 16 a 20 °C por lo que las condiciones son favorables para el desarrollo de los tubérculos en la zona de estudio.

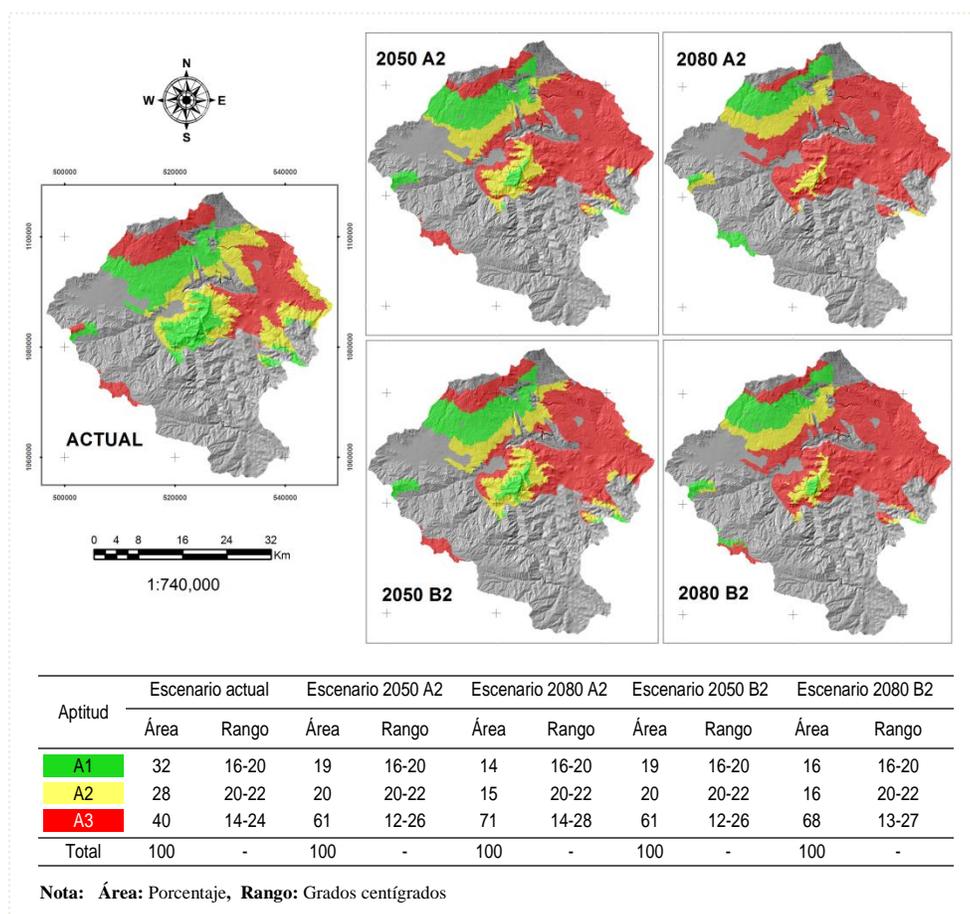


Figura 13. Mapa de cambios de aptitud por temperatura media bajo escenarios de cambio climático

En la figura también se puede apreciar que las UC de la clase A1 tienden tanto a reducir sus áreas como a desplazarse a mayores altitudes que oscilan entre los 1877 a 2699 msnm con respecto al escenario actual potencial (1134-2018 msnm).

Esto implica que los productores de papa, tendrán nuevas áreas con menores riesgos a plagas pero con mayores riesgos a degradación del suelo por el tipo de topografía del suelo.

Por otra parte las clases de aptitudes Marginalmente Aptos (A3) presentan rangos fuera del óptimo que oscilan entre 12 a 27 ° C. En consecuencia estos rangos pueden ocasionar problemas cuando el cultivo de la papa se encuentra en la etapa crítica de formación de tubérculos (FAO 2008).

Con respecto a la matrices de cambio de superficie neto en la Cuadro 13 se muestra que la clase A1 (Apto) pierde una superficie aproximadamente de 132 km² para el escenario 2050 A2, 204 km² para el 2080 A2, 103 km² y 170 km² para el escenario 2080 B2. Sin embargo las UC de aptitudes No Aptas (A3) para el cultivo de la papa tienden a incrementar sus áreas para todos los escenarios de emisiones.

Cuadro 13. Matriz de cambio de aptitud por temperatura media, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080

| Esc. Actual | Escenario 2050 A2 | | | | Escenario 2080 A2 | | | | |
|-------------------------|-------------------|-----|-----|-------|-------------------|----|-----|-------|-----|
| Aptitud km ² | A1 | A2 | A3 | Total | A1 | A2 | A3 | Total | |
| A1 | 210 | 78 | 129 | 3 | 210 | 6 | 102 | 102 | 210 |
| A2 | 182 | 0 | 0 | 182 | 182 | 0 | 0 | 182 | 182 |
| A3 | 265 | 49 | 0 | 216 | 265 | 86 | 0 | 179 | 265 |
| Total | 657 | 127 | 129 | 401 | 657 | 92 | 102 | 463 | 657 |

| Esc. Actual | Escenario 2050 B2 | | | | Escenario 2080 B2 | | | | |
|-------------------------|-------------------|-----|-----|-------|-------------------|-----|-----|-------|-----|
| Aptitud km ² | A1 | A2 | A3 | Total | A1 | A2 | A3 | Total | |
| A1 | 210 | 107 | 103 | 0 | 210 | 40 | 102 | 68 | 210 |
| A2 | 182 | 0 | 34 | 148 | 182 | 0 | 0 | 182 | 182 |
| A3 | 265 | 36 | 0 | 229 | 265 | 66 | 0 | 199 | 265 |
| Total | 657 | 143 | 137 | 377 | 657 | 106 | 102 | 449 | 657 |

4.2.1.4 Cambios en la aptitud física por temperatura mínima bajo el modelo HadCM3

Con respecto a la temperatura mínima, el cultivo de la papa se puede producir en lugares donde la temperatura mínima sea de 18 °C como máximo, sin importar mucho la temperatura diurna. Sin embargo conforme la temperatura mínima es más alta la producción disminuye; en cambio, entre 8 °C y 15 °C la producción es favorable tanto en follaje y tallos como en tubérculos (FAO 2008). Esta afirmación se puede observar en los resultados obtenidos en la Figura 14 donde la clase A1 presenta rangos de temperaturas mínimas que oscilan entre 8 a 15 °C; favorables, cuando la papa inicia la formación de la tuberización.

Sin embargo cuando los rangos de temperaturas se encuentran fuera del rango óptimo que requiere el cultivo de la papa, las condiciones agroclimáticas cambian y por consiguiente presentan reducción de las áreas óptimas. Por consecuencia la clase A1 tiende a reducir sus áreas con todos los escenarios de emisiones estudiados.

Con respecto a la afirmación anterior se puede observar que la clase A4 incrementa su área ocupando más del 50 % del área total, dándose el mayor incremento de sus áreas con el escenario 2080 A2 (85 %) esto representa aproximadamente 554 km² con respecto al área total, agrupadas en 228 UC. Estas UC están ubicadas en un rango altitudinal que oscila entre los 435 a 2018 msnm. Por otro lado la clase A2 solo presenta una superficie menos del 1 % del área total y un rango de temperatura Moderadamente Apto que oscila entre 7 y 8 ° C.

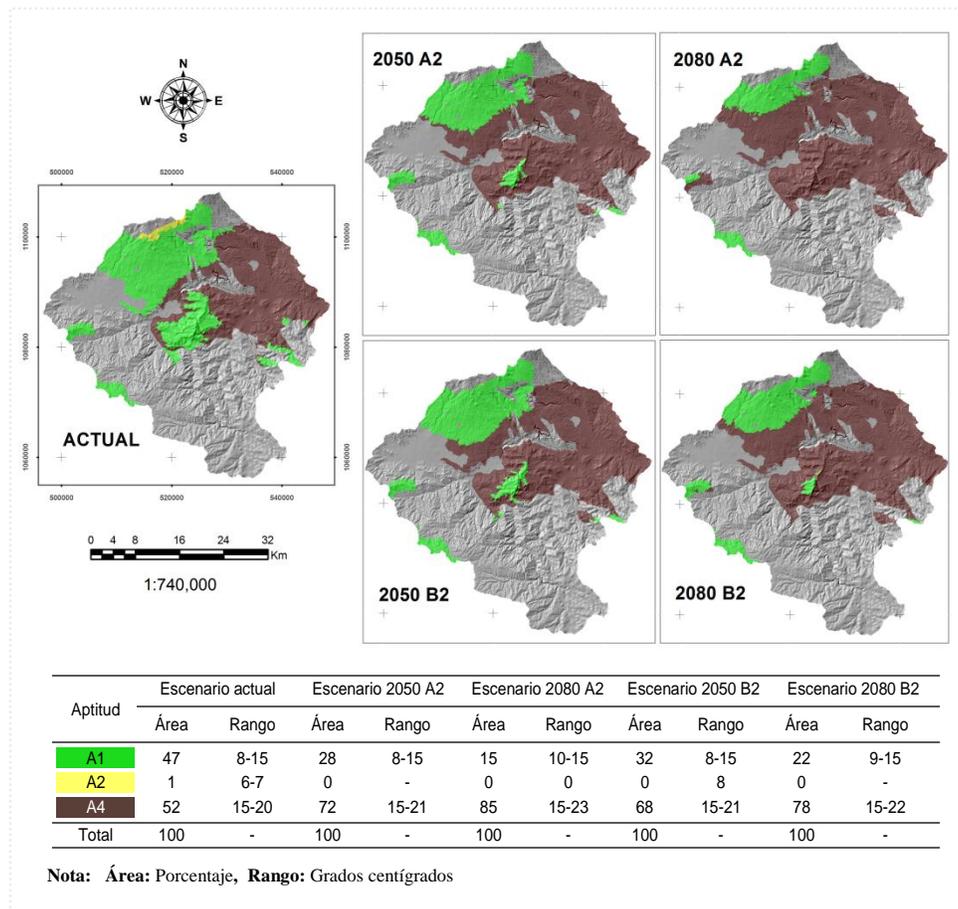


Figura 14. Mapa de cambios de aptitud por temperatura mínima bajos escenarios de cambio climático

Para este análisis se obtuvieron dos matrices donde se presentan en el Cuadro 14 estas muestran los cambios netos en superficie entre cada uno de las clases de aptitud con valores en

kilómetros cuadrados para cada escenario en estudio. Es así que la clase A1 pierde una superficie con todos los escenarios de emisiones evaluados, con respecto al escenario actual. Por consiguiente para el escenario 2050 A2 pierde una superficie aproximadamente de 132 km², 2080 A2 217 km², 2050 B2 107 km² y para el escenario 2080 B2 172 km². Estas pérdidas de superficie hacen que la clase No Apto (A4) incremente sus áreas considerablemente para todos los escenarios. Sin embargo la clase Moderadamente Apto (A2) pierde superficie para todos los escenarios. Favoreciendo el incremento de las áreas con mejor clase de aptitud para el cultivo de la papa, con respecto al escenario actual potencial.

Cuadro 14. Matriz de cambio de aptitud por temperatura mínima, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080

| Esc. Actual | Escenario 2050 A2 | | | | Escenario 2080 A2 | | |
|-------------------------|-------------------|-----|-------|-----|-------------------|-------|-----|
| Aptitud km ² | A1 | A4 | Total | A1 | A4 | Total | |
| A1 | 306 | 174 | 132 | 306 | 89 | 217 | 306 |
| A2 | 10 | 10 | 0 | 10 | 10 | 0 | 10 |
| A4 | 341 | 0 | 341 | 341 | 0 | 341 | 341 |
| Total | 657 | 184 | 473 | 657 | 99 | 558 | 657 |

| Esc. Actual | Escenario 2050 B2 | | | | Escenario 2080 B2 | | | |
|-------------------------|-------------------|-----|----|-------|-------------------|-----|-------|-----|
| Aptitud km ² | A1 | A2 | A4 | Total | A1 | A4 | Total | |
| A1 | 306 | 199 | 0 | 107 | 306 | 134 | 172 | 306 |
| A2 | 10 | 10 | 0 | 0 | 10 | 0 | 10 | |
| A4 | 341 | 0 | 0 | 341 | 341 | 0 | 341 | |
| Total | 657 | 209 | 0 | 448 | 657 | 144 | 513 | 657 |

4.2.1.5 Cambios en la aptitud climática del cultivo de papa por subclases bajo el modelo HadCM3

Con respecto al análisis de la aptitud climática ALES evalúa la climatología actual asociada a los cambios climáticos para los años estudiados, por lo que determina una cierta aptitud climática con sus limitaciones en la producción del cultivo de la papa.

En la Figura 15 donde que la clase A1 no presenta cambios significativos, excepto para los escenarios 2050 A2 (6 %) y 2080 B2 se incrementa levemente en un 7 % con respecto al escenario actual potencial (1 %). Sin embargo existe un considerable incremento en superficie para la clase A4 (No Apto) del 52 % escenario actual a 72 % (2050 A2), 85 % (2080 A2), 68 % (2050 B2) y 77% (2080 B2).

La clase A1 no presenta limitación alguna, quiere decir que todas condiciones agroecológicas son óptimas para que el cultivo de la papa tenga rendimientos satisfactorios.

Con respecto a la clase A4 las UC que la constituyen presentan limitaciones por 4ReTmax/ReTmin esto quiere decir limitación por temperatura máxima y temperatura mínima, por lo que sería casi imposible emprender la instalación de unidades de producción de papa en estas áreas ya que los rangos de temperatura superan fácilmente los 33 °C con este valor los tubérculos inhiben su desarrollo totalmente (Parsons *et al* 1999, Rubio *et al* 2000, Cepeda *et al.*). Sin embargo a estos niveles de temperatura funciona efectivamente como un método de control para *P. infestans* (Bindi 2008) y para el caso de *T. solanivora* la mortalidad de las larvas se dan al 100 % (Notz 1995).

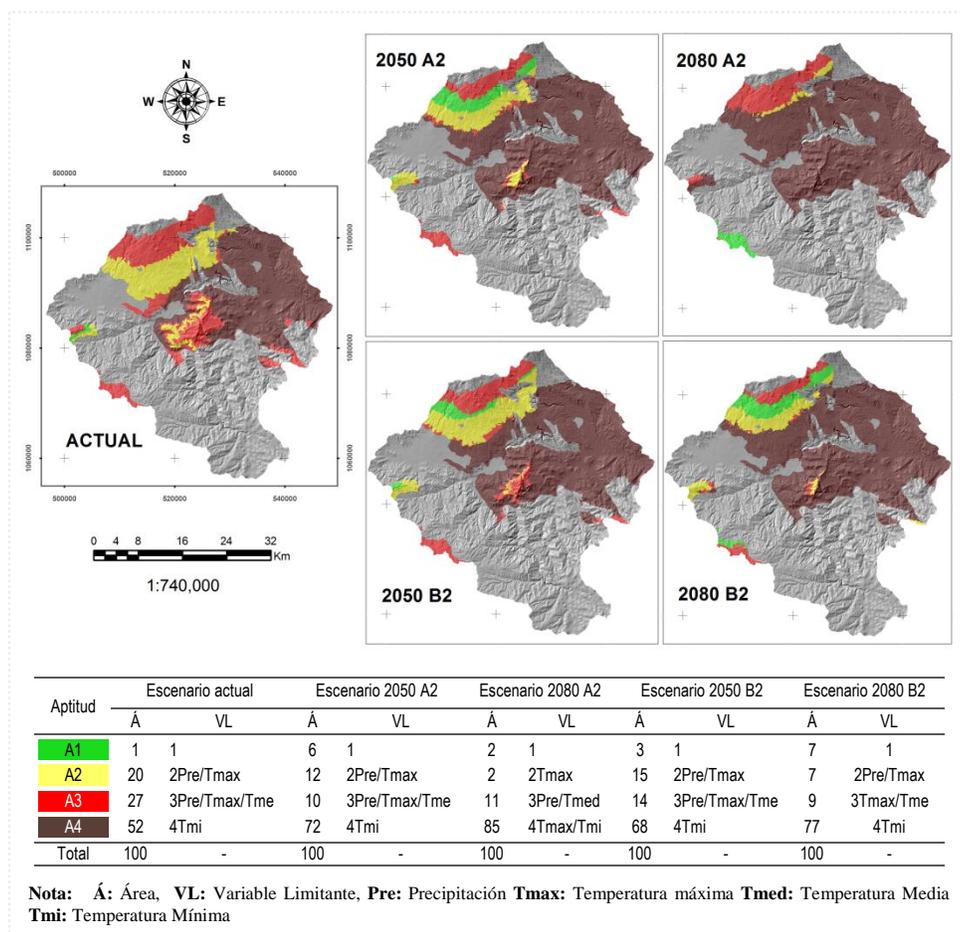


Figura 15. Mapa de subclases de aptitud climática bajo escenarios de cambio climático

En las matrices de cambio (Cuadro 15), la clase A4 mantiene su superficie en (341 km²) equivalente al 52 % del área total, para todos los escenarios de emisiones en relación al escenario actual potencial. Sin embargo son más evidentes los cambios de la clase A3 que cede sus áreas a la clase A1 para todos los escenarios de emisiones. Mientras que, para el año 2050 con el escenario de emisiones A2 el cambio es más significativo ya que la clase A1 incrementa su área en 38 km² esto representa un 6 % del área total.

Cuadro 15. Matriz de cambio de aptitud climática por subclases, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080

| Esc. Actual | Escenario 2050 A2 | | | | | Escenario 2080 A2 | | | | |
|-------------------------|-------------------|----|----|----|-------|-------------------|----|----|----|-------|
| Aptitud km ² | A1 | A2 | A3 | A4 | Total | A1 | A2 | A3 | A4 | Total |
| A1 | 4 | 0 | 4 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| A2 | 131 | 0 | 55 | 10 | 66 | 131 | 0 | 0 | 0 | 131 |
| A3 | 181 | 38 | 17 | 60 | 66 | 181 | 13 | 11 | 75 | 82 |
| A4 | 341 | 0 | 0 | 0 | 341 | 341 | 0 | 0 | 0 | 341 |
| Total | 657 | 38 | 76 | 70 | 473 | 657 | 13 | 11 | 75 | 558 |

| Esc. Actual | Escenario 2050 B2 | | | | | Escenario 2080 B2 | | | | |
|-------------------------|-------------------|----|----|----|-------|-------------------|----|----|----|-------|
| Aptitud km ² | A1 | A2 | A3 | A4 | Total | A1 | A2 | A3 | A4 | Total |
| A1 | 4 | 0 | 4 | 0 | 0 | 4 | 0 | 4 | 0 | 4 |
| A2 | 131 | 0 | 75 | 7 | 49 | 131 | 0 | 28 | 4 | 99 |
| A3 | 181 | 21 | 17 | 85 | 58 | 181 | 45 | 25 | 38 | 73 |
| A4 | 341 | 0 | 0 | 0 | 341 | 341 | 0 | 0 | 0 | 341 |
| Total | 657 | 21 | 96 | 92 | 448 | 657 | 13 | 57 | 42 | 513 |

4.2.1.6 Cambios en la distribución geográfica de las áreas con riesgo a “*T. solanivora*” bajo el modelo HadCM3.

Los efectos de las cualidades de la tierra con respecto a la aptitud del TUT que se estudia son normalmente considerados como riesgos o limitaciones (Rossiter 1998). En este caso *T. solanivora* se constituye en un riesgo en los niveles de aptitud de la tierra para papa. Considerando dicha afirmación en la Figura 16 se muestran los riesgos de *T. solanivora* en la zona de estudio bajo escenarios de cambio climático. Donde la clase de aptitud A3 es la que mayor predomina en superficie en todos los escenarios incluyendo en el actual potencial. Sin embargo las condiciones agrológicas presentes en la zona de estudio suelen demarcar áreas nuevas de aptitud sin restricción alguna (A1) para todos los escenarios futuros.

La temperatura, precipitación y altitud influyen en el grado de riesgo por *T. solanivora* en las zonas de aptitud. Para todos los escenarios futuros el riesgo son altos, es así que la restricción para la clase A3 es la temperatura media y que presenta un rango que oscila entre

15 a 26 ° C dentro de este rango de temperatura media *T. solanivora* se puede adaptar con facilidad por que tiene la capacidad de regular la temperatura interna corporal, mediante mecanismos externos, es así, que las variables de temperatura son las que localizan su hábitat y es capaz de adaptarse a diferentes áreas ecológicas (Casados 1984).

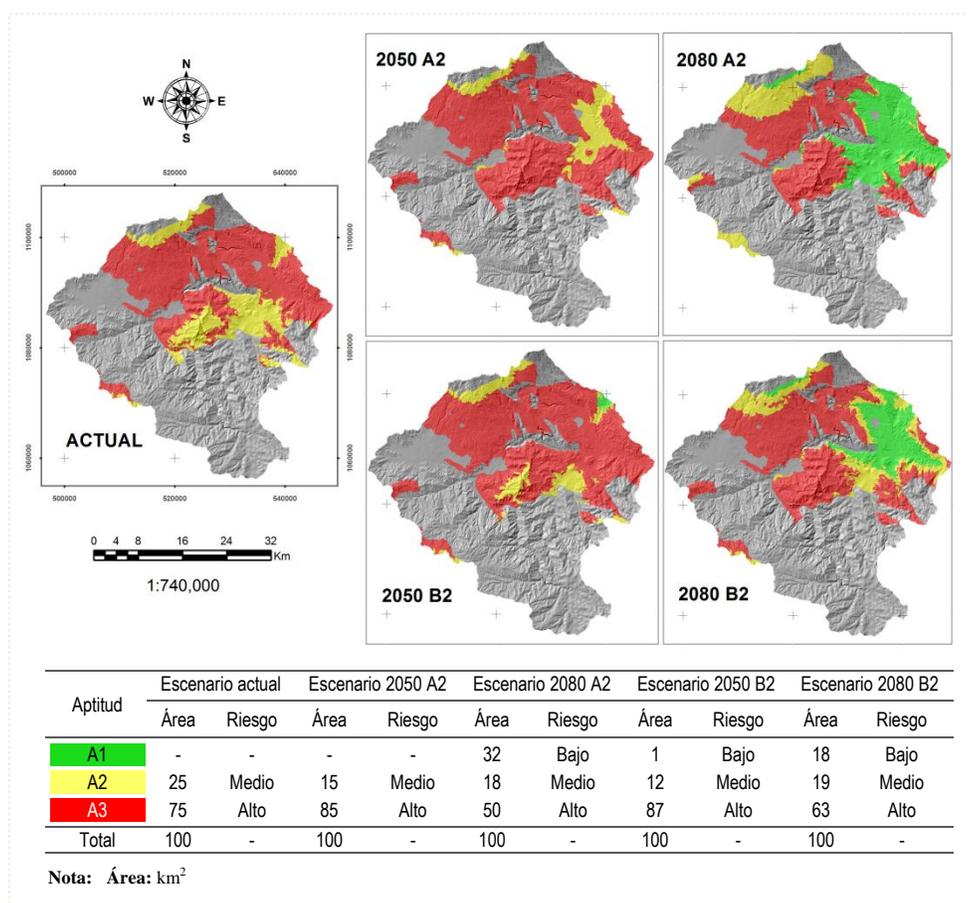


Figura 16. Mapa de riesgo por *T. solanivora* en las zonas de aptitud bajo escenarios de cambio climático

Esto permite suponer que *T. solanivora* se puede dispersar de las zonas altas donde actualmente se concentra (574 a 2497 msnm) a zonas bajas, donde la temperatura promedio está alrededor de los 25 °C (Notz 1995). Por otro lado dentro de este rango de temperatura (15 a 26 °C) que caracteriza a la clase A3 *T. solanivora* se reproduce hasta 10 generaciones por año (Torres 1989). Sin embargo en la zona de estudio ninguna clase se encuentra caracterizada con temperaturas menores a 8 °C ya que este rango de temperatura funciona como un método de control (Notz 1995).

Con respecto a las matrices de cambio (Cuadro 16), la clase A3 es la que pierde mayor superficie para los escenarios 2080 A2 (219 km²) quien incrementa a la clase A1 con (129 km²) y a la clase A2 con (90 km²) 2080 B2. Del mismo modo para el escenario 2080 B2 pierde una superficie total de 151 km². Sin embargo la clase A1 incrementa sus áreas para los escenarios 2080 A2 y 2080 B2.

Cuadro 16. Matriz de cambio de aptitud por riesgo a T. solanivora, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080

| Esc. Actual | Escenario 2050 A2 | | | | Escenario 2080 A2 | | | | |
|-------------------------|-------------------|----|----|-------|-------------------|-----|-----|-------|-----|
| Aptitud km ² | A1 | A2 | A3 | Total | A1 | A2 | A3 | Total | |
| A2 | 166 | 0 | 55 | 111 | 166 | 83 | 27 | 56 | 166 |
| A3 | 491 | 0 | 43 | 448 | 491 | 129 | 90 | 272 | 491 |
| Total | 657 | 0 | 98 | 559 | 657 | 212 | 117 | 328 | 657 |

| Esc. Actual | Escenario 2050 B2 | | | | Escenario 2080 B2 | | | | |
|-------------------------|-------------------|----|----|-------|-------------------|-----|-----|-------|-----|
| Aptitud km ² | A1 | A2 | A3 | Total | A1 | A2 | A3 | Total | |
| A2 | 166 | 5 | 81 | 80 | 166 | 34 | 62 | 70 | 166 |
| A3 | 491 | 0 | 0 | 491 | 491 | 86 | 65 | 340 | 491 |
| Total | 657 | 5 | 81 | 571 | 657 | 120 | 127 | 410 | 657 |

4.2.1.7 Cambios en la distribución geográfica de las áreas con riesgo a “*P. infestans*” bajo el modelo HadCM3

La presencia de *P. infestans* en la zona de estudio se muestra en la Figura 17 con un nivel de riesgo según la aptitud. La clase A1 presenta un Riesgo Bajo (RB), con el escenario 2080 A2 que ocupa un área de 15 km² (2 %) del área total. La clase A2 incrementa su área con el escenario 2080 A2 esta ocuparía el 43% (280 km²) del área total. Sin embargo suele reducir sus áreas con los escenarios 2050 A2 (8%) y 2080 B2 (12%).

Con respecto a las características de temperatura la clase A3 (Riesgo Alto) tiene un rango que oscila entre 16 a 26 °C para todos los escenarios de cambio. Este rango es muy amplio considerando que *P. infestans* actualmente tiene presencia en toda la zona papera.

Según (Abad *et al* 1995) mencionan que las constantes lluvias asociadas a temperatura bajas que oscilan entre 9 y 24 °C hacen que las condiciones sean propicias para que los esporangios de *P. infestans* formen zoosporas. El mismo autor a su vez, afirma que el rango óptimo es de 18 a 23 °C. Estos rangos (de 9 a 24 °C y 18 a 23 °C) se encuentran inmersos dentro del rango (16 a 26 °C) evaluados para todos los escenarios de cambio. Es por ello que

P. infestans presenta un nivel de riesgo medio a alto, tanto para el escenario actual y futuro en la zona de estudio; con relación a la clase de aptitud que presenta para el cultivo de la papa. A su vez, se entiende que el nivel de riesgo están influenciados por las características de las UC como temperatura y precipitación que son las que finalmente determinan el riesgo a *P. infestans* en las clases de aptitud (Rossiter 1998).

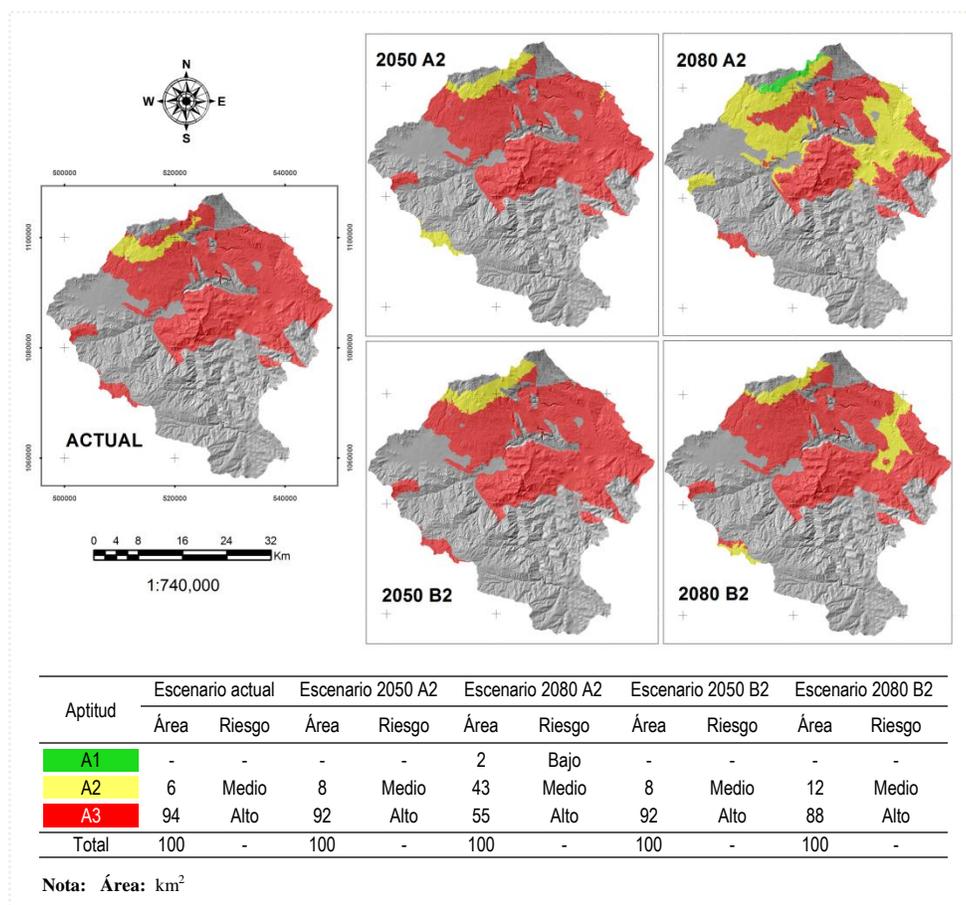


Figura 17. Mapa de riesgos por *P. infestans* en las zonas de aptitud bajo escenarios de cambio climático

Con respecto a los cambios netos de superficie por clases, se pueden apreciar en las matrices compuestas (Cuadro 17), que la clase A3 pierde superficie aproximadamente 387 km² hacia los años 2050 bajo el escenario de emisiones A2 (41 km²), 2080 A2 (242 km²), 2050 B2 (28 km²) y 2080 B2 (76 km²), con respecto al escenario actual potencial (619 km²).

Cuadro 17. Matriz de cambio de aptitud por riesgo a *P. infestans*, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080

| Esc. Actual | Escenario 2050 A2 | | | | Escenario 2080 A2 | | | |
|-------------------------|-------------------|----|-------|-----|-------------------|-----|-------|-----|
| Aptitud km ² | A2 | A3 | Total | A1 | A2 | A3 | Total | |
| A2 | 38 | 13 | 25 | 38 | 0 | 38 | 0 | 38 |
| A3 | 619 | 41 | 578 | 619 | 15 | 242 | 362 | 619 |
| Total | 657 | 54 | 603 | 657 | 15 | 280 | 362 | 657 |

| Esc. Actual | Escenario 2050 B2 | | | | Escenario 2080 B2 | | |
|-------------------------|-------------------|----|-------|-----|-------------------|-------|-----|
| Aptitud km ² | A2 | A3 | Total | A2 | A3 | Total | |
| A2 | 38 | 24 | 14 | 38 | 2 | 36 | 38 |
| A3 | 619 | 28 | 591 | 619 | 76 | 543 | 619 |
| Total | 657 | 52 | 605 | 657 | 78 | 579 | 657 |

4.2.1.8 Cambios en la distribución geográfica de las áreas por riesgo a degradación del suelo bajo el modelo HadCM3.

La degradación del suelo está relacionado a factores edafoclimáticos y manejo. La zona de estudio no es ajena a esta apreciación. En la Figura 18 se muestran tres niveles de riesgos asociados a las clases de aptitud. Por lo que la clase A2 (Riesgo Medio) y la clase A1 (Riesgo Bajo) tienden a incrementar sus áreas para todos los escenarios. Sin embargo las áreas que corresponden a la clase A3 (Riesgo Alto) tienden a reducirse para los escenarios 2050 A2 en 3 % y 2050 B2 en 25 % con respecto al escenario actual (40 %).

Por otro lado, la clase A3 reporta un rango alto de precipitación que van desde los 1000.01 mm hasta los 2118 mm/ciclo, rango que abarca todos los escenarios en estudio. A su vez, presentan características que determinan la vulnerabilidad de la zona de estudio como pendientes que oscilan entre 9 a 144 % y texturas gruesas a finas (Edwards 1990).

Sin embargo el manejo tiene una implicancia directa al momento de preparar el terreno; al no tomar en cuenta el uso de maquinarias pesadas y arado de rastras favor de la pendiente (Gómez *et al.* 2004).

Para minimizar los riesgos a degradación del suelo los paperos deberán adoptar prácticas de conservación de suelo. Uso de arado de cincel, reducción del número de pases por ciclo/año, uso de curvas de nivel para surcos. A su vez, aplicar una fertilización ajustada a las necesidades del cultivo (MAG 2001). A los agricultores que adopten estas medidas de adaptación, pudiesen pagárselos por las externalidades positivas a terceros, por reducir este tipo de impacto (CEPAL 2007).

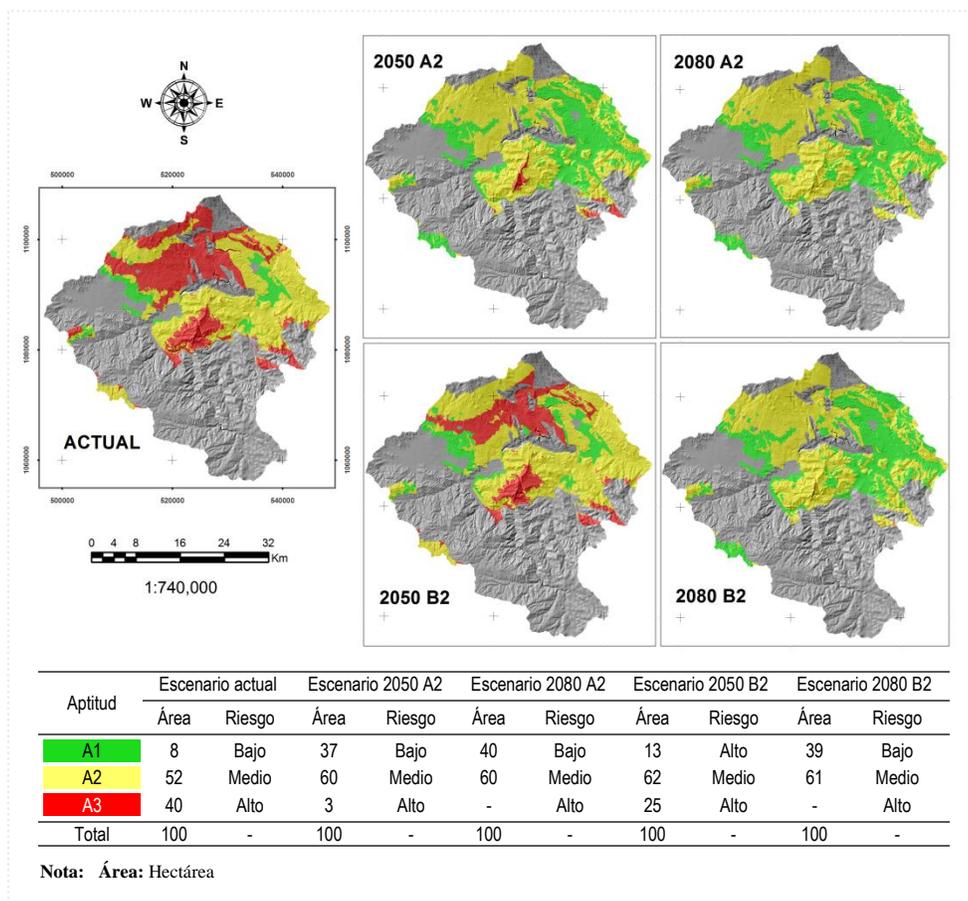


Figura 18. Mapa de riesgos por degradación del suelo en las zonas de aptitud

Según las matrices de cambio (Cuadro 18) muestran que la clase A1 incrementa sus áreas para todos los escenarios. Sin embargo la clase A3 pierde una superficie de 26 km² para el escenario 2050 A2 y para el escenario 216 km² con respecto al escenario actual. Para el escenario 2080 A2 la clase A2 se incrementa a 396 km² al perder 220 km² la clase A3 y a 409 km² para el escenario 2050 B2

Cuadro 18. Matriz de cambio de aptitud por riesgo a degradación del suelo, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080

| Esc. Actual | Escenario 2050 A2 | | | | Escenario 2080 A2 | | | | |
|-------------|-------------------------|-----|-----|----|-------------------|-----|-----|----|-------|
| | Aptitud km ² | A1 | A2 | A3 | Total | A1 | A2 | A3 | Total |
| A1 | 54 | 54 | 0 | 0 | 54 | 54 | 0 | 0 | 54 |
| A2 | 343 | 165 | 178 | 0 | 343 | 167 | 176 | 0 | 343 |
| A3 | 260 | 26 | 219 | 15 | 260 | 40 | 220 | 0 | 260 |
| Total | 657 | 245 | 397 | 15 | 657 | 261 | 396 | 0 | 657 |

| Esc. Actual | Escenario 2050 B2 | | | | Escenario 2080 B2 | | | | |
|-------------|-------------------------|----|-----|-----|-------------------|-----|-----|----|-------|
| | Aptitud km ² | A1 | A2 | A3 | Total | A1 | A2 | A3 | Total |
| A1 | 54 | 54 | 0 | 0 | 54 | 54 | 0 | 0 | 54 |
| A2 | 343 | 19 | 324 | 0 | 343 | 167 | 176 | 0 | 343 |
| A3 | 260 | 8 | 85 | 167 | 260 | 39 | 221 | 0 | 260 |
| Total | 657 | 81 | 409 | 167 | 657 | 260 | 397 | 0 | 657 |

4.2.1.9 Cambios en la aptitud física considerando la interrelación de todas las variables biofísicas bajo cambio climático

Los cambios en la aptitud física del cultivo de la papa, son sensibles a los cambios climáticos, aun cuando se considera la interrelación de todas las variables. En la Figura 19 se puede mostrar que en la zona de estudio solo se muestran dos clases de aptitud física. Al parecer la superficie de la clase A3 (Marginalmente Apto) donde actualmente se encuentran trabajando 691 paperos, tienden a disminuir para todos los escenarios futuros. Para el escenario 2050 A2 se reduce en 28 % (184 km²) y en 15 % para el escenario 2080 A2 con respecto al escenario actual (48 %).

Del mismo modo la clase A3 para los escenarios 2050 B2 tiende a reducir su área en 32 % (209 km²) y hacia el año 2080 con el escenario B2 tiene la misma tendencia a reducir su área en 22 % (144 km²). Esta clase A3 se constituye en la mejor aptitud física y donde la tierra puede producir buenos indicadores de rendimiento (Rossiter 1993).

En cuanto la clase A4, se observa un incremento significativo en su superficie para todos los escenarios futuros. En el caso del escenario 2080 A2 muestra un significado aumento en 85% (558 km²) distribuidos en 1074 UC. Este incremento de área permite que estas UC se desplacen a alturas mayores de 435 a 2018 msnm con respecto al rango actual (435-1350 msnm).

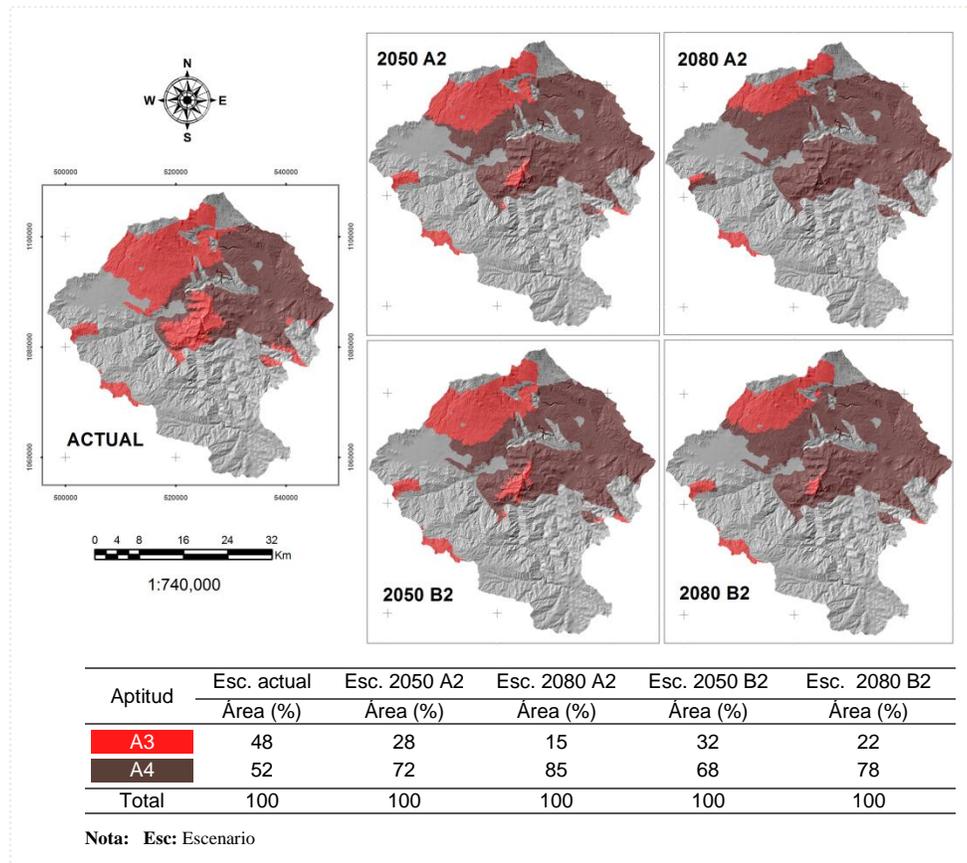


Figura 19. Mapa de aptitud final por clases bajo escenarios de cambio climático para el modelo HadCM3

En lo que se refiere a las matrices de cambios de superficie neta en el Cuadro 19 se observa que la clase A3 pierde superficie para todos los escenarios de emisiones 2050 A2 pierde 132 km², 2080 A2 217 km², 2050 B2 107 km² y 2080 B2 172 km². Sin embargo la clase A4 incrementa considerablemente su superficie.

Cuadro 19. Matriz de cambios de aptitud final por clases, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080 modelo HadCM3

| Esc. Actual | Escenario 2050 A2 | | | Escenario 2080 A2 | | |
|-------------|-------------------|-----|-------|-------------------|-----|-------|
| | A3 | A4 | Total | A3 | A4 | Total |
| A3 | 316 | 132 | 448 | 99 | 217 | 316 |
| A4 | 341 | 0 | 341 | 0 | 341 | 341 |
| Total | 657 | 132 | 789 | 99 | 558 | 657 |

| Esc. Actual | Escenario 2050 B2 | | | Escenario 2080 B2 | | |
|-------------|-------------------|-----|-------|-------------------|-----|-------|
| | A3 | A4 | Total | A3 | A4 | Total |
| A3 | 316 | 107 | 423 | 144 | 172 | 316 |
| A4 | 341 | 0 | 341 | 0 | 341 | 341 |
| Total | 657 | 107 | 764 | 144 | 513 | 657 |

De manera complementaria a los resultados, en la Figura 20 se muestran las UC por subclases con sus limitaciones. Hacia el año 2050 para el escenario de emisiones A2 (Anexo 1), la subclase de mayor superficie está limitada por 4ReTmin (temperatura mínima) con un área aproximadamente de 261.17 km² esto equivale al 39.83 % del área total. Con respecto al rango de la variable limitante, esta oscila entre 15 a 19 °C, rango que se encuentra por encima de los rangos óptimos que requiere el TUT en estudio.

Por otro lado la subclase que menor área o superficie presenta (0.2 km²) equivalente al 0.02 % del área total, tiene restricciones por 3CapLabor/K/Precip/RiDegSue/ quiere decir que el cultivo de la papa está restringido por precipitación sumado a capacidad de laboreo, potasio y riesgo a degradación del suelo.

Para el escenario 2080 A2 la subclase que mayor área o superficie presenta es 4ReTmin y posee una superficie de 283.20 km² equivalente al 43.11 % del área total (Anexo 2). Esta subclase está agrupada en 521 UC ubicadas desde los 1045 msnm hasta los 2018 msnm donde se encuentra la UC Humo. De manera similar para los escenarios 2050 B2 y 2080 B2 la limitante de mayor restricción es 4ReTmin quiere decir limitado por temperatura mínima (Anexo 4 y 5).

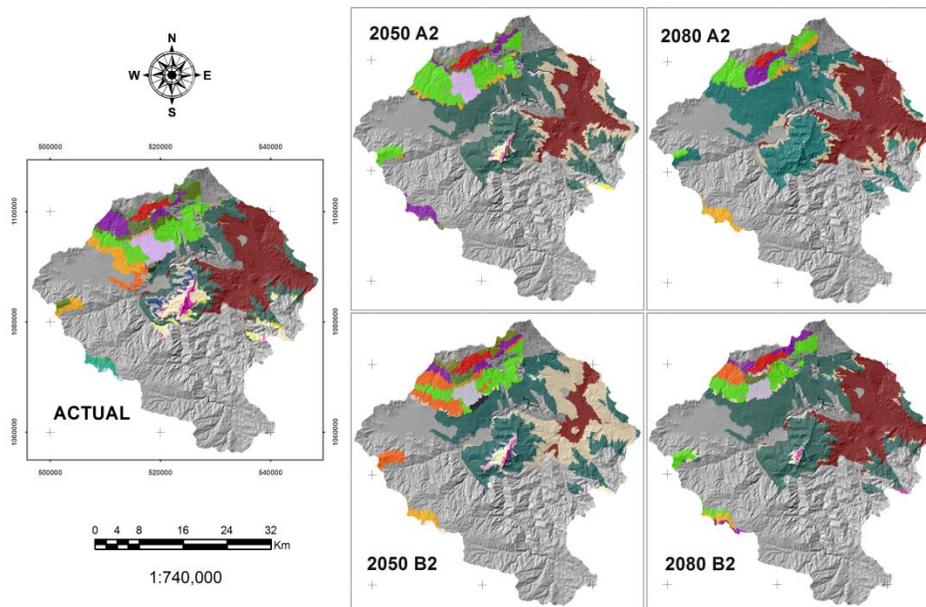


Figura 20. Mapa de aptitud final por subclases bajo escenarios de cambio climático para el modelo HadCM3

4.2.2 Cambios en la aptitud física generados por el modelo CSIRO bajo dos escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080

4.2.2.1 Cambios en la aptitud física por precipitación bajo modelo CSIRO

La comparación del mapa actual potencial (Figura 21), con los mapas de cambios bajo escenarios de emisiones A2 y B2, muestran que la clase A2 (Moderadamente Apto) se constituye la clase de mayor extensión, seguida por la clase A3 (Marginalmente Apto) y luego por la clase A1 (Apto).

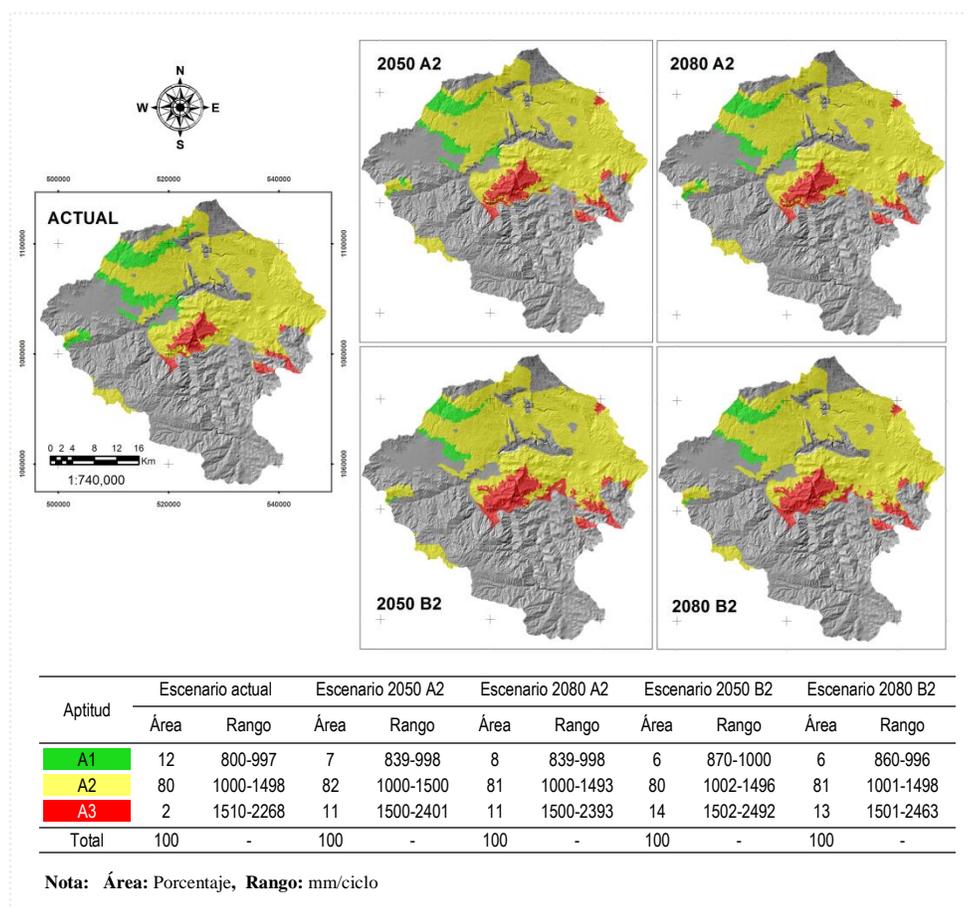


Figura 21. Mapa de cambios de aptitud por precipitación bajo escenarios de cambio climático

La precipitación es uno de los factores de mayor importancia cuando se cultiva papa, y las UC en estudio están caracterizadas y agrupadas en clases con un determinado nivel de aptitud (Rossiter 1998) teniendo en cuenta esta afirmación la clase A1 muestra rangos de precipitación que se encuentran dentro de lo óptimo que requiere el cultivo (400-1000/ciclo o campaña). Sin embargo esta clase posee pequeñas áreas productivas. Las mayores

precipitaciones las presenta la clase A3 que en promedio oscila entre 1500 a 2492 mm/ciclo o campaña. Los niveles de precipitación muy altos, ocupan la mayor parte del espacio poroso del suelo, reduciendo la cantidad de aire, reduciendo la cantidad de aire, lo que perjudica el proceso respiratorio normal de las raíces limitando su desarrollo en condiciones extremas, por lo que el cultivo no puede expresar su potencial rendimiento (Solórzano *et al.* 1993), en consecuencia todo rango de precipitación inferior a los que presenta la clase A1 en condiciones de secano debe considerarse como lluvia no efectiva y sin aporte para el cultivo (Jeréz y Simpfendofer 2000).

En lo que se refiere a las matrices de cambio de superficie neto (Cuadro 20), la clase A1 tiende a reducir su área en todos los escenarios de emisiones estudiadas. Sin embargo la clase A2 tiene una tendencia a mantener sus áreas, es así para el escenario 2050 A2 (38 %), para el 2080 A2 (33 %), 2050 B2 (56 %) y para el escenario 2080 B2 (54 %).

Cuadro 20. Matriz de cambio de aptitud por precipitación, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080

| Esc. Actual | Escenario 2050 A2 | | | | Escenario 2080 A2 | | | | |
|-------------------------|-------------------|----|-----|-------|-------------------|----|-----|-------|-----|
| Aptitud km ² | A1 | A2 | A3 | Total | A1 | A2 | A3 | Total | |
| A1 | 80 | 49 | 31 | 0 | 80 | 53 | 27 | 0 | 80 |
| A2 | 525 | 0 | 507 | 18 | 525 | 0 | 507 | 18 | 525 |
| A3 | 52 | 0 | 0 | 52 | 52 | 0 | 0 | 52 | 52 |
| Total | 657 | 49 | 538 | 70 | 657 | 53 | 534 | 70 | 657 |

| Esc. Actual | Escenario 2050 B2 | | | | Escenario 2080 B2 | | | | |
|-------------------------|-------------------|----|-----|-------|-------------------|----|-----|-------|-----|
| Aptitud km ² | A1 | A2 | A3 | Total | A1 | A2 | A3 | Total | |
| A1 | 80 | 35 | 45 | 0 | 80 | 37 | 43 | 0 | 80 |
| A2 | 525 | 0 | 484 | 41 | 525 | 0 | 489 | 36 | 525 |
| A3 | 52 | 0 | 0 | 52 | 52 | 0 | 0 | 52 | 52 |
| Total | 657 | 35 | 529 | 93 | 657 | 37 | 532 | 88 | 657 |

4.2.2.2 Cambios en la aptitud física por temperatura máxima bajo el modelo CSIRO

Los resultados de la evaluación realizadas con este modelo, nos muestran tres clases de Aptitud con sus determinados rangos de temperatura. La clase A1 muestra una superficie menor en comparación con las clases A3 y A4, es así que el 16 % representa al escenario (2050 A2), 13 % (2080 A2), 16 % (2050 B2) y 14 % para el escenario 2080B2. Esta clase se caracteriza por tener un promedio de rango óptimo que oscila entre 14 a 22 °C (Figura 22).

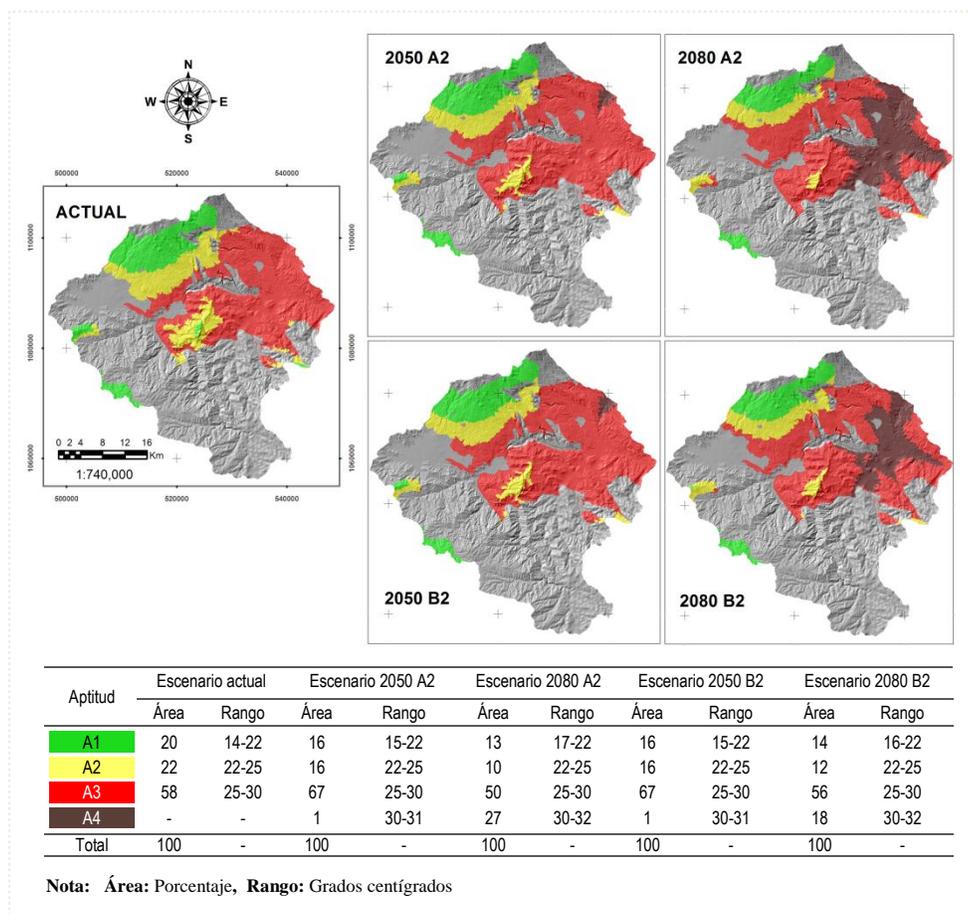


Figura 22. Mapa de cambios de aptitud por temperatura máxima bajo escenarios de cambio climático

La clase A2 muestra alguna similitud con la clase A1 en cuanto a superficie reporta, sin embargo esta clase se caracteriza por ser Moderadamente Apta y poseer rangos en temperatura máxima que oscila entre 22 a 25 °C. Respecto a la clase A3 hacia el año 2050 para ambos escenarios de emisiones A2 y B2 presenta un incremento en superficie de 67 % equivalente a 440 km² con respecto al escenario base (58 %). Esta clase se caracteriza por tener temperaturas mayores a 25 °C perjudicando una de las fases fenológicas más críticas del cultivo de la papa, la tuberización (MAG 2000).

Por otra parte la clase A4 aparece a partir del año 2050 en adelante bajo todos los escenarios de emisiones, en esta clase toda actividad productiva relacionada con el cultivo de la papa los rendimientos serán cero, excepto que los agricultores opten en cultivar papa bajo tecnologías de invernadero.

En lo que se refiere a las matrices de cambio de superficie neto Cuadro 21 la clase A2 tiende a perder significativamente superficie hacia la clase A3. Estas pérdidas de áreas se muestran hacia el año 2050 para ambos escenarios de emisiones A2 y B2 un total de 64 km² equivalentes al 9.7 %, sin embargo hacia el año 2080 con el escenario A2 suscita una pérdida de superficie de A2 127 km² esto representa el 19.3 % del área total. En consecuencia para el mismo horizonte de tiempo con el escenario B2 pierden 100 km² equivalente al 15.2 % de área total.

Cuadro 21. Matriz de cambio de aptitud por temperatura máxima, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080

| Esc. Actual | Escenario 2050 A2 | | | | | | Escenario 2080 A2 | | | | |
|-------------------------|-------------------|-----|-----|-----|-------|-----|-------------------|----|-----|-------|-----|
| Aptitud km ² | A1 | A2 | A3 | A4 | Total | A1 | A2 | A3 | A4 | Total | |
| A1 | 129 | 106 | 23 | 0 | 0 | 129 | 82 | 47 | 0 | 0 | 129 |
| A2 | 144 | 0 | 80 | 64 | 0 | 144 | 0 | 17 | 127 | 0 | 144 |
| A3 | 384 | 0 | 0 | 376 | 8 | 384 | 0 | 0 | 210 | 174 | 384 |
| Total | 657 | 106 | 103 | 440 | 8 | 657 | 82 | 64 | 337 | 174 | 657 |

| Esc. Actual | Escenario 2050 B2 | | | | | | Escenario 2080 B2 | | | | |
|-------------------------|-------------------|-----|-----|-----|-------|-----|-------------------|----|-----|-------|-----|
| Aptitud km ² | A1 | A2 | A3 | A4 | Total | A1 | A2 | A3 | A4 | Total | |
| A1 | 129 | 106 | 23 | 0 | 0 | 129 | 92 | 37 | 0 | 0 | 129 |
| A2 | 144 | 0 | 80 | 64 | 0 | 144 | 0 | 44 | 100 | 0 | 144 |
| A3 | 384 | 0 | 0 | 376 | 8 | 384 | 0 | 0 | 268 | 116 | 384 |
| Total | 657 | 106 | 103 | 440 | 8 | 657 | 92 | 81 | 368 | 116 | 657 |

4.2.2.3 Cambios en la aptitud física por temperatura media bajo el modelo CSIRO

Los resultados para la aptitud física por temperatura media (Figura 23) muestran tres clases de aptitud. La clase sin restricción alguna representa A1 sin embargo son las áreas que prometen mayores rendimientos pero poseen menores superficies. La clase A1 tiende a perder superficie entre 16 a 21 % hacia todos los horizontes de tiempo con los escenarios de emisiones A y B2. Similar comportamiento presenta la clase A2.

La clase A3 se constituye la de mayor superficie en la zona estudiada, sin embargo esta clase es Marginalmente Apto. Con respecto a la temperatura medio el mejor promedio y condiciones agroecológicas (16 a 20 °C) es representada por el nivel más alto de aptitud (A1) donde no existen restricciones para el desarrollo óptimo del TUT en estudio.

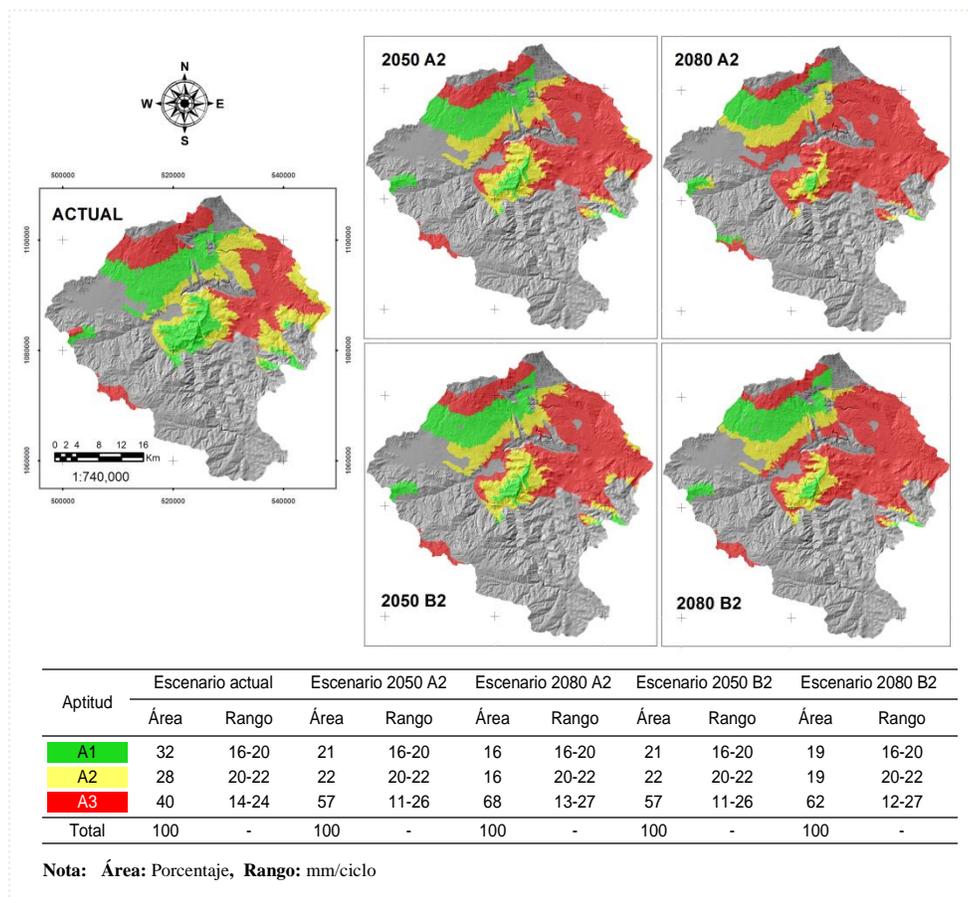


Figura 23. Mapa de cambios de aptitud por temperatura media bajos escenarios de cambio climático

En las matrices de cambios de superficies neto Cuadro 22 se muestra que la clase A1 pierde una superficie de 101 km² para los escenarios 2050 A2 y 2050 B2. Similares pérdidas se presentan para los escenarios de emisiones 2080 A2 170 km² y 2080 B2 137 km².

Cuadro 22. Matriz de cambio de aptitud por temperatura media, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080

| Esc. Actual | Escenario 2050 A2 | | | | Escenario 2080 A2 | | | | |
|-------------|-------------------------|-----|-----|-----|-------------------|-----|-----|-----|-------|
| | Aptitud km ² | A1 | A2 | A3 | Total | A1 | A2 | A3 | Total |
| A1 | 210 | 109 | 101 | 0 | 210 | 40 | 102 | 68 | 210 |
| A2 | 182 | 0 | 40 | 142 | 182 | 0 | 0 | 182 | 182 |
| A3 | 265 | 31 | 0 | 234 | 265 | 66 | 0 | 199 | 265 |
| Total | 657 | 140 | 141 | 376 | 657 | 106 | 102 | 449 | 657 |

| Esc. Actual | Escenario 2050 B2 | | | | Escenario 2080 B2 | | | | |
|-------------|-------------------------|-----|-----|-----|-------------------|-----|-----|-----|-------|
| | Aptitud km ² | A1 | A2 | A3 | Total | A1 | A2 | A3 | Total |
| A1 | 210 | 109 | 101 | 0 | 210 | 73 | 124 | 13 | 210 |
| A2 | 182 | 0 | 40 | 142 | 182 | 0 | 0 | 182 | 182 |
| A3 | 265 | 31 | 0 | 234 | 265 | 51 | 0 | 214 | 265 |
| Total | 657 | 140 | 141 | 376 | 657 | 124 | 124 | 409 | 657 |

4.2.2.4 Cambios en la aptitud física por temperatura mínima bajo el modelo CSIRO

Los resultados para la aptitud física por temperatura mínima (Figura 24) reportan tres clases de aptitud. La clase A1 hacia el año 2050 con el escenario de emisiones A2 muestra que al menos el 30 % equivalente a 200 km² de la cuenca alta del río Reventazón no presenta restricción o limitante alguna para obtener indicadores de rendimientos óptimos. Similar tendencia se muestra con el escenario B2 para el mismo horizonte de tiempo que al menos el 32 % equivalente a 209 km² es de condición óptima.

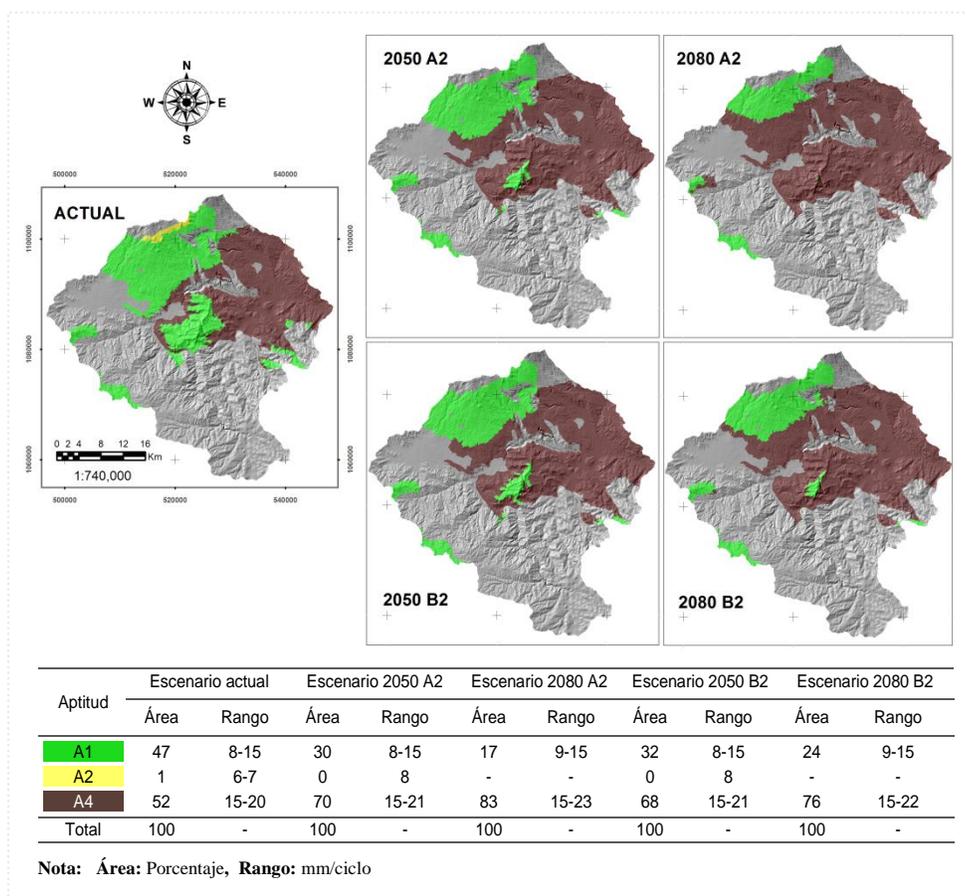


Figura 24. Mapa de cambios de aptitud por temperatura mínima bajo escenarios de cambio climático

Sin embargo hacia el año 2080 con los escenarios A2 y B2, la clase A1 tiende a reducir sus áreas a 17 % (112 km²) y a 24 % (156 km²) con respecto al escenario base. En contraste la clase A4 ocupa un 52 % del área total para el escenario base. Hacia los años 2050 y 2080 con

los escenarios de emisiones A2 y B2 esta misma clase (A4) tiende a incrementar las tierras con limitaciones para el desarrollo óptimo del TUT en estudio.

En lo que se refiere a las matrices de cambio de superficie neto (Cuadro 23), la clase A1 de más alto nivel de aptitud cede superficie a la clase A4 con los escenarios de emisiones A2 y B2 para todos los horizontes de tiempo. Es así para el escenario A2 hacia el año 2050 pierde una superficie de 190 km² que representa el 29 % del área total y para el año y 2080 102 km² que representa el 16 % del área total. Esta misma tendencia presenta el escenario B2 hacia los años 2050 y 2080 con pérdidas en superficie de 199 km² (30 %) y 146 km² equivalentes al (22 %) del área total estudiada. Sin embargo la clase A4 tiende a mantener su área base para todos los escenarios de emisiones.

Cuadro 23. Matriz de cambio de aptitud por temperatura mínima, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080

| Esc. Actual | Escenario 2050 A2 | | | | Escenario 2080 A2 | | | | |
|-------------------------|-------------------|-----|----|-------|-------------------|-----|----|-------|-----|
| | A1 | A2 | A4 | Total | A1 | A2 | A4 | Total | |
| Aptitud km ² | | | | | | | | | |
| A1 | 306 | 190 | 0 | 116 | 306 | 102 | 0 | 204 | 306 |
| A2 | 10 | 10 | 0 | 0 | 10 | 10 | 0 | 0 | 10 |
| A4 | 341 | 0 | 0 | 341 | 341 | 0 | 0 | 341 | 341 |
| Total | 657 | 200 | 0 | 457 | 657 | 112 | 0 | 545 | 657 |

| Esc. Actual | Escenario 2050 A2 | | | | Escenario 2080 A2 | | | | |
|-------------------------|-------------------|-----|----|-------|-------------------|-----|----|-------|-----|
| | A1 | A2 | A4 | Total | A1 | A2 | A4 | Total | |
| Aptitud km ² | | | | | | | | | |
| A1 | 306 | 199 | 0 | 107 | 306 | 146 | 0 | 160 | 306 |
| A2 | 10 | 10 | 0 | 10 | 10 | 10 | 0 | 0 | 10 |
| A4 | 341 | 0 | 0 | 341 | 341 | 0 | 0 | 341 | 341 |
| Total | 657 | 209 | 0 | 448 | 657 | 156 | 0 | 501 | 657 |

4.2.2.5 Cambios en aptitud climática del cultivo de la papa por subclases bajo el modelo CSIRO.

Los resultados para la aptitud climática del cultivo de la papa reportan en la Figura 25 como cuatro clases de aptitud. Esta evaluación está determinada por la precipitación y temperatura (máxima, media y mínima). Los resultados muestran una superficie muy reducida para clase A1 (1 %) para el escenario base. Sin embargo suele tener un leve incremento hacia el año 2080 con el escenario de emisiones A2 (4 %) y B2 (3 %) del área total.

Este leve incremento de la clase A1, permiten crear condiciones agroecológicas favorables u óptimas para que el cultivo de la papa se desarrolle sin ninguna restricción o limitación alguna para esos horizontes de tiempo con los escenario de emisiones A2 y B2.

La clase que presenta mayor superficie es la clase A4 limitado por 4ReTmax/Tmin para todos los escenarios de emisiones considerando el escenario base. Para esta misma clase el incremento de superficie más significativo se presenta hacia el año 2080 con el escenario de emisiones A2 incrementándose en un 83 % equivalente a 546 km² del área total con respecto al escenario base.

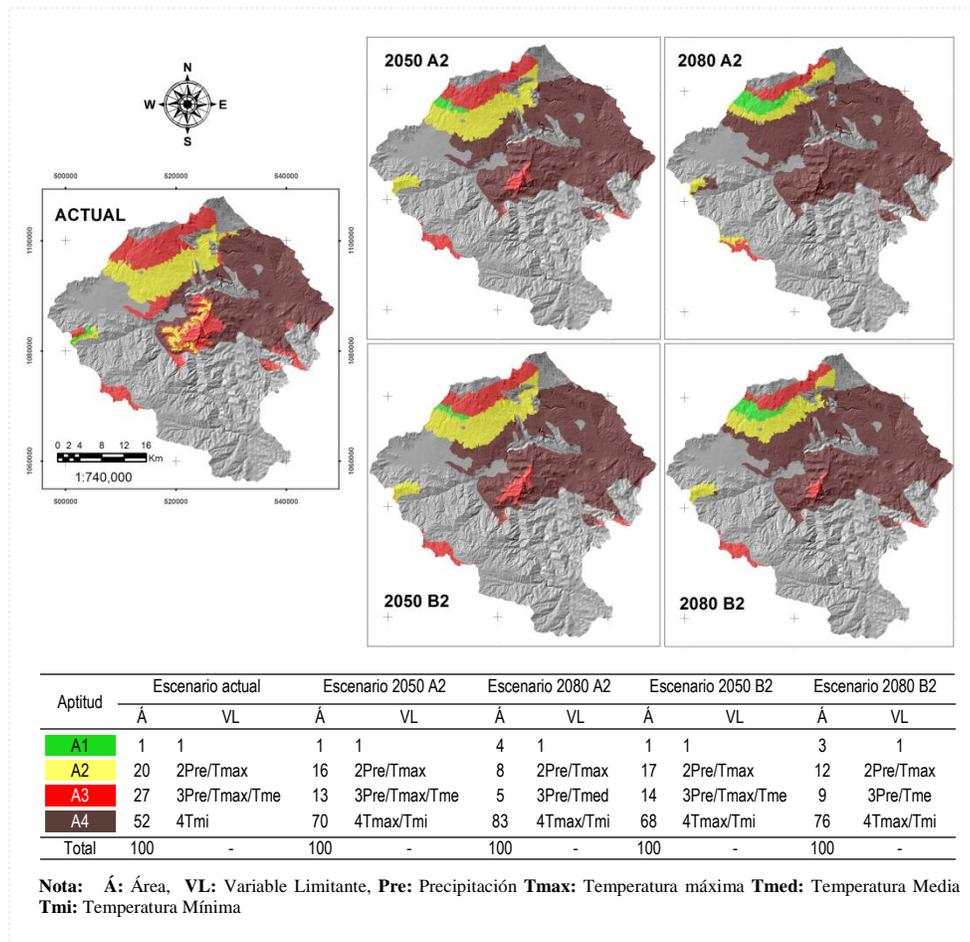


Figura 25. Mapa de subclases de aptitud climática bajo escenarios de cambio climático

En lo que se refiere a las matrices de cambio de superficie neto (Cuadro 24) la clase A4 mantiene su área en 341 km² para todos los escenarios. En contraste la clase A2 y A3 ceden superficie a la clase A4. Hacia el año 2050 con los escenarios de emisiones A2 y B2 la clase A3 pierde superficie aproximadamente 65 km² (10 %) y 80 km² equivalente al (12 %) del área total, estas pérdidas de áreas hace que la clase A4 tenga mayor presencia en la cuenca alta del

río Reventazón. Similares pérdidas se presentan con los escenarios 2080 A2 58 km² que representa el (9 %) y con el escenario 2080 B2 71 km² (11 %) del área total.

Cuadro 24. Matriz de cambio de aptitud por interrelacionando las variables climáticas, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080

| Esc. Actual | Escenario 2050 A2 | | | | | Escenario 2080 A2 | | | | | |
|-------------------------|-------------------|----|-----|----|-------|-------------------|----|----|----|-------|-----|
| Aptitud km ² | A1 | A2 | A3 | A4 | Total | A1 | A2 | A3 | A4 | Total | |
| A1 | 4 | 0 | 4 | 0 | 0 | 4 | 0 | 2 | 0 | 2 | 4 |
| A2 | 131 | 0 | 80 | 0 | 51 | 131 | 0 | 8 | 0 | 123 | 131 |
| A3 | 181 | 8 | 23 | 85 | 65 | 181 | 23 | 42 | 36 | 80 | 181 |
| A4 | 341 | 0 | 0 | 0 | 341 | 341 | 0 | 0 | 0 | 341 | 341 |
| Total | 657 | 8 | 107 | 85 | 457 | 657 | 23 | 52 | 36 | 546 | 657 |

| Esc. Actual | Escenario 2050 B2 | | | | | Escenario 2080 B2 | | | | | |
|-------------------------|-------------------|----|-----|----|-------|-------------------|----|----|----|-------|-----|
| Aptitud km ² | A1 | A2 | A3 | A4 | Total | A1 | A2 | A3 | A4 | Total | |
| A1 | 4 | 0 | 4 | 0 | 0 | 4 | 0 | 4 | 0 | 0 | 4 |
| A2 | 131 | 0 | 82 | 0 | 49 | 131 | 0 | 42 | 0 | 89 | 131 |
| A3 | 181 | 6 | 25 | 92 | 58 | 181 | 20 | 31 | 59 | 71 | 181 |
| A4 | 341 | 0 | 0 | 0 | 341 | 341 | 0 | 0 | 0 | 341 | 341 |
| Total | 657 | 6 | 111 | 92 | 448 | 657 | 20 | 77 | 59 | 501 | 657 |

4.2.2.6 Cambios en la distribución geográfica de las áreas con riesgo a “*T. solanivora*” bajo el modelo CSIRO

Los resultados por riesgo a “*T. solanivora*” para el cultivo de la papa se muestran en la Figura 26 donde se observa que el escenario base presenta dos clases de aptitud A2 y A3 que al aplicar los escenarios de emisiones se crean mejores condiciones agroecológicas y nuevas áreas de aptitud. Es así que la clase A1 aparezca hacia 2050 con el escenario de emisiones A2.

A su vez, la misma clase (A1) hacia el año 2080 presenta un incremento de 129 km² que representa el 20 % del área total.

Sin embargo hacia el año 2050 con el escenario B2 la clase A1 tiende a reducir su área a 80 km² que representa el 1 % del área total.

Del mismo modo en la zona de estudio también se muestra una clase de aptitud para cultivo de la papa aunque con cierto grado de restricción la clase A2 (Moderadamente Apto) esta clase tiende a incrementar su superficie hacia el año 2050 con los escenarios A2 y B2 en 35 % (230 km²) y 39 % equivalentes a 256 km² del área total con respecto al escenario base.

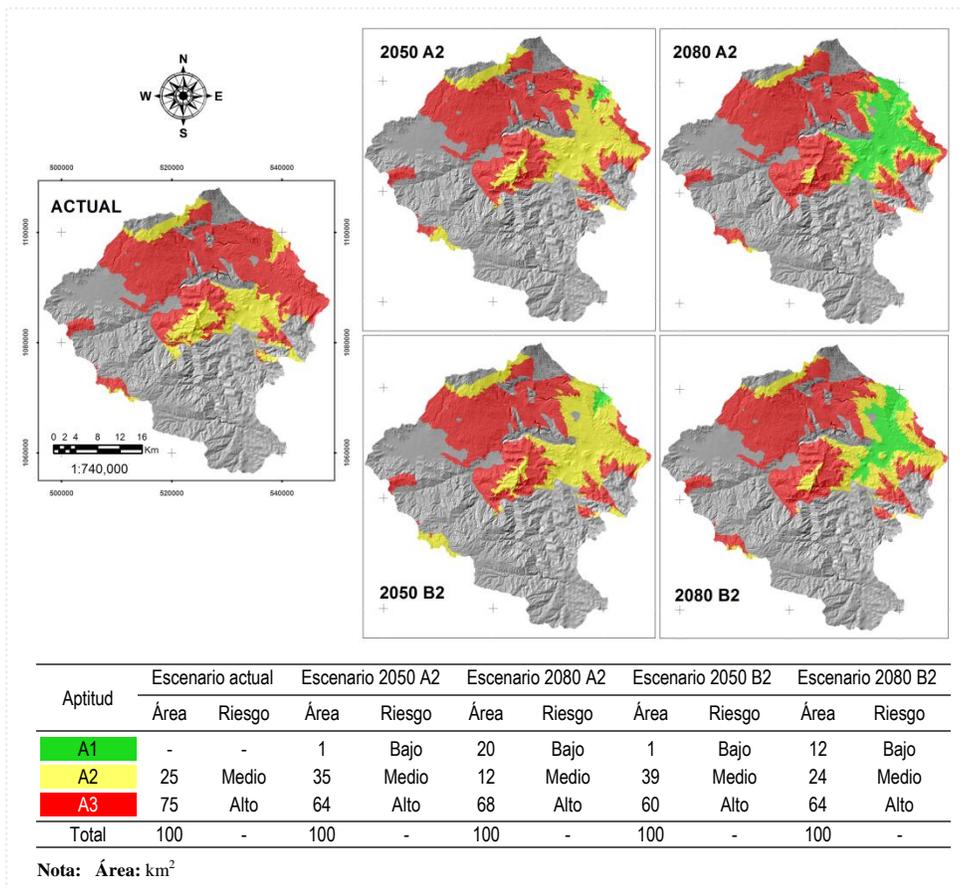


Figura 26 Mapa de riesgo por *Tecia solanivora* en las zonas de aptitud bajo escenarios de cambio climático

En lo que se refiere a las matrices de cambio de superficie neto (Cuadro 25) la clase A2 reduce sus áreas hacia los años 2050 y 2080. Sin embargo las pérdidas de áreas de mayor consideración se suscitan hacia el año 2050 con los escenarios de emisiones A2 y B2 con una pérdida en aproximadamente de 125 km² que representa el 19 % del área total.

Cuadro 25. Matriz de cambio de aptitud por *T. solanivora*, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080

| Esc. Actual | Escenario 2050 A2 | | | | Escenario 2080 A2 | | | | |
|-------------|-------------------|----|-----|-------|-------------------|-----|----|-------|-----|
| | A1 | A2 | A3 | Total | A1 | A2 | A3 | Total | |
| A2 | 166 | 8 | 125 | 33 | 166 | 56 | 45 | 65 | 166 |
| A3 | 491 | 0 | 105 | 386 | 491 | 73 | 37 | 381 | 491 |
| Total | 657 | 8 | 230 | 419 | 657 | 129 | 82 | 446 | 657 |

| Esc. Actual | Escenario 2050 B2 | | | | Escenario 2080 B2 | | | | |
|-------------|-------------------|----|-----|-------|-------------------|----|-----|-------|-----|
| | A1 | A2 | A3 | Total | A1 | A2 | A3 | Total | |
| A2 | 166 | 8 | 125 | 33 | 166 | 31 | 83 | 52 | 166 |
| A3 | 491 | 0 | 131 | 360 | 491 | 47 | 73 | 371 | 491 |
| Total | 657 | 8 | 256 | 393 | 657 | 78 | 156 | 423 | 657 |

4.2.2.7 Cambios en la distribución geográfica de las áreas con riesgo a “*P. infestans*” bajo el modelo CSIRO

Los resultados del riesgo a “*P. infestans*” para el cultivo de la papa se reporta en la Figura 27 en dos clases de aptitud. En términos generales la clase que predomina en la zona de estudio es A3 y muestra un riesgo alto (RA) que cubre más del 90 % del área total. Hacia los años 2080 con los escenarios A2 y B2 muestran que el 100 % equivalente al 657 km² de la cuenca alta del río Reventazón tiene un RA. Estos resultados confirman el uso exagerado y constante de insumos químicos (MAG 2007).

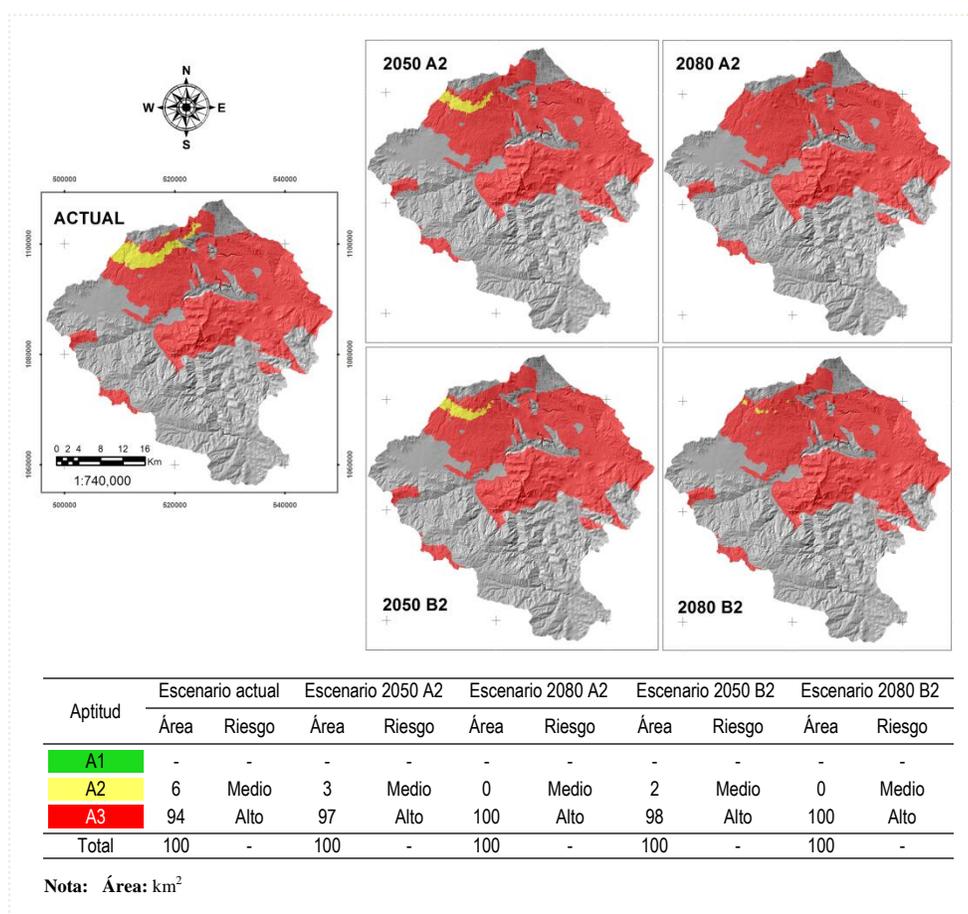


Figura 27. Mapa de riesgo por *P. infestans* en las zonas de aptitud bajo escenarios de cambio climático

Este uso constante de insumos químicos se traduce en mayores cantidades de ingrediente activo y en mayor número de aplicaciones por campaña. Precisamente el uso de variedades resistentes a *P. infestans* propiciaría una reducción en los costos de manejo de esta enfermedad, que actualmente supera los 500 dólares americanos por hectárea, producto de más

de 20 aplicaciones de fungicidas durante el ciclo o campaña del cultivo (FONTAGRO 2010). La reducción a la mitad de la cantidad de aplicaciones de fungicida generaría impactos positivos de tipo económico y ambiental significativos (MAG 2007). Teniendo en cuenta la situación actual que los paperos aplican más de 20 aplicaciones de fungicidas por ciclo. Se puede suponer que esta tendencia actual se va mantener en la cuenca alta del río Reventazón.

En lo que se refiere a las matrices de cambio de superficie neto (Cuadro 26), la clase A2 hacia el año 2080 con el escenario de emisiones A2 pierde sus áreas en un 100 % cubriendo de esta manera todo el área con riesgo alto por *P. infestans*. Sin embargo hacia el año 2050 con los escenarios de emisiones A2 y B2 se esperarían las mismas áreas.

Cuadro 26. Matriz de cambio de aptitud por P. infestans, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080

| Esc. Actual | Escenario 2050 A2 | | | | Escenario 2080 A2 | | |
|-------------|-------------------------|----|-----|-------|-------------------|-----|-------|
| | Aptitud km ² | A2 | A3 | Total | A2 | A3 | Total |
| A2 | 38 | 16 | 22 | 38 | 0 | 38 | 38 |
| A3 | 619 | 0 | 619 | 619 | 0 | 619 | 619 |
| Total | 657 | 16 | 641 | 657 | 0 | 657 | 657 |

| Esc. Actual | Escenario 2050 B2 | | | | Escenario 2080 B2 | | |
|-------------|-------------------------|----|-----|-------|-------------------|-----|-------|
| | Aptitud km ² | A2 | A3 | Total | A2 | A3 | Total |
| A2 | 38 | 15 | 23 | 38 | 2 | 36 | 38 |
| A3 | 619 | 0 | 619 | 619 | 0 | 619 | 619 |
| Total | 657 | 15 | 642 | 657 | 2 | 655 | 657 |

4.2.2.8 Cambios en la distribución geográfica de las áreas con riesgo a degradación del suelo bajo el modelo CSIRO

Los resultados por riesgo a degradación del suelo en la zona de estudio se reportan en la Figura 28 tres clases de aptitud asociados a un nivel de riesgo. Es decir la clase A1 tiene un Riesgo Bajo (RB) la clase A2 Riesgo Medio (RM) y la clase A3 Riesgo Alto (RA).

Comparando el mapa de riesgo actual con los mapas de cambio se puede observar que la clase A3 presenta un RA muy marcado para todos los escenarios de cambio. Sin embargo las áreas de la clase A2 tienden a reducir en 45 % para los escenarios 2050 A2 y 2080 A2 con respecto al escenario actual.

La misma tendencia de reducción presentan los escenarios 2050 B2 (41 %) y 2080 B2 (42 %).

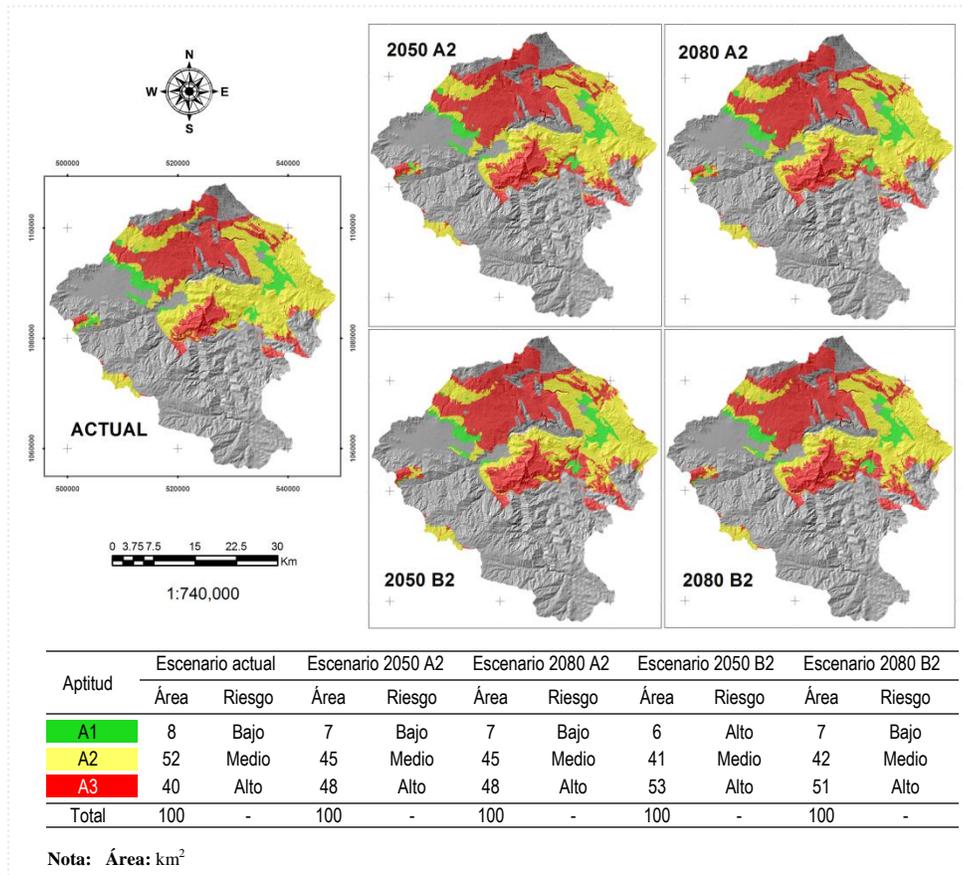


Figura 28 Mapa de riesgo por degradación del suelo en las zonas de aptitud bajo escenarios de cambio climático

Según las matrices de cambio (Cuadro 27) muestran que la clase A2 pierde superficie con todos los escenarios de emisiones evaluados. Estas pérdidas se manifiestan hacia el año 2050 con el escenario de emisiones B2 (83 km²) y hacia el año 2080 B2 con el escenario de emisiones B2 (74 km²). Con respecto a la clase A1 hacia los años 2050 y 2080 con el escenario de emisiones A2 la superficie se mantiene en 49 km², sin embargo con respecto al escenario actual sufre una reducción de 5 km².

Cuadro 27. Matriz de cambio de aptitud por riesgo a degradación del suelo, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080

| Esc. Actual Aptitud km ² | Escenario 2050 A2 | | | | Escenario 2080 A2 | | | | |
|--|-------------------|----|-----|-------|-------------------|----|-----|-------|-----|
| | A1 | A2 | A3 | Total | A1 | A2 | A3 | Total | |
| A1 | 54 | 49 | 3 | 2 | 54 | 49 | 3 | 2 | 54 |
| A2 | 343 | 0 | 292 | 51 | 343 | 0 | 293 | 50 | 343 |
| A3 | 260 | 0 | 0 | 260 | 260 | 0 | 0 | 260 | 260 |
| Total | 657 | 49 | 295 | 313 | 657 | 49 | 296 | 312 | 657 |

| Esc. Actual Aptitud km ² | Escenario 2050 B2 | | | | Escenario 2080 B2 | | | | |
|--|-------------------|----|-----|-------|-------------------|----|-----|-------|-----|
| | A1 | A2 | A3 | Total | A1 | A2 | A3 | Total | |
| A1 | 54 | 45 | 7 | 2 | 54 | 45 | 7 | 2 | 54 |
| A2 | 343 | 0 | 260 | 83 | 343 | 0 | 269 | 74 | 343 |
| A3 | 260 | 0 | 0 | 260 | 260 | 0 | 0 | 260 | 260 |
| Total | 657 | 45 | 267 | 345 | 657 | 45 | 276 | 336 | 657 |

4.2.2.9 Cambios en la aptitud física considerando la interrelación de todas las variables biofísicas bajo cambio climático

En la Figura 29 se muestran los cambios en la aptitud física en la zona alta del río Reventazón, donde se observa dos clases de aptitud A3 (Marginalmente Apto) y A4 (No Apto), se reporta la ausencia de UC con aptitud física A1 (Apto) y A2 (Moderadamente Apto) debido a la existencia de cualidades que limitan el desarrollo potencial del TUT en estudio.

Los cambios de aptitud se reportan para las dos clases A3 y A4. Sin embargo las áreas de mejor aptitud (A3) tienden a reducirse con todos los escenarios de emisiones evaluados hacia los años 2050 y 2080 con respecto al escenario actual.

Por otro lado la clase A4 incrementa sus áreas para todos los escenarios de emisiones hacia los años 2050 y 2080 con respecto al escenario actual (52 %). Es así que para los escenarios 2050 A2 la superficie se incrementa en 70 % (457 km²), 2080 A2 en 83 % (545 km²). Sin embargo hacia el año 2050 con los escenarios de emisiones B2 esta clase reporta un incremento de 68 % (448 km²).

Finalmente para el escenario 2080 B2 reporta un incremento de 76 % del área total que equivale a 501 km².

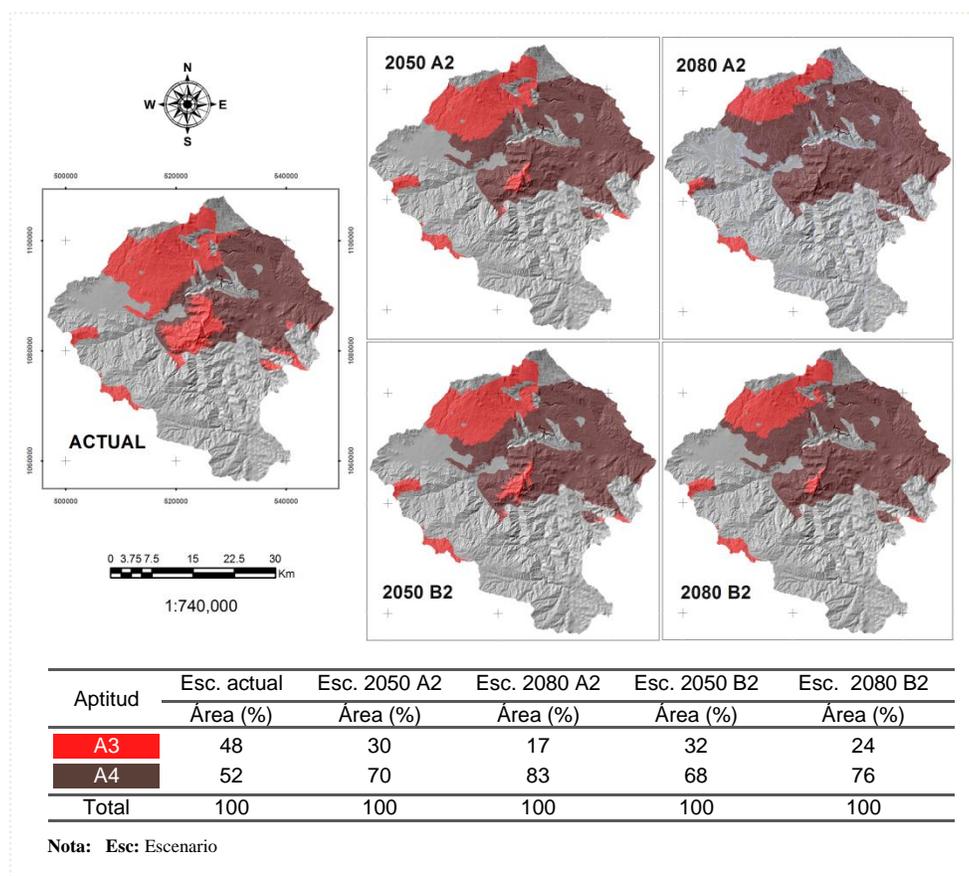


Figura 29. Mapa de aptitud final por clases bajo escenarios de cambio climático para el modelo CSIRO

En lo que se refiere a las matrices de cambio de superficie neto (Cuadro 28), la clase A3 la de mejor nivel de aptitud física para el cultivo de la papa, tiende a ceder sus áreas en un total de 587 km² hacia los años 2050 y 2080 para todos los escenarios de emisiones A2 y B2.

Cuadro 28. Matriz de cambios de aptitud final por clases, escenario actual versus escenarios A2 y B2 para los años 2050 y 2080 modelo CSIRO

| Esc. Actual Aptitud km ² | Escenario 2050 A2 | | | Escenario 2080 A2 | | | |
|--|-------------------|-----|-------|-------------------|-----|-------|-----|
| | A3 | A4 | Total | A3 | A4 | Total | |
| A3 | 316 | 200 | 116 | 316 | 112 | 204 | 316 |
| A4 | 341 | 0 | 341 | 341 | 0 | 341 | 341 |
| Total | 657 | 200 | 457 | 657 | 112 | 545 | 657 |

| Esc. Actual Aptitud km ² | Escenario 2050 B2 | | | Escenario 2080 B2 | | | |
|--|-------------------|-----|-------|-------------------|-----|-------|-----|
| | A3 | A4 | Total | A3 | A4 | Total | |
| A3 | 316 | 209 | 107 | 316 | 156 | 160 | 316 |
| A4 | 341 | 0 | 341 | 341 | 0 | 341 | 341 |
| Total | 657 | 209 | 448 | 657 | 156 | 501 | 657 |

Sin embargo las zonas de aptitud muestran limitaciones determinadas por subclases de aptitud (Figura 30). Estas limitaciones influyen en la reducción e incremento de las áreas de aptitud para el cultivo de la papa en la zona de estudio. Es así que para la clase A3 hacia el año 2050 con el escenario de emisiones A2 la subclase de mayor superficie es de 70.4 km² equivalente al 10.72 % y se encuentra limitado por 3ReqPoli/DegSue/Tizon es decir riesgo a *T. solanivora*, riesgo a degradación del suelo y riesgo a *P. infestans*.

Se observa para el mismo año 2050 con el escenario de emisiones A2 la subclase de menor área está limitado por 3CapLabor/CondEnra/RelCalMg/ReqPoli/RiTizon y presenta un área de 6.4 km² equivalente a (0.97 %) del área total (Anexo 6). Esta subclase está limitada por Capacidad de laboreo que involucra UC con pendientes y porcentajes de pedregosidad significativo; a su vez, presenta limitaciones por Condiciones de Enraizamiento determinado por la profundidad del suelo y pedregosidad asociado a la relación Calcio y Magnesio, riesgo a polilla y riesgo a tizón.

Para la clase A4 hacia el mismo horizonte de tiempo escenario de emisiones, el área de mayor extensión presenta 245.71 km² equivalente al 37.40 % del área total limitado por la subclase 4ReTmin esto determina que esta subclase está limitado por la temperatura mínima que impera en la zona de estudio (15 a 21 °C) rango muy por encima de los RUT óptimos para el TUT en estudio.

Hacia el año 2080 con el escenario de emisiones A2 la subclase de mayor área (333.5 km²) equivalente al 50.76 % presenta una restricción por 4ReTmin es decir limitado por temperatura mínima. Sin embargo hacia el año 2050 con el escenario de emisiones B2 presenta la misma restricción 4Retmin.

Por otro lado la subclase de menor área se presenta hacia el año 2080 con el escenario B2 con 0.2 km² equivalente al 0.02 % del área total y se encuentra limitado por 3CapLabor/RePoli/RiDegSue/RiTizon esta subclase pertenece a la UC Madre Selva ubicada a 1612 msnm (Anexo 9).

Por otra parte para el mismo año y escenario de emisiones la subclase 4ReTmin reporta 289.5 km² que representa el 44.06 % del área total de la cuenca alta del río Reventazón (Anexo 9).

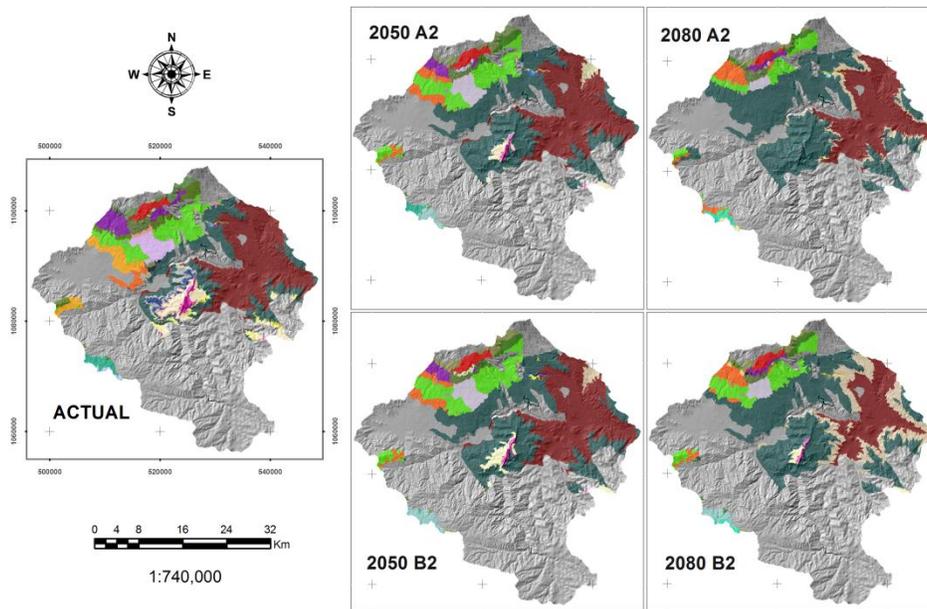


Figura 30 Mapa de aptitud final por subclases bajos escenarios de cambio climático para el modelo CSIRO

4.3 Resumen de las superficies por clase de aptitud bajo los modelos HadCM3 y CSIRO

En el Cuadro 29 se presentan las superficies cubiertas por nivel de aptitud a partir de las variables climáticas para los dos modelos en estudio de acuerdo a los requerimientos del cultivo de la papa. En el área de estudiada hay ausencia de la clase de mayor nivel según la metodología de FAO A1 (Apto). Sin embargo en la clase A3 (Marginalmente Apto) con superficie de 316 km² equivalente al 48 % del área total es donde actualmente se viene desarrollando todo el sistema de la agrocadena de papa. En relación a la clase A4 (No Apto) que ocupa el 52 % (341 km²) del área total, cabe notar que físicamente no presenta las condiciones agroecológicas favorables para que un sistema agrícola relacionado al cultivo de la papa se desarrolle óptimamente.

Con el modelo HadCM3 la clase A3 tiende a sufrir una reducción de superficie con los escenarios de emisiones A2 y B2 hacia los años 2050 y 2080, donde la mayor reducción observada se da hacia el año 2050 con el escenario de emisiones B2 con respecto al escenario base de (316 km²) a 209 km². Similar comportamiento de reducción de superficie se reporta para el año 2050 con el escenario de emisiones A2 bajo el modelo CSIRO. Solamente para los escenarios 2080 A2 bajo el modelo HadCM3 y CSIRO tienden a incrementar sus superficies a 558 km² y 545 km² con respecto al escenario base.

Cuadro 29. Resumen de las clases de aptitud por superficie actual y de cambio bajo dos escenarios de emisiones A2 y B2 para los años 2050 y 2080

| Escenario | Superficie por clase de Aptitud (km ²) y (%) | | | |
|------------------|--|-----|--------------|-----|
| | Moderadamente Apto (A3) | (%) | No Apto (A4) | (%) |
| Potencial Actual | 316 | 48 | 341 | 52 |
| HadCM3 2050 A2 | 184 | 28 | 473 | 72 |
| HadCM3 2080 A2 | 99 | 15 | 558 | 85 |
| HadCM3 2050 B2 | 209 | 32 | 448 | 68 |
| HadCM3 2080 B2 | 144 | 22 | 513 | 78 |
| CSIRO 2050 A2 | 200 | 30 | 457 | 70 |
| CSIRO 2080 A2 | 112 | 17 | 545 | 83 |
| CSIRO 2050 B2 | 209 | 32 | 448 | 68 |
| CSIRO 2080 B2 | 156 | 24 | 501 | 76 |

En la Figura 31, se muestran las superficies en términos porcentuales para el escenario actual potencial bajo escenarios de emisiones A2 y B2 hacia los horizontes de tiempo 2050 y 2080 para los modelos HadCM3 y CSIRO. La clase A4 en condiciones actuales con 52 % en superficie muestra un incremento significativo hacia el año 2080 con el escenario de emisiones A2 de 85 % del área total para el modelo HadCM3. Similar aumento de superficie se observa hacia el año 2080 con el escenario A2 bajo el modelo CISRO de 52 % condición actual al 83 % condición futura. Siendo esta clase (A4) la que mayor superficie ocupa en la cuenca alta del río Reventazón.

Sin embargo en las tierras con clase A3 (Marginalmente Apto) donde actualmente se desarrolla toda una política agrícola hortícola, se encuentran ubicados 691 productores de papa (Vallejos 1997), sin embargo en estas tierras con limitantes fisiográficas y climáticas, el productor hace lo posible para dar una aptitud que se refleja en la utilización desmesurada de fertilizantes y agroquímicos, ocasionando impactos económicos y ambientales (MAG 2003).

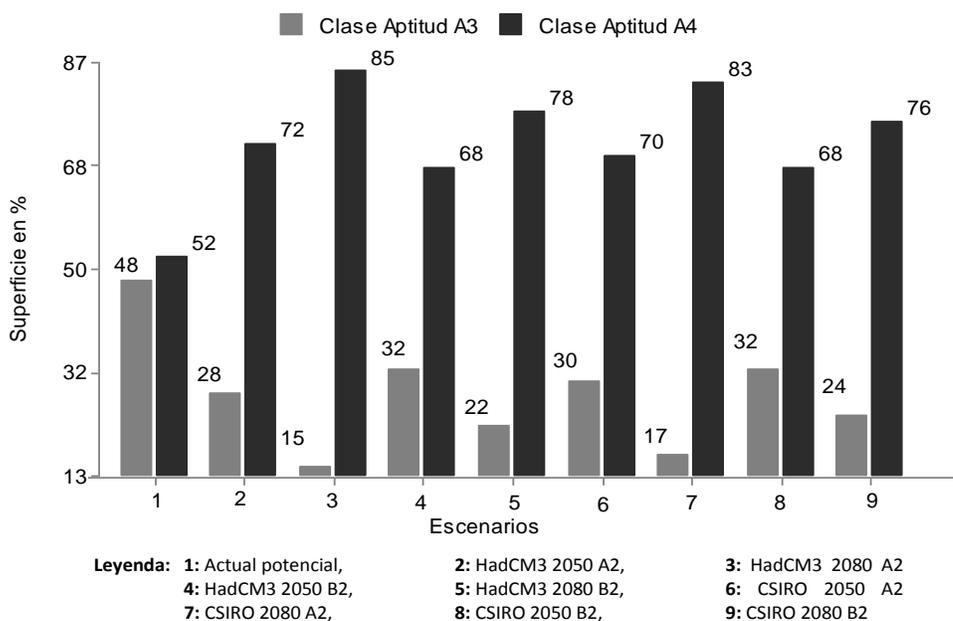


Figura 31 Cambios en superficie por clases de aptitud para *S. tuberosum* en condiciones actuales bajo escenarios de cambio climático modelo HadCM3 y CSIRO

En la Figura 32, se presentan los cambios netos en términos porcentuales traducidos en pérdidas y ganancias de superficies con relación al escenario actual potencial y escenarios de cambio climático.

Los escenarios más sensibles a los cambios de temperatura y precipitación son los que más pierden superficie, es así que el escenario HadCM3 hacia el año 2080 con el escenario de emisiones A2 pierde un 69 % (217 km²) de su área de clase (316 km²) esta considerable pérdida cede a la clase A4 incrementando su área de (341 km²) a 558 km² equivalente al 85 % del área total de la cuenca alta del río Reventazón.

La clase A4 bajo el modelo CSIRO hacia el año 2080 con el escenario de emisiones A2 se incrementa de 341 km² a 545 km² equivalente al 83 % considerando que la clase A3 perdió una superficie de 204 km² (65 %). Por otro lado hay ciertas tendencias de similitud en la pérdida de superficie para los escenarios HadCM3 y CSIRO hacia el año 2050 bajo el escenario de emisiones A2 y B2 en un 34 % equivalente a 107 km². En términos generales el modelo HadCM3 pierde una superficie mayor (628 km²) que el modelo CSIRO (587 km²).

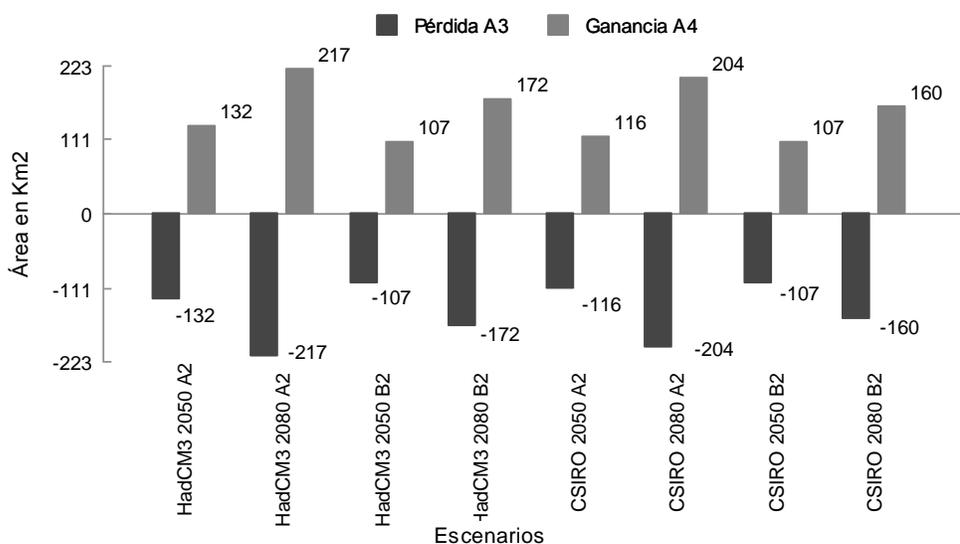


Figura 32. Porcentaje de cambio neto en la superficie en las zonas de aptitud, para cada uno de los escenarios A2 y B2 para los modelos HadCM3 y CSIRO

4.4 Cambio en los valores promedios de temperatura y precipitación en las zonas de aptitud bajo escenarios de cambio climático

En el Cuadro 30 se muestran los valores promedios de las temperaturas y precipitación que se tomaron en cuenta para la evaluación de aptitud actual y los valores promedios de los modelos de cambio en estudio. Con respecto a los valores promedios de temperatura se observa un incremento en todos los escenarios para los dos modelos HadCM3 y CSIRO. Sin

embargo para los valores promedios de precipitación se ve una disminución sustancial para todos los escenarios del modelo HadCM3 y un leve aumento para el modelo CSIRO.

Cuadro 30. Resumen de cambios en los promedios actuales de temperatura y precipitación bajo escenarios de cambio climático

| Escenario | Valores promedios de variables climáticas | | | Cambio de los valores promedios | | | | |
|------------------|---|-------------|-------|---------------------------------|-----------------|-------------|-------|--------|
| | Precipitación | Temperatura | | | Precipitación % | Temperatura | | |
| | | Máxima | Media | Mínima | | Máxima | Media | Mínima |
| Potencial Actual | 1182.51 | 24.49 | 19.32 | 14.53 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| HadCM3 2050 A2 | 832.4 | 26.58 | 21.35 | 16.44 | -29.61 | 2.09 | 2.03 | 1.91 |
| HadCM3 2080 A2 | 454.99 | 28.09 | 22.92 | 17.84 | -61.56 | 3.6 | 3.60 | 3.31 |
| HadCM3 2050 B2 | 1088.67 | 25.99 | 20.90 | 16.08 | -7.95 | 1.5 | 1.58 | 1.55 |
| HadCM3 2080 B2 | 649.94 | 27.39 | 22.11 | 17.08 | -45.07 | 2.9 | 2.79 | 2.55 |
| CSIRO 2050 A2 | 1247.35 | 25.69 | 20.82 | 16.22 | 5.50 | 1.2 | 1.50 | 1.69 |
| CSIRO 2080 A2 | 1248.69 | 27.09 | 22.06 | 17.5 | 5.58 | 2.6 | 2.74 | 2.97 |
| CSIRO 2050 B2 | 1293.81 | 25.69 | 20.81 | 16.14 | 9.39 | 1.2 | 1.49 | 1.61 |
| CSIRO 2080 B2 | 1279.09 | 26.49 | 21.49 | 16.82 | 8.20 | 2 | 2.17 | 2.29 |

En la Figura 33 se muestra la distribución de los valores promedios actuales y de cambios en la zona de estudio, donde la precipitación actual oscila entre los 1182.51 mm por ciclo que se inicia en el mes de mayo justo cuando inician las primeras lluvias de la temporada de invierno en la zona de estudio.

Para el modelo HadCM3 los valores promedios tienden a disminuir con respecto al escenario actual potencial, es así que para el escenario HadCM3 2050 A2 se observa (832.4 mm/ciclo) valor que se encuentra dentro los rangos de óptimos para el cultivo de papa (León 1994). Por otro lado el escenario HadCM3 2080 A2 presenta 454.99 mm/ciclo ubicándose en los niveles de aptitud Moderadamente Apto con riesgo a *T. solanivora*. Con referencia al modelo CSIRO se muestra un significativo aumento en los valores promedios de precipitación, respecto al actual potencial. Donde el valor promedio más alto se encuentra en el escenario CSIRO 2050 B2 (1293.81 mm/ciclo) rangos moderados con riesgo a *P. infestans*. Para el caso de la temperatura máxima el valor promedio alto se observa en el escenario HadCM3 2080 A2 con un promedio de 28.09 °C para el mismo escenario en cuanto a temperatura media y mínima se refiere se observan un 22.92 °C y 17.84 °C.

Del mismo modo para el modelo CSIRO bajo los escenarios CSIRO 2080 A2 se observan los valores promedios más altos de temperatura máxima de (27.09 °C) para

temperatura media (22.06 °C) y temperatura mínima (17.5 °C) en la cuenca alta de río Reventazón.

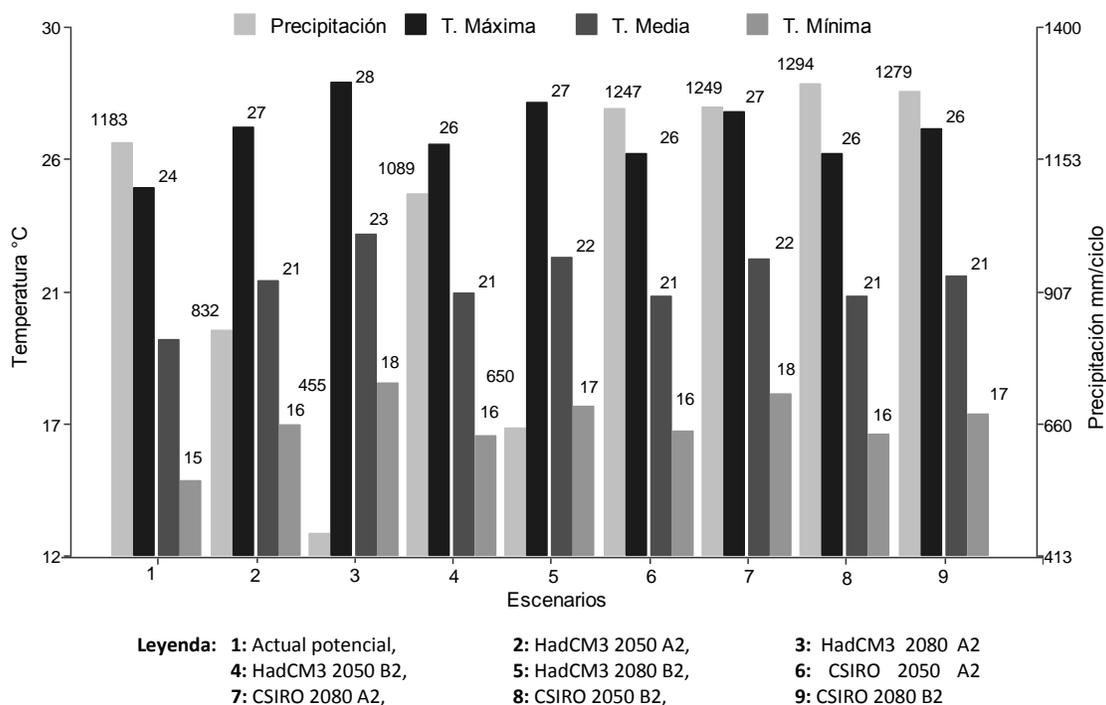


Figura 33. Valores promedios de temperatura y precipitación actuales y de cambio generados por los modelos HadCM3 y CSIRO

Con respecto a los cambios en los valores promedios de precipitación (Figura 34) se tiene una reducción muy significativa en los valores observados con respecto al promedio actual potencial (1182.51 mm/ciclo). El modelo HadCM3 reporta valores de mayor reducción con los escenarios HadCM3 2080 A2 (-61.56 %) y HadCM3 2080 B2 (-45.02 %). Esto implicaría mayor riesgo de *T. solanivora* y la implementación de una red de riego tecnificado, en la zona de estudio. Si estas reducciones en los valores promedios de precipitación, se presentaran en los dos periodos críticos del cultivo de la papa; inmediatamente después de emergencia y durante la tuberización, los rendimientos se verían seriamente afectados (Martínez y Moreno 1992). Se debe considerar que la etapa de llenado de los tubérculos es cuando el cultivo alcanza mayores tasas de transpiración, donde genera los máximos requerimientos de agua (King y Stark 2000), un déficit de humedad durante la etapa de llenado de tubérculos, puede producir una disminución del tamaño de estos (CSIDC 1999). Sin embargo con el modelo CSIRO se obtienen incrementos no tan significativos del 9.39 % con el escenario CSIRO 2050 B2, y 8.20 % con el escenario CSIRO 2080 B2. Sin embargo existe

una hipótesis si el exceso de agua ocurre justo después de la siembra puede reducir la emergencia, debido al crecimiento de las lenticelas lo que permite la entrada de patógenos (Haverkort 1986) Lo anterior conduce a la podredumbre de la semilla y aumenta su susceptibilidad a enfermedades fungosas como *P. infestans* y bacterianas (Solózano *et al.* 1993). Por otra parte, un exceso de humedad o fluctuaciones bruscas en los niveles de agua, favorecen la presencia de tubérculos partidos y deformes debido a los cambios en la turgencia y volumen en los tejidos internos del tubérculo (King y Stark 2000) por consiguiente los tubérculos toman forma semejantes a cuello de botella o se deforman de diversas maneras pudiendo romperse (Haverkort 1986).

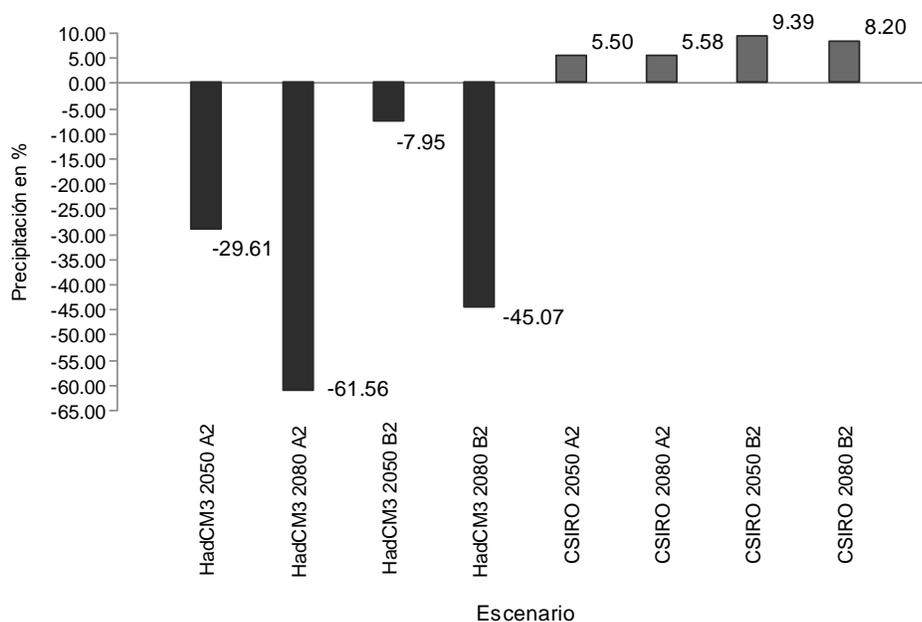


Figura 34. Valores promedio de temperatura y precipitación actuales y de cambio generados por los modelos HadCM3 y CSIRO

Según la Figura 35 el escenario A2 para los dos modelos pronostica un aumento en las temperaturas. Es así para el modelo HadCM3 escenario 2080 A2 se observa un incremento en temperatura máxima de 3.6 °C, temperatura media 3.60 °C y temperatura mínima 3.31 °C. En términos generales esto explica que los escenarios A2 muestran tendencias a un mundo heterogéneo, donde el crecimiento económico es por regiones y los cambios en tecnología son lentos. Además, estos escenarios se asocian a un mayor calentamiento global (IPCC 2007). Sin embargo para los escenarios B2 donde se observa un incremento de 1.61 a 2.55 °C estos escenarios difieren en gran medida de los A2 por que representan un mundo que adopta

tecnologías limpias y logra estabilizar el crecimiento poblacional, estas están asociadas a menos calentamiento en el mundo (IPCC 2007).

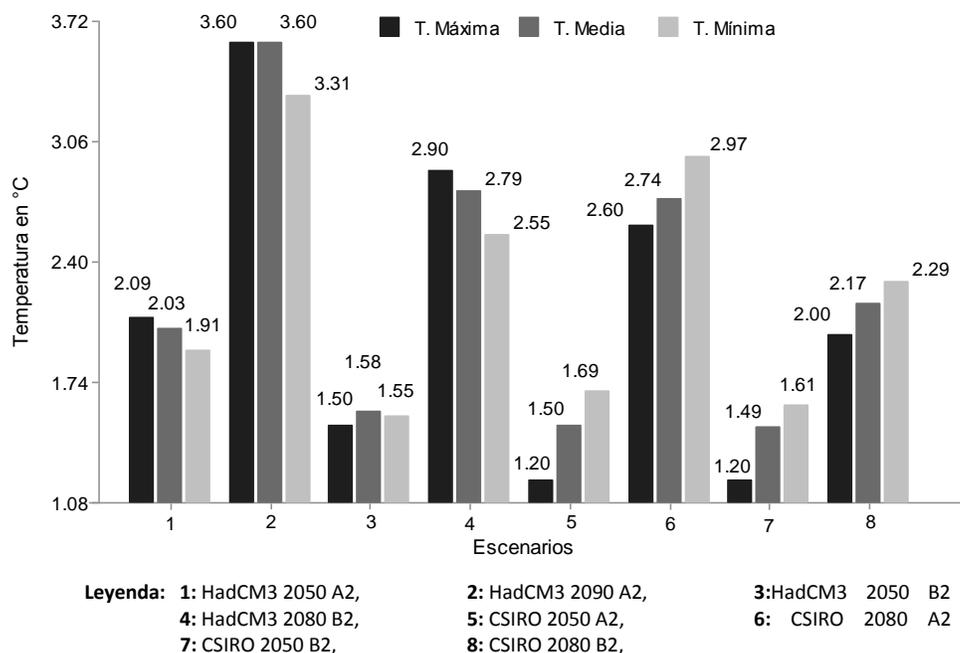


Figura 35. Valores promedio de temperaturas actuales y de cambio generados por los modelos HadCM3 y CSIRO

Con respecto al rango actual de temperatura media (19.32 °C) el nivel de aptitud climática anteriormente observado muestran las clases (A1 y A3) donde en condiciones actuales se cultiva. El incremento de 3.6 °C en temperatura media el cultivo de papa por aptitud climática pasaría a la clase A2 esto ocasionaría identificar ciertas UC donde la temperatura mínima fluctúa entre 10 a 15 °C rango que favorece la iniciación de la formación de los tubérculos. A su vez, esto podría significar que en los años venideros se deba cultivar la papa en ciertas zonas, bajo sistemas de invernaderos, donde se puede fácilmente controlar los rangos óptimos que requiere el cultivo. Del mismo modo, un incremento de plagas como de *T. solanivora*, obligaría al agricultor seguir aplicando plaguicidas desmesuradamente o buscar nuevas zonas a altitudes por encima de sus rangos favorables. Sin embargo estas nuevas zonas que se pueden generar estarían asociadas a mayores problemas como riesgos a degradación de los suelos por las pendientes de mayor porcentaje e intensivo uso de maquinaria agrícolas.

4.5 Objetivo III: Cambios en la rentabilidad económica actual bajo escenarios de cambio climático

4.5.1 Aptitud actual por clases de Margen Bruto, bajo escenarios de cambio climático

La Figura 36 muestra la caracterización de las UC en Relación al Margen Bruto (MB en millones de colones), superficie y el número de productores por clase económica. Las tierras con algún grado de aptitud física comprenden aproximadamente 316 km² (31567 ha) tienen aptitud A3 (Marginalmente Apto), estas tierras en adelante serán llamadas *zona productiva* donde se encuentran diferentes clases de aptitud económica (**S1**: Económicamente Apto, **S2**: Moderadamente Apto, **S3**: Marginalmente Apto, **n1**: Físicamente No Apto y **n2**: Económicamente No Apto.) en la producción del cultivo de la papa. Actualmente en la zona productiva existen 691 productores de papa (MAG 2003).

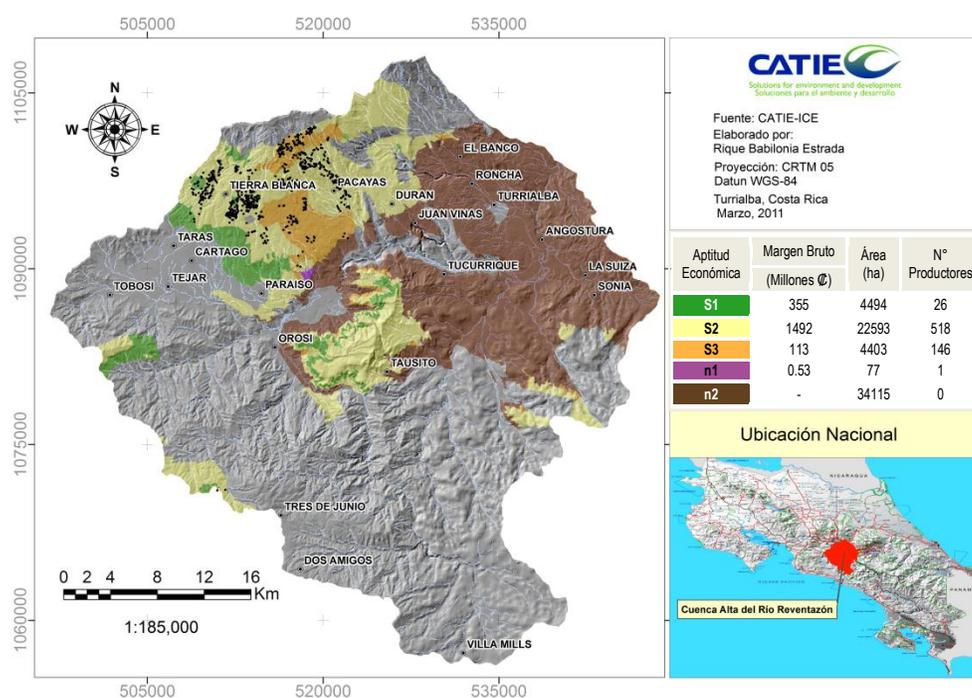


Figura 36. Mapa de aptitud económica actual potencial por Margen Bruto

Para condiciones actuales la mejor clase económica por MB es S1 que representa ₡ 355 millones de colones, con un área aproximada de 4494 ha donde actualmente se encuentran 26 productores de la provincia de Cartago que pertenecen a los Cantones de Oreamuno y

Cartago Central. El mayor número de agricultores (15) se encuentran en el distrito de Potrero Cerrado pertenecientes a Oreamuno y solamente siete agricultores en el distrito de Llano Grande (MAG 2003).

Sin embargo 518 productores ubicados en la zona productiva tienen una aptitud S2 y un MB aproximado de ₡ 1492 millones de colones distribuidos en 22593 ha. La mayor producción en esta zona se desarrolla en el cantón de Oreamuno donde se encuentran ubicados 218 agricultores, pertenecientes a los distritos de Potrero Cerrado (174 agricultores), 82 agricultores en Santa Rosa, 24 en Cot y solamente 1 agricultor desarrolla esta actividad en el distrito de Cipreses (MAG 2003). A su vez, la clase S3 presenta un área de 4403 ha y 146 agricultores se encuentran cultivando papa.

Con respecto a los cambios por clases de MB y superficie bajo el modelo HadCM3 se muestran en el cuadro 31 y Figura 37-1 donde el escenario 2050 A2 con la clase S2 se caracteriza por ser el que mayor retorno económico muestra en comparación con los demás escenarios de emisiones. Esta clase reporta un MB total de ₡ 1147 millones de colones y una superficie de 11767 ha distribuidos en 275 UC. Con respecto a la temperatura media muestra un rango que oscila entre 13 a 20 ° C que se encuentra dentro del óptimo requerido por el cultivo. Sin embargo se observa una reducción considerable de MB para los escenarios de emisiones 2080 A2, 2050 B2 y 2080 B2. Por otro lado el impacto del cambio climático genera incrementos de áreas productivas para todos los escenarios con respecto al escenario actual potencial (4494 km²).

Cuadro 31. Resumen de las clases de aptitud por Margen Bruto condición actual bajo escenarios de cambio climático por el modelo HadCM3

| CLASE MB | Escenario Actual potencial | | Modelo HadCM3 | | | | | | | | | | | |
|-------------|----------------------------|-------|-------------------|-------|--------|-------------------|-------|--------|-------------------|-------|--------|-------------------|-------|--------|
| | | | Escenario 2050 A2 | | | Escenario 2080 A2 | | | Escenario 2050 B2 | | | Escenario 2080 B2 | | |
| | MB | Área | MB | Área | Cambio |
| S1 | 355 | 4494 | 1146 | 11767 | 7273 | 796 | 7416 | 3460 | 672 | 6495 | 2001 | 1057 | 10205 | 5711 |
| S2 | 1492 | 22593 | 359 | 6228 | -16366 | 164 | 2491 | -20103 | 816 | 12460 | -10133 | 217 | 4020 | -18574 |
| S3 | 113 | 4403 | 18 | 366 | -4037 | - | 0 | -4403 | 30 | 1956 | -2447 | 6 | 133 | -4270 |
| n1 | 0.53 | 77 | - | 0 | - | - | 0 | - | - | 0 | - | - | 0 | - |
| n2 | - | 34115 | - | 47321 | 13206 | - | 55775 | 21660 | - | 44770 | 10656 | - | 51324 | 17210 |
| Total | 1962 | 31567 | 1525 | 18361 | | 961 | 9907 | | 1520 | 20912 | | 1282 | 14357 | |

Nota: MB: Margen Bruto en millones de colones, **Área:** Hectáreas, **Cambio:** Hectárea

Sin embargo analizando el impacto del cambio climático sobre el MB en toda la zona productiva; el escenario actual potencial genera un total de ₡ 1962 millones de colones de MB y una superficie total de 31567 ha. Sin embargo tiende a reducir en MB y superficie para todos los escenarios de emisiones considerando que el impacto del cambio climático es más severo para el escenario de emisiones 2080 A2 con respecto al escenario actual.

Con respecto al modelo CSIRO las tendencias son diferentes esto se muestra en el Cuadro 32 y Figura 37-2 donde la clase S2 para el escenario 2050 B2 reporta un MB de ₡ 1040 millones de colones que es mayor en comparación con los escenarios de emisiones 2050 A2, 2080 A2 y 2080 B2. Sin embargo muestra una superficie menor con respecto al escenario actual potencial. Del mismo modo que con el modelo HadCM3 el MB y las áreas productivas tienden a reducir para todos los escenarios de emisiones.

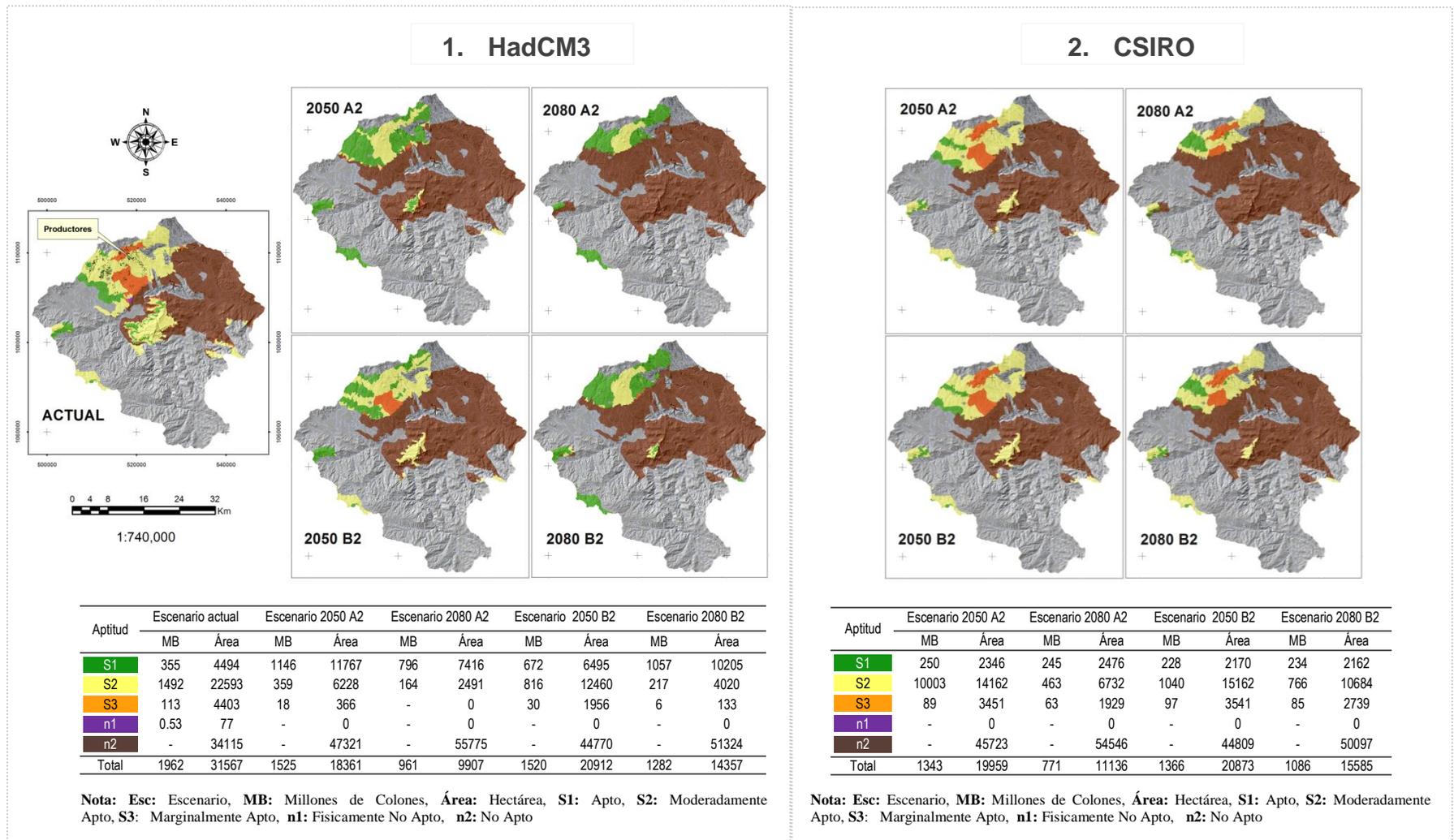
Con respecto a los cambios de MB y superficie total de la zona productiva presenta una reducción para todos los escenarios de emisiones en comparación con el escenario actual potencial. A su vez, se observa una reducción considerable de MB para el escenario de emisiones 2080 A2 a ₡ 771 millones de colones del mismo presenta una pérdida de superficie de aproximadamente 20431 ha.

Cuadro 32. Resumen de las clases de aptitud por Margen Bruto condición actual bajo escenarios de cambio climático por el modelo CSIRO

| CLASE MB | Escenario Actual potencial | | Modelo CSIRO | | | | | | | | | | | |
|-------------|----------------------------|-------|-------------------|-------|--------|-------------------|-------|--------|-------------------|-------|--------|-------------------|-------|--------|
| | | | Escenario 2050 A2 | | | Escenario 2080 A2 | | | Escenario 2050 B2 | | | Escenario 2080 B2 | | |
| | MB | Área | MB | Área | Cambio |
| S1 | 355 | 4494 | 250 | 2346 | -2149 | 245 | 2476 | -2018 | 228 | 2170 | -2324 | 234 | 2162 | -2332 |
| S2 | 1492 | 22593 | 1003 | 14162 | -8431 | 463 | 6732 | -15862 | 1040 | 15162 | -7431 | 766 | 10684 | -11910 |
| S3 | 113 | 4403 | 89 | 3451 | -951 | 63 | 1929 | -2474 | 97 | 3541 | -862 | 85 | 2739 | -1663 |
| n1 | 0.53 | 77 | - | 0 | - | - | 0 | - | - | 0 | - | - | 0 | -77 |
| n2 | - | 34115 | - | 45723 | 11608 | - | 54546 | 20431 | - | 44809 | 10694 | - | 50097 | 15982 |
| Total | 1962 | 31567 | 1343 | 19959 | | 771 | 11136 | | 1366 | 20873 | | 1086 | 15585 | |

Nota: MB: Margen Bruto en millones de colones, **Área:** Hectáreas, **Cambio:** Hectárea

Figura 37. Cambios en el Margen Bruto actual bajo escenarios de cambio climático para el modelo HadCM3 y CSIRO



4.5.2 Aptitud actual por Rendimiento bajo escenarios de cambio climático

En la Figura 38 se muestran los niveles de rendimiento en relación a la superficie productiva y el número de productores por clase de aptitud. Según el modelo que se evaluó en ALES, la zona productiva donde actualmente se desarrolla una actividad intensiva comprende aproximadamente 316 km² (31567 ha) y tiene aptitud física A3 (Marginalmente Apto). En esta zona productiva, actualmente se encuentran 691 productores de papa, quienes aportan aproximadamente el 85 % de la producción a los mercados internos de Costa Rica (MAG 2007). A su vez, la figura muestra cuatro clases de rendimientos promedios en toneladas por hectárea. En la clase Alto se encuentran las UC que producen mayor de 24 tn/ha, la clase Medio de 20 a 24 tn/ha, la clase Bajo menor a 20 tn/ha y en la clase Nulo son UC donde las condiciones agroecológicas del cultivo de la papa no son aptos.

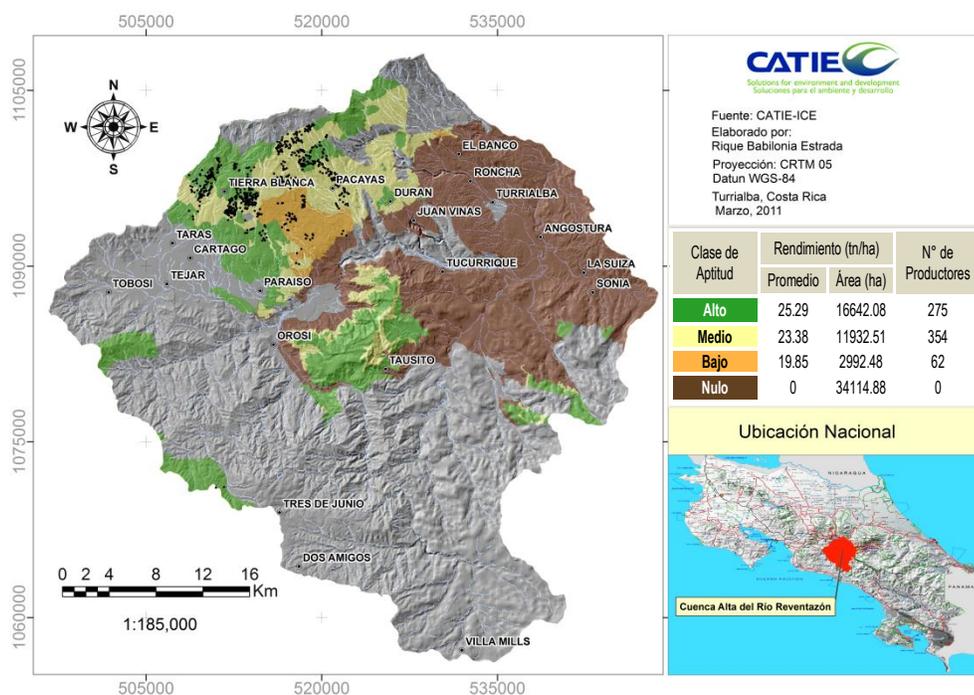


Figura 38. Mapa de aptitud económica actual potencial por Rendimiento

Para las condiciones actuales, la clase Alto presenta un mejor promedio en rendimiento de 25.29 tn/ha en ella actualmente se encuentran 275 productores, de los cuales están distribuidos en los distritos de Cot, Potrero Cerrado y Santa Rosa. El mayor número de productores (134) se encuentran en el cantón Oreamuno en el distrito de Potrero Cerrado, Cot

y Santa Rosa, distribuidos en los caseríos La Maya, La Esperanza, Los Horcones, Centro y Pizco (MAG 2003). Para esta clase las condiciones agroecológicas son muy favorables para que el cultivo de la papa desarrollo óptimamente por lo que la temperatura media oscila entre los 11 a 20 °C. A su vez, abarca un rango de altitud entre los 1200 a 3058 msnm.

El mayor número de productores de papa se encuentran desarrollando esta actividad agrícola en clase Medio es decir poseen un rendimiento en promedio de 23.38 tn/ha de los cuales se reporta 354 productores de papa ubicados en los cantones de Alvarado, Oreamuno y Paraíso. La mayor concentración de productores (216) se encuentra en el cantón de Oreamuno. De los cuales 120 productores desarrollan sus actividades agrícolas con relación al cultivo de la papa en Potrero Cerrado y se encuentra dispersos en los caseríos de El Portón, La Esperanza, La Maya, Los Quemados del Chiquá y Colo Blanco (MAG 2003).

Para la clase Bajo con rendimiento en promedio de 19.85 tn/ha solamente se reporta 61 productores ubicados en los distritos de Santa Rosa, Cot, Paraíso y Cipreses (MAG 2003). Con respecto a la zona Nulo donde las condiciones agroecológicas no son óptimas para el cultivo la papa, ésta alberga a los distritos de la Suiza, Tucurrique, Angostura, Juan Viñas, Roncha, Sonia y El Banco (MAG 2003).

Los resultados donde se analizan los cambios por Rendimiento en función de superficie, bajo escenarios de emisiones A2 y B2 para el modelo HadCM3 se muestran en el Cuadro 33 y Figura 39-1 donde la clase Alto muestra los mejores rendimientos as su vez, se muestran una reducción en superficies para todos los escenarios de emisiones.

Cuadro 33. Rendimiento actual por clases de aptitud bajo escenarios de cambio climático por el modelo HadCM3

| Clase Rendimiento | Esc. Actual potencial | | Modelo HadCM3 | | | | | | | | | | | |
|----------------------|--------------------------|-------|-------------------|-------|--------|-------------------|-------|--------|-------------------|-------|--------|-------------------|-------|--------|
| | | | Escenario 2050 A2 | | | Escenario 2080 A2 | | | Escenario 2050 B2 | | | Escenario 2080 B2 | | |
| | Rend | Área | Rend | Área | Cambio |
| Alto | 25.29 | 16642 | 26.31 | 13073 | -3569 | 26.81 | 7736 | -8906 | 25.90 | 11699 | -4943 | 26.75 | 10347 | -6295 |
| Medio | 23.38 | 11933 | 22.21 | 5193 | -6739 | 22.54 | 2171 | -9762 | 22.91 | 7309 | -4624 | 22.58 | 4011 | -7922 |
| Bajo | 19.85 | 2992 | 19.39 | 95 | -2897 | - | - | 0 | 19.91 | 1903 | -1089 | - | - | 0 |
| Nulo | - | 34115 | - | 47321 | 13206 | - | 55775 | 21660 | - | 44770 | 10656 | - | 51324 | 17210 |
| Zona productiva | 31567 | | 18361 | | | 9907 | | | 20912 | | | 14358 | | |
| Prom. Rendimiento | 23.92 | | 25.28 | | | 26.00 | | | 24.50 | | | 25.79 | | |

Nota: Rend: Rendimiento en toneladas por hectárea, Área: Hectáreas, Cambio: Hectárea, ZP: Zona Productiva, Prom: Promedio

Por tanto para el escenario 2080 A2 La clase Alto se caracteriza por tener el mejor promedio en rendimiento de 26.81 tn/ha distribuidas en 7736 ha en comparación con los demás escenarios de emisiones evaluados. Por consiguiente cuando se analiza los promedios en rendimiento en toda la zona productiva los mayores rendimientos presentan los escenarios 2080 A2 (26.00 t/ha) y 2080 B2 (25.79 t/ha) sin embargo poseen una superficie menor con respecto al escenario actual potencial. Por otro lado las áreas no productivas tienden a incrementarse en más del 50 % ocurriendo hacia el año 2080 con el escenario de emisiones A2 el mayor incremento en 55775 ha con respecto al escenario actual potencial (34115 ha).

Con respecto al modelo CSIRO las tendencias son distintas al modelo HadCM3 esto se muestra en el Cuadro 34 y Figura 39-2 donde las clases con mayores rendimientos Alto y Medio no difieren entre escenarios con respecto al escenario actual potencial. Sin embargo presentan una reducción de superficie para todos los escenarios de emisiones. Del mismo que con el modelo HadCM3 para la clase Alto con el escenario 2080 A2 presentan las mayores reducciones de superficie. En contraste la Clase Nulo, para todos los escenarios de emisiones reporta incrementos considerables en sus áreas, ocurriendo el incremento de mayor superficie (20431 ha) hacia el año 2080 con el escenario de emisiones A2.

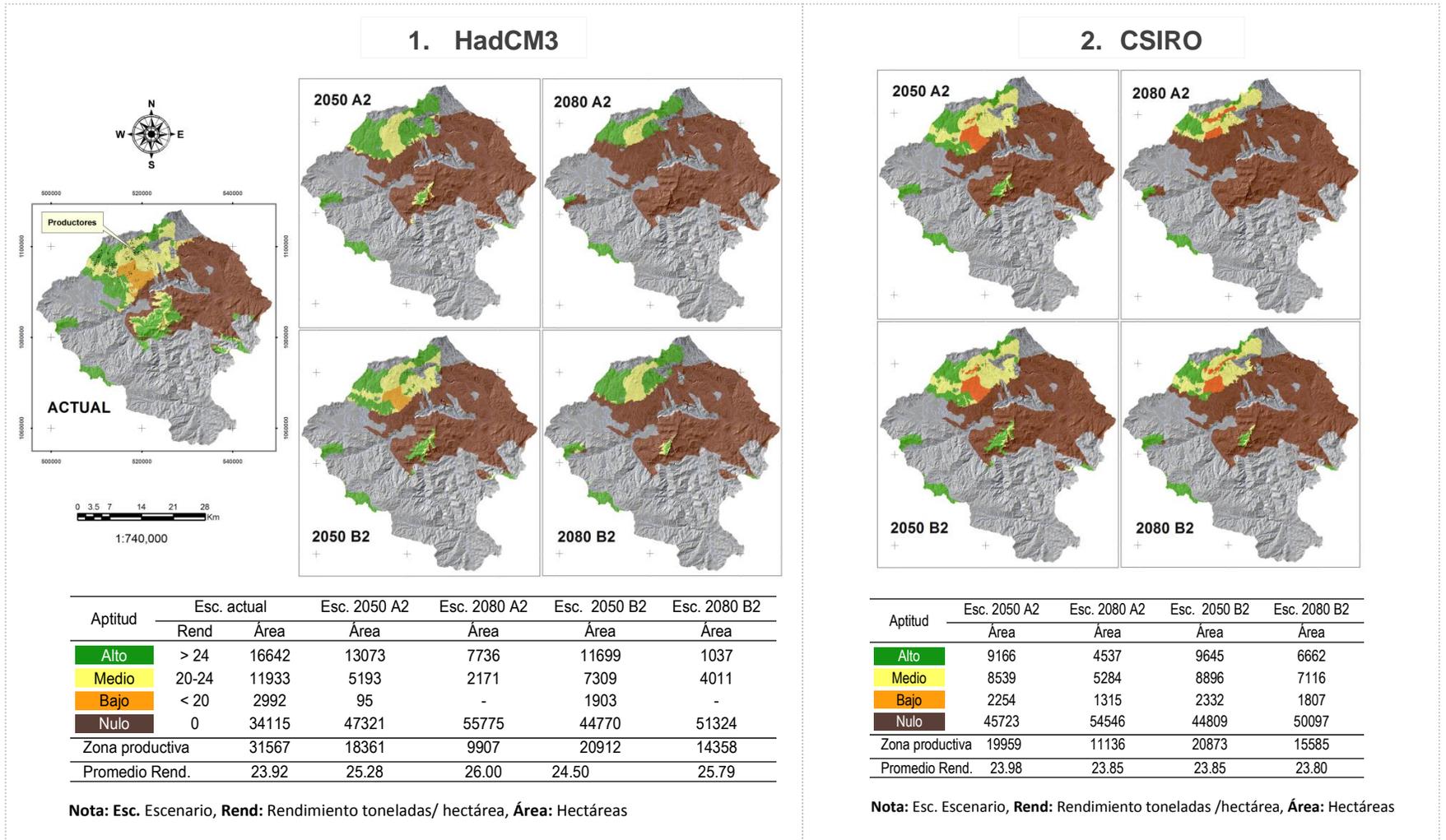
Por consiguiente cuando se analiza los promedios en rendimiento en toda la zona productiva estas no difieren entre escenarios con respecto al escenario actual potencial (23.92 t/ha). Sin embargo hay tendencias de reducción de superficie para todos los escenarios estudiados.

Cuadro 34. Rendimiento actual por clases de aptitud bajo escenarios de cambio climático por el modelo CSIRO

| Clase Rendimiento | Esc. Actual potencial | | Modelo CSIRO | | | | | | | | | | | |
|----------------------|--------------------------|-------|-------------------|-------|--------|-------------------|-------|--------|-------------------|-------|--------|-------------------|-------|--------|
| | | | Escenario 2050 A2 | | | Escenario 2080 A2 | | | Escenario 2050 B2 | | | Escenario 2080 B2 | | |
| | Rend | Área | Rend | Área | Cambio |
| Alto | 25.29 | 16642 | 25.38 | 9166 | -7476 | 25.90 | 4537 | -12105 | 25.37 | 9645 | -6997 | 25.50 | 6662 | -9980 |
| Medio | 23.38 | 11933 | 22.91 | 8539 | -3393 | 23.01 | 5284 | -6649 | 22.96 | 8896 | -3037 | 23.00 | 7116 | -4816 |
| Bajo | 19.85 | 2992 | 19.94 | 2254 | -739 | 19.94 | 1315 | -1678 | 19.94 | 2332 | -660 | 19.94 | 1807 | -1186 |
| Nulo | - | 34115 | - | 45723 | 11608 | - | 54546 | 20431 | - | 44809 | 10694 | - | 50097 | 15982 |
| Zona productiva | | 31567 | | 19959 | | | 11136 | | | 20873 | | | 15585 | |
| Prom. Rendimiento | | 23.92 | | 23.98 | | | 23.85 | | | 23.85 | | | 23.80 | |

Nota: Rend: Rendimiento en toneladas por hectárea, Área: Hectáreas, Cambio: Hectárea, ZP: Zona Productiva, Prom: Promedio

Figura 39. Cambios en el Rendimiento actual bajo escenarios de cambio climático para el modelo HadCM3y CSIRO



Complementariamente mediante el ANAVA se determinó las diferencias estadísticas entre escenarios de emisiones en función al rendimiento en toneladas por hectárea en la zona productiva. Por consiguiente la Figura 40 muestra que existen diferencias estadísticas ($p < 0.05$) entre los escenarios de emisiones con respecto al escenario actual potencial. Para el modelo HadCM3 el escenario actual potencial muestra diferencias significativas ($p = 0.0001$) con todos los escenarios de emisiones 2050 A2, 2080 A2, 2050 B2 y 2080 B2. Para los escenarios de emisiones 2080 A2 y 2080 B2 no se encontraron diferencias significativas en las medias de rendimiento evaluadas. En contraste para el Modelo CSIRO no se encontraron diferencias significativas entre los rendimientos con respecto al escenario actual potencial.

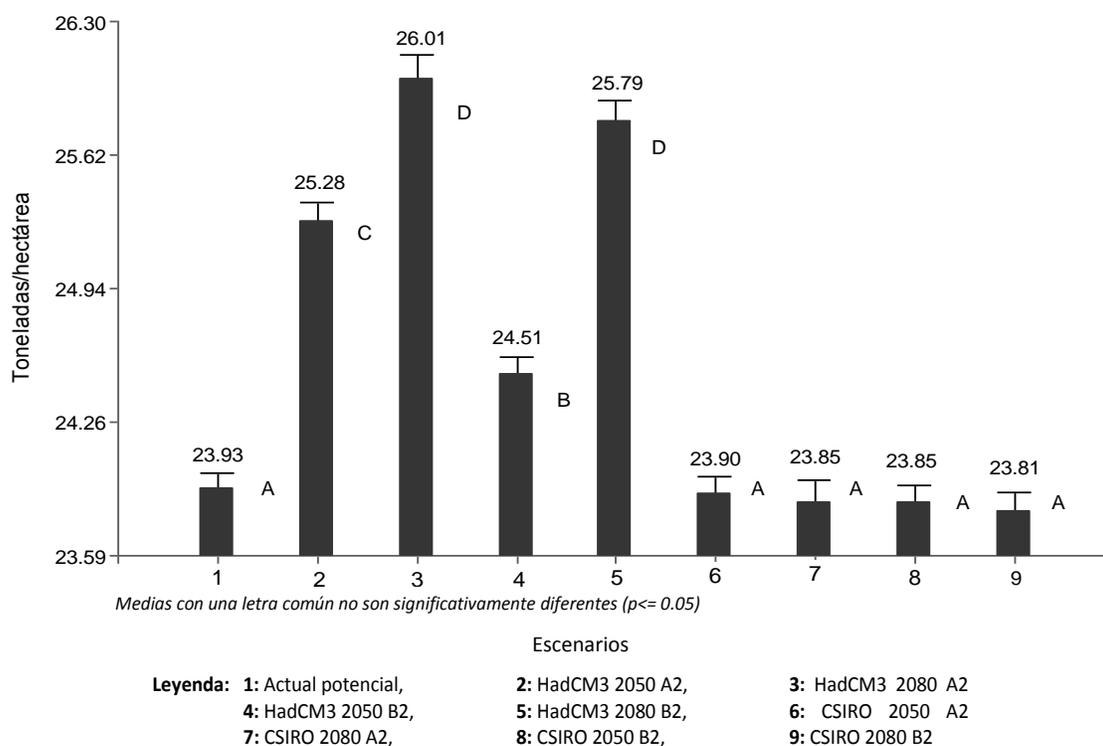


Figura 40. Cambios en los rendimientos actuales bajo escenarios de cambio climático para los modelos HadCM3 y CSIRO

4.5.3 Cambios de la aptitud económica actual en la zona productiva bajo escenarios de cambio climático

En el Cuadro 35 se presentan los valores de MB total del área productiva, a su vez, se muestran las pérdidas de MB y área, en condiciones actuales y bajo escenarios de emisiones A2 y B2 hacia los años 2050 y 2080, para los dos modelos HadCM3 y CSIRO. Del mismo modo se muestran la producción total en toneladas y en porcentaje del área productiva. El

escenario actual potencial muestra un MB de ₡ 1962 millones de colones equivalente en ¹⁹dólares americanos a US\$ 3.8 millones de dólares y posee una superficie de 31517 ha equivalente al 48 % del área total en estudio (65682 ha). A su vez, presenta una producción de 754 mil toneladas por hectárea. Del mismo modo presenta un costo total de ₡ 3929 millones de colones que equivale a US\$ 7.7 millones de dólares

En condiciones futuras, el escenario de emisiones A2 hacia el año 2080 con el modelo HadCM3 muestra una reducción en MB de ₡ 961 millones de colones con respecto al escenario actual, sufriendo una pérdida de ₡ 1001 millones de colones equivalente a \$ 1.9 millones de dólares que representa aproximadamente el 51 % de MB del escenario actual potencial. A su vez se observa una reducción del área a 9907 ha sufriendo una pérdida de 21660 ha. Sin embargo la producción se ve considerablemente afectada por el cambio climático para el escenario 2080 A2 reduciendo su producción a 259 mil toneladas por hectáreas, sufriendo una pérdida neto de 495 mil toneladas por hectárea que es equivalente al 65 % de la producción total del área productiva. Sin embargo Para este escenario el costo de producción asciende a ₡ 1358 millones de colones equivalente a US\$ 2.6 millones de dólares

Similar tendencia se presenta con el modelo CSIRO hacia el año 2080 con el escenario de emisiones A2 donde muestra reducción del MB de ₡ 771 millones de colones con respecto al valor de MB del escenario actual potencial. A su vez, sufre una pérdida de ₡ 1191 millones de colones equivalente a US\$ 2.3 millones de dólares que es aproximadamente el 61 % de MB con respecto al escenario actual potencial. A su vez se observa una reducción del área a 11136 ha sufriendo una pérdida neta de superficie de 20431 ha equivalentes a 65 % del área total productiva. Del mismo modo se observa una reducción considerable de la producción en 265 mil toneladas por hectárea con respecto al escenario actual potencial, sufriendo una pérdida neta de 489 mil toneladas por hectárea que es equivalente a 64 % con respecto al escenario actual potencial. Sin embargo el costo de producción es de ₡ 1598 millones de colones equivalente a US\$ 3.1 millones de dólares.

Complementariamente en la figura 41 y 42 se muestran espacialmente las áreas productivas para cada escenario y modelo en contraste con el escenario actual potencial. El

¹⁹ Cambio actual de 1 Dólar americano: ₡ 507 http://www.bccr.fi.cr/flat/bccr_flat.htm. <http://www.xe.com/ucc/>

escenario actual potencial se encuentra distribuido en 629 UC que presentan restricciones que ocasionan pérdidas en la producción por lo que algunas restricciones como temperatura máxima y precipitación influye en la incremento de polillas y tizón tardío, esto hace que también se incrementen en los costos de producción. A su vez, las áreas muestran restricciones por capacidad de laboreo, condición de enraizamiento, relación calcio magnesio, potasio, riesgo a degradación del suelo.

Cuadro 35. MB y producción total en la zona productiva bajo escenarios de cambio climático

| Escenarios | Margen Bruto (MB) | | Pérdida | | Producción Miles (t/ha) | Pérdida producción | | Costos Millones ₡ |
|------------------|-------------------|--------------|------------------|--------------|----------------------------|-----------------------|-----|----------------------|
| | Millones ₡ | Área (ha) | MB Millones ₡ | Área (ha) | | Miles (t/ha) | (%) | |
| Actual potencial | 1962 | 31567 | - | - | 754 | | 100 | 3922 |
| HadCM3 2050 A2 | 1525 | 18361 | 437 | 13206 | 462 | 291 | 39 | 2529 |
| HadCM3 2080 A2 | 961 | 9907 | 1001 | 21660 | 259 | 495 | 66 | 1358 |
| HadCM3 2050 B2 | 1520 | 20912 | 442 | 10656 | 508 | 246 | 33 | 2763 |
| HadCM3 2080 B2 | 1282 | 14357 | 680 | 17210 | 368 | 386 | 51 | 2036 |
| CSIRO 2050 A2 | 1343 | 19959 | 620 | 11608 | 473 | 281 | 37 | 2722 |
| CSIRO 2080 A2 | 771 | 11136 | 1191 | 20431 | 265 | 489 | 65 | 1598 |
| CSIRO 2050 B2 | 1366 | 20873 | 596 | 10694 | 495 | 259 | 34 | 2794 |
| CSIRO 2080 B2 | 1086 | 15585 | 876 | 15982 | 369 | 385 | 51 | 2256 |

En cuanto al escenario de emisiones A2 hacia el año 2050 con el modelo HadCM3 se constituye el que mayor MB genera (₡ 1525 millones de colones), y se encuentra distribuido en 410 UC con restricciones en capacidad de laboreo, condición de enraizamiento, relación Calcio magnesio, riesgo a degradación del suelo, riesgo a tizón y polilla. Por lo que estas limitaciones generan pérdidas en áreas de mejor aptitud en la zona de estudio. Sin embargo el escenario A2 hacia el año 2080 está agrupado en 228 UC y presentan las mayores pérdidas tanto en área y MB.

En contraste, el modelo CSIRO presenta al escenario 2050 B2 como el escenario que mayor MB genera (₡ 1343 millones de colones). Sin embargo el escenario de emisiones A2 hacia el año 2080 se constituye el que menor MB genera y está distribuida en 254 UC. Estas UC muestran limitaciones que generan las pérdidas de áreas, Margen Bruto, producción y que influyen en la rentabilidad, de tal manera que los cultivadores de papa tienen que incrementar sus costos en la implementación de semillas de nuevas variedades resistentes al estrés abiótico, control de plagas o corregir limitaciones que están asociadas a capacidad de laboreo,

condición de enraizamiento, relación calcio magnesio, potasio y riesgo a degradación del suelo.

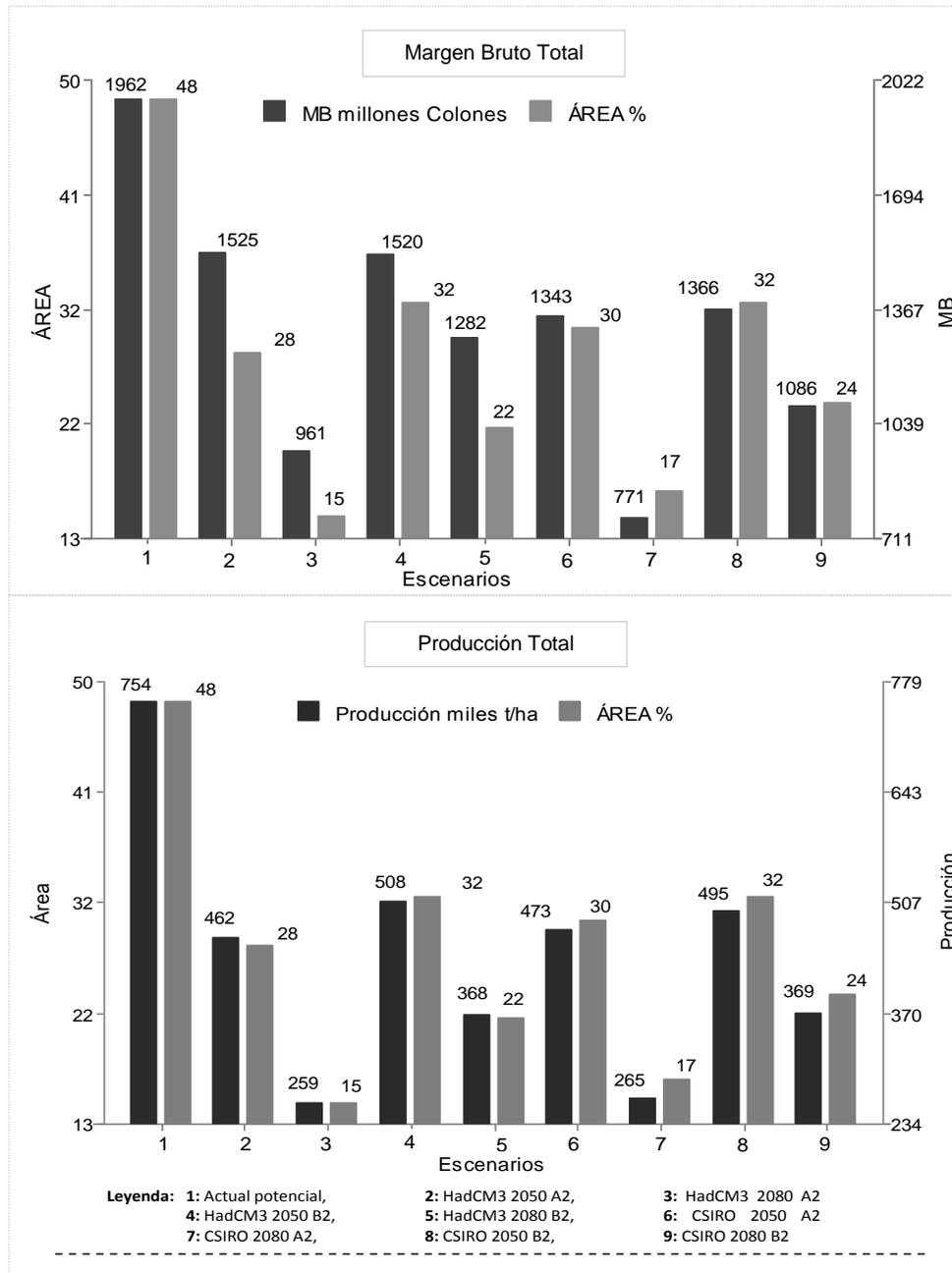
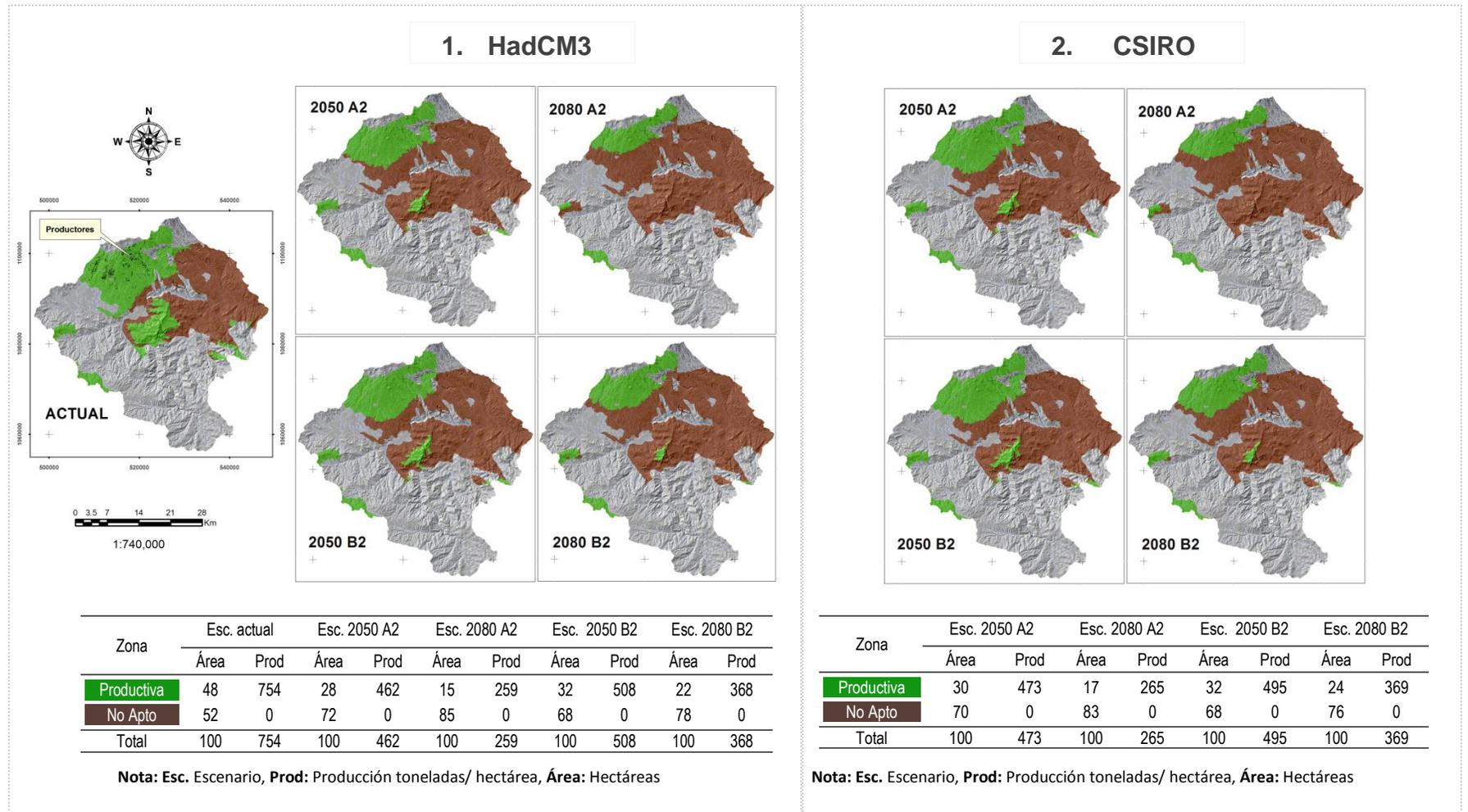


Figura 41. Cambios en el Margen Bruto y Producción actual potencial en la zona productiva, bajo escenarios de cambio climático para el modelo HadCM3 y CSIRO

Figura 42. Cambios en la producción actual en la zona productiva, bajo escenarios de cambio climático para el modelo HadCM3 y CSIRO



5. DISCUSIÓN

5.1 Sobre la evaluación de tierras con ALES

La aplicación de la metodología de la FAO a través del modelo ALES para determinar las clases de aptitud física y económica es lógica y sencilla dado que toman en cuenta las condiciones de suelo, clima y condiciones económicas (Rossiter *et al* 1995, FAO 2003). Una de las consideraciones más importantes en la presente evaluación es la potencia de ALES. Variaciones en precios de productos, insumos, cambios en los requisitos o cualidades de la tierra, variables climáticas y salidas de modelos climáticos, pueden ser fácilmente editadas y mostrar sus consecuencias dinámicas, es posible tener una idea certera del efecto de cambios biofísicos o socioeconómicos en pocos minutos, así mismo la posibilidad de incorporar nuevas UC en caso de requerirse mayor nivel de detalle.

Comparando el modelo ALES con otros modelos como SOLUS, MICROLEIS, Pimentel (2009), Cruz (2003), Lainez (1997), Orozco (1993) y León (1994) concluyen que el modelo ALES es una herramienta útil y versátil que permite al evaluador de tierras construir sistemas expertos y su diseño responde tanto a escala regional y global. A su vez, fácilmente integra tanto CAT y CUT basado en los RUT del TUT para determinar eficazmente la aptitud física y económica interrelacionando variables de suelo (textura, drenaje, pH, K, P, Mg, Cal, CIC, MO, pendiente, profundidad, pedregosidad), altitud, climatologías tanto presentes y futuras permitiendo asociar las salidas de modelo climáticos (HadCM3 y CSIRO) y condiciones socioeconómicas. Como resultado se obtuvo mapas de aptitud climática, de aptitud final por clases y subclases considerando, a su vez, el riesgo a plagas y degradación del suelo (Rossiter *et al* 1995).

5.2 Sobre la aptitud climática bajo escenarios de cambio climático

Según la evaluación con base en ALES la aptitud climática del cultivo de la papa está en función del incremento de GEI en la atmósfera. En consecuencia con un alza en las temperaturas promedios y variaciones en los rangos de precipitación; la aptitud del cultivo de la papa tiende a cambiar (Bindi 2008). Para los modelos HadCM3 y CSIRO las mejores tierras que no muestran ninguna restricción son las áreas de menor superficie alcanzando en

promedio 5 % para el modelo HadCM3 y 2 % para el modelo CSIRO con respecto al área total. Por consiguiente con el modelo HadCM3 se espera un incremento en la temperatura máxima en promedio para todos los escenarios entre 1.90 a 3.86 °C y para el modelo CSIRO entre 1.20 a 2.60 sin embargo en ambos casos este incremento es mucho más marcada para el escenario 2080 A2. A su vez, presenta más del 80 % de su superficie restricción por temperatura mínima. Este incremento de temperatura varía los rangos de aptitud conllevando a las tierras óptimas a perder superficies o convertirse en tierras marginales a no aptas.

Para el caso de temperatura máxima el rango actual y futuro se encuentran en promedio para todos los escenarios de emisiones entre 24.49 a 33 °C por encima del óptimo (10 a 22 °C) constituyéndose en temperaturas críticas para el desarrollo fisiológico del cultivo ya que a temperaturas por encima de los 25 °C deja de ocurrir la fase de mayor importancia para el cultivo, la formación y llenado de los tubérculos (CIP 1988, DOMINGUEZ, 1989) Al respecto también afecta la longevidad de las hojas que se hace mucho más corta y la producción de ramas es más reducida, conduciendo a la formación de poco follaje, que no es suficiente para la completa captación de energía solar, a su vez, el crecimiento de las raíces es mucho menor ya que este efecto por temperatura máxima inhibe la absorción de iones. Estos impactos permitirán el desplazamientos de estas tierras de mayor aptitud a altitudes mayores, donde las tierras tienen aptitud forestal y donde las condiciones son más difíciles por las pronunciadas pendientes y altas precipitaciones sumadas al mal manejo agronómico en la preparación de las tierras, favoreciendo los riesgos a degradación del suelo (InforeSources 2008).

Estas afirmaciones son corroboradas por un estudio realizado en café en Brasil donde supone pérdidas de hasta un 10 % de las zonas óptimas del cultivo con incrementos de la temperatura a 1 °C + 15 % precipitación, y un análisis más pesimista con incremento de 5.8 °C + 15 % de precipitación se espera pérdidas del 97 % de las áreas óptimas (Pinto *et al* 2008). Por otro lado estos posibles impactos del cambio climático hacen variar los rangos óptimos y por siguiente la aptitud del cultivo. Sin embargo los impactos no son negativos en todas partes ya que estos posibles incrementos de 1.20 a 3.60 °C pudieran ser beneficiosos para tierras de climas demasiados fríos ya que estas se convertirían en tierras aptas para producir papas como un cultivo de invierno (en lugar de un cultivo de otoño o primavera) como el caso de algunas partes del Canadá, Siberia como las zonas altas del altiplano Peruano y Boliviano (InForeSources 2008, Walker *et al* 1999). Sin embargo este efecto causaría una competencia por las tierras, lo que llevaría a un encarecimiento de los terrenos cultivables y se

producirían disputas entre los agricultores por los mismos (Garrido 2010) estas tierras serían las zonas templadas y frías en contraste las zonas tropicales donde el límite de tolerancia climática de los cultivos determinarían con menores costos (Hijmans 2003).

De igual manera para la temperatura mínima se ve un incremento con respecto al escenario actual potencial para ambos modelos. Con este incremento se espera una reducción en la formación de tubérculos (CIP 1988). Sin embargo estas áreas pudiesen desplazarse a altitudes mayores o zonas menores a 1200 msnm donde la temperatura nocturna sea menor a 15 °C (FAO 2008, Hijmans 2003, MAG 2003). Se espera al menos que más de 50 % de las tierras sean de aptitud A4 para los dos modelos.

Asimismo, para el modelo HadCM3 se espera una reducción en los promedios de precipitación para todos los escenarios de emisiones evaluados. Sin embargo estas reducciones no son críticas para el desarrollo del cultivo de la papa con excepción del escenario 2080 A2 donde la reducción alcanza a 459 mm/ciclo aproximadamente un 61 % con respecto al escenario actual potencial. Sin embargo para todos los escenarios de emisiones se espera UC más secos y con menos riesgos a degradación del suelo pero con mayor probabilidad de riesgo a *T. solanivora*. Al asumir estos resultados existen estudios que han demostrado que los insectos plagas serán generalmente más abundantes a medida que la temperatura aumenta, incluyendo la posibilidad de extensión de su distribución, así como índices crecientes de desarrollo de sus poblaciones, crecimiento, migración e hibernación (Rosenzweig y Hillel 1998). Estas tendencias explican la presencia de *T. solanivora* en bajas altitudes y a su vez, en altitudes mayores donde antes el riesgo era mínimo.

En contraste con el modelo CSIRO se presenta un aumento leve en sus promedios de precipitación conllevando a tener riesgos medio a altos en la zona productiva. A su vez, la presencia de *P. infestans* está distribuída en toda la zona productiva. Este riesgo a *P. infestans* influye de manera directa sobre el rendimiento y de altos costos destinados al control de esta plaga. La obtención de una o más variedades que superen estas limitaciones generará un impacto económico positivo. Propiciará una reducción en los costos de manejo que actualmente supera la cifra de 500 a 1000 US\$ por hectárea producto de las más de 20 aplicaciones fungicidas durante el ciclo del cultivo (FONTAGRO 2007).

Frente a estos impactos del cambio climático existen dos maneras de actuar, una es reducir las emisiones de GEI mediante el proceso de mitigación. La otra es enfrentar los cambios seleccionando estrategias (adaptación) que permiten reducir los daños o que permitan

sacar ventajas o beneficios de los mismos (Margin 2008). Otro aspecto importante es mencionar que la zona productiva tiene una aptitud marginal. Esta afirmación anterior lo corrobora Garrido (2010) al mencionar que la mayoría de las zonas productivas actualmente, si no se encuentran en su límite de estrés térmico o hídrico, se encuentran en lugares reducidos o tierras marginales poco productivas.

5.3 Sobre la comparación de los escenarios de emisiones aplicados

En términos de los escenarios utilizados para determinar los cambios en las variables climáticas se obtuvo una ligera diferencia en los resultados de los escenarios del 2080 tendiente a cambios más bruscos para el escenario A2, reflejado sobre todo en los valores promedios de temperatura, precipitación asociados a riesgos a plagas y degradación del suelo y mayor reducción de superficie. Estas tendencias que caracterizan al escenario de emisiones 2080 A2 concuerdan con lo propuesto por el IPCC, quien describe un aumento progresivo y una población en continuo crecimiento. En contraste con el B2 predice valores estables de emisiones de CO₂ y un aumento más lento de la población, principalmente, lo cual potencialmente repercute de forma más leve en el cambio clima en comparación con el A2. Al respecto para es necesario comparar los impactos para el mismo año bajo diferentes escenarios A2 y B2 por consiguiente es necesario usar más de una familia, ya que todos los escenarios son probables (IPCC 2000).

5.4 Impacto en la aptitud final actual bajo escenarios de cambio climático

En la zona productiva actualmente se encuentra 691 cultivadores de papa desarrollando sus actividades agrícolas en zonas con aptitudes marginales donde existen además una serie de limitaciones como temperatura, precipitación, del suelo, riesgos a plagas y degradación de los suelos. Las áreas de mejor aptitud papera (A3) se ven severamente afectadas por incrementos de temperatura máxima y mínima asociadas a factores de suelo como, capacidad de laboreo, condición de enraizamiento y pendiente. Esta clase A3 se constituye en la mejor aptitud física y donde la tierra puede producir buenos indicadores de rendimiento (Rossiter 1993).

Otro aspecto importante no solo en porcentaje sino también en superficie total impactada productiva es la clase A3 que ocupa un 48 % (316 km²) del área total en

condiciones actuales, cuya dirección de cambio es hacia la clase A4 para todos los escenarios, pero mucho más marcado para el escenario de emisiones A2 hacia el año 2080 para los dos modelos, que significan en cambio en reducción de área a 15 % (99 km²) para el modelo HadCM3 y a 17 % (112 km²) para el modelo CSIRO. A su vez, se proyecta una expansión de las zonas aptas a altitudes mayores a condiciones 2080 A2 se desplaza 865 km² (1949 a 3058 msnm) para el modelo HadCM3 y 712 km² (1796 hasta los 3058 msnm) para el modelo CSIRO en contraste con el escenario actual potencial.

En términos de valores promedios de temperatura máxima y media que se exceden en los rangos óptimos presenta el escenario de emisiones A2 hacia el año 2080 variaciones en temperaturas que afectan el inicio de la formación y llenado de tubérculos (CIP 1988). A su vez, este escenario se caracteriza por ser el más seco, contribuyendo a la presencia de *T. solanivora* (MAG 2003). Similar impacto suscita con el modelo CSIRO con el escenario de emisiones A2 hacia el año 2080 donde la restricción es por temperatura máxima. Estos resultados obtenidos concuerdan con lo propuesto por el IPCC, que en general este escenario de emisiones A2 se observe un aumento progresivo de CO₂ y una población en continuo crecimiento, en contraste con el escenario de emisiones B2 (escenario optimista) predice valores estables de emisiones de CO₂ y un aumento más lento de la población, lo cual potencialmente repercute de forma más leve en el cambio del clima en comparación con el A2 (IPCC 2000).

5.5 Sobre los cambios en la rentabilidad actual bajo escenarios de cambio climático

En la producción de papa, las variables económicas como el MB se deben a diferentes factores, como calidad de los suelos, cantidad y distribución de la precipitación en el ciclo del cultivo, temperaturas óptimas, semillas mejoradas, el manejo agronómico, riesgos a plagas y efectos del mercado. Estos factores se expresan en MB para el escenario actual muy por encima en comparación con los escenarios de emisiones de cambio climático. Muestra un total de ₡ 1962 millones de colones distribuidas en 31567 en comparación con el escenario 2080 A2 para el modelo HadCM3 con apenas ₡ 961 millones de colones y un área de 9907 ha. Esto explica que los MB están en relación al tamaño de área que poseen los paperos. Sin embargo este mismo escenario presenta mayor rendimiento en promedio del área total

productiva (26 tn/ha) a pesar de presentar temperaturas por encima del óptimo (14 a 25 °C) y una precipitación por debajo de lo disponible en el ciclo (275 a 462 mm/ciclo). No es tan lógico que UC que no presentan las condiciones agroecológicas favorables tengan el mayor rendimiento en comparación con el actual potencial y demás escenarios de emisiones. Este fenómeno climático se explica en estudios realizados en Costa Rica por Villalobos *et al* (1990) que a pesar del incremento de temperatura de 2 °C reducirían los rendimientos del cultivo de la papa, efecto que se vería magnificado con la disminución de las lluvias. Sin embargo la mayor concentración de CO₂ podría revertir este efecto. Esta afirmación lo confirma Bindi (2008) y Salinger (1997) que un incremento en la concentración de CO₂ aumentaría directamente la tasa de fotosíntesis y la producción de biomasa de las plantas C₃. El incremento de la biomasa aérea no se vería muy favorecido, sin embargo la biomasa por debajo del suelo mejoraría considerablemente en tamaño y mayor número de tubérculos. También dicen que el aumento de la producción sería de alrededor del 10 % por cada 100 ppm de CO₂ en la atmósfera. En contraste para el modelo CSIRO los rendimientos se mantienen en un promedio de 23.88 tn/ha.

Por otra parte cuando se analizó estadísticamente los promedios de rendimiento para los dos modelos, se entiende para el modelo HadCM3 existen diferencias significativas entre escenarios. Es decir el escenario actual potencial es diferente a todos los demás escenarios de emisiones. Sin embargo los escenarios 2080 A2 y 2080 B2 son significativamente iguales en rendimiento. En contraste con el modelo CSIRO no existen diferencias significativas en los rendimientos para todos los escenarios de emisiones, con respecto al escenario actual potencial.

La zona productiva presenta muchas limitaciones físicas (capacidad de laboreo, condición de enraizamiento, pendiente, altitud, temperatura y precipitación) por lo que su clasificación en los niveles aptitud según la metodología de la FAO es A3, pero existe una relación aunque las tierras sean clases de aptitud marginal, los rendimientos estarían influenciados por la buena tecnología e insumos que aplican y las condiciones en la que se produce. En contraste una tierra marginal puede tener mejores Margen Bruto que una clase A1, si la relación de precios de salidas a costos de insumos es favorable, puede caer en la mejor clase económica A1. Sin embargo puede haber tierras sin limitaciones físicas, pero si la situación económica no es favorable, puede caer en la clase económica n1. Este fenómeno de

mercado unido a buenas tecnologías y prácticas que ayuden a mitigar el cambio climático y a la vez adaptarse (variedades resistentes a estrés térmico e hídrico y a plagas), se augura seguir cultivando papa en la cuenca del río Reventazón hacia los años 2050 y 2080, pero a altitudes mayores a las actuales y con menos superficie.

5.6 Algunas estrategias potenciales de mitigación y adaptación del cultivo de la papa al cambio climático

En la zona productiva las tierras que presentan algún tipo de limitación por temperatura máxima, mínima y riesgo a plagas, pudiesen reducir sus áreas no aptas e incrementar las tierras óptimas para el cultivo de la papa. Mediante medidas de mitigación y adaptación expuestas a continuación son la clave para recuperar la biodiversidad agrícola, reducción de la erosión del suelo, incremento de la precipitación efectiva, afrontar los impactos por temperaturas altas y disminución de minerales, etc. (Anexo 17).

Para UC que tienen limitaciones por temperatura: el ordenamiento del territorio garantiza conocer las zonas de riesgos a cambio climático. Manejo de cubiertas vegetales para crear microclimas y retención hídrica reduce 0.33 tn CO₂/año. Manejo de los residuos de la cosecha capturando el CO₂ en la composición de compostajes (0.17 tn CO₂/año). Reducción del uso de fertilizantes provoca una mayor fijación de Carbono (0.33 tn CO₂/año) y Nitrógeno del suelo. Utilización de abonos verdes.

Para UC que tienen limitación por precipitación: manejo de residuos secundarios y agua ayuda a mantener un microclima fresco en las fincas agrícolas (0.17 tn CO₂/año).

Para UC con riesgos a Plagas: Establecimiento de cubiertas vegetales ayuda a distraer a los agentes plagas. Utilización racional y eficiente de los agroquímicos (dosis regulada en el número de aplicaciones por ciclo) o un manejo de *P. infestans* y *T. solanivora* por medios culturales y biológicos a través del uso de plantas con potencial biocida.

Para UC con riesgos degradación del suelo: Laboreo reducido incrementa las cantidades de carbono en el suelo en 0.17 tn CO₂/año. A su vez, reduce las emisiones de GEI mediante reducción de la aireación y la incorporación de restos de cosecha al suelo. Barreras vivas, gavetas de infiltración es útil para UC de clases A2 y A3 con riesgos medios a altos con pendientes bien pronunciadas y un rango en precipitación que excede los rangos óptimos para la producción de papa. Asociación con leguminosas en la misma finca con la finalidad de

aumentar la fijación de nitrógeno en el suelo y mejorar el aprovechamiento de nutrientes. A su vez fija al suelo 0.39 tn CO₂/año.

El InForeSouces (2008) presenta tres escenarios u opciones a seguir ante posibles cambios en la condiciones climáticas: **1. Abandono de la producción** como medida de adaptación extrema si el cambio climático produce un profundo deterioro de las condiciones de producción. **2. Expansión a nuevas zonas** a altitudes mayores donde las UC se verán encarecidas y se aumentarán el riesgo a degradación del suelo por las pronunciadas pendientes que significa desarrollar esta actividad y a su vez, conflicto de uso con el bosque. **3. Adaptación de la producción** en muchas zonas, será necesario implementar medidas de adaptación para mantener la producción o reducir las pérdidas de rendimiento. La cuenca del río Reventazón no es ajena a estas afirmaciones por lo que en la sección siguiente se presentan varias medidas de adaptación posibles y consideraciones referentes a la producción de papa:

Para UC que tiene limitaciones por temperatura: Pronósticos meteorológicos. La información de cambio climático y su impacto de gran valor para los agricultores. Un ejemplo, son los sistemas de aviso temprano que son de gran ayuda en la planificación del calendario agrícola. En la cuenca del río Reventazón las áreas marginales A3 pudiesen reducirse con la obtención y disponibilidad de nuevas variedades apropiadas para condiciones ambientales adversas, mejorarían la competitividad, aumentarían las superficies óptimas, y se diversificaría la producción agraria, asegurando el suministro de alimentos en las zonas de menor aptitud. A su vez, el cultivo de genotipos adecuados, reducción del uso de fertilizantes y agroquímicos, etc., aumentarían los ingresos de los agricultores (FONTAGRO 2010). Otro aspecto importante es el desarrollo de nuevas prácticas para el sistema agrícola papa que pueda soportar temperaturas altas. En condiciones donde las tierras tienen aptitud no apta se implementarían invernaderos o aeroponía para la producción de papas en ambientes controladas. Por consiguiente se deberían elaborar mapas de zonas altamente vulnerables y creación de un sistema de seguros agrícolas.

Para UC que tiene limitación por precipitación: En la cuenca del río Reventazón hay la necesidad de contar con nuevas variedades resistentes a estrés hídrico y de maduración temprana para estaciones lluviosas cortas y a su vez, el de obtener papas silvestres que sirvan como reserva genética ya que desempeñan un papel importante en la obtención de variedades resistentes a temporadas de sequías. Estas estrategias de adaptación antes mencionadas se consideran de gran importancia en la cuenca del río Reventazón considerando que para todos

los escenarios de emisiones con el modelo HadCM3 los valores promedios de precipitación tienden a reducir considerablemente.

Desde este punto de vista Costa Rica es sensible a cambios climáticos por lo que tendrán que diversificar nuevas variedades en el sistema productivo ya que actualmente el 85 % es para Floresta y 15 % para Granola.

Es cierto que en la producción de papa, mucho depende de la obtención exitosa de nuevas variedades. Si los investigadores logran crear variedades más resistentes al estrés con rendimientos suficientes, incluso en condiciones de aptitudes climáticas marginales a no aptas, entonces se podrá seguir cultivando papa en muchas zonas en el futuro. A su vez, en cuenca del río Reventazón y en otras zonas la única capacidad de adaptación ante estos cambios, reside en que los cultivadores de papa actualmente recurran a fertilizantes y productos químicos para mantener un rendimiento aceptable.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

La metodología empleada para la evaluación de tierras a través de ALES, bajo el enfoque de la FAO, conjuntamente con las experiencias de los expertos, permitió la construcción de un modelo experto, para evaluar la aptitud física y económica actual potencial bajo escenarios de cambio climático en la cuenca alta del río Reventazón. A su vez, esta metodología es suficientemente confiable para integrar en ALES escenarios de emisiones y los SIG. Esta metodología se convierte en pionera e innovadora en la evaluación de los posibles impactos del cambio climático bajo el contexto de aptitud.

El levantamiento y recopilación de la información de los aspectos biofísicos y económicos permitieron una mejor visión del estado actual de la cuenca alta del río Reventazón, lo cual constituye un insumo importante para su conocimiento.

Existe escasa información sobre las características biofísicas (evaluaciones fisicoquímicas del suelo), y los datos de las estaciones climáticas no cuentan con un tiempo considerable de registro del clima en la zona de estudio.

Los paperos realizan actividades que involucran incrementos en sus costos de producción para obtener mejores retornos económicos (altos insumos de fertilizantes, mayor número de aplicaciones de agro-tóxicos por ciclo, preparación de terrenos para mejorar la capacidad de laboreo, etc.).

El 48 % del área total es productiva y más del 90 % del área presenta riesgo a plagas y degradación del suelo.

El modelo HadCM3 presenta las condiciones más comprometedoras en cuanto al incremento de temperatura y reducción en los valores promedios de la precipitación y reducción de sus áreas. En contraste el modelo CSIRO se muestra menos restrictiva en temperatura sin embargo los valores promedios de precipitación tienden a incrementarse y aumentar el riesgo a degradación del suelo y *P.infestans*. Para los dos modelos con el escenario A2 hacia el año 2080 temperatura y precipitación muestran restricción reducción de

las mayores áreas productivas. En términos generales el modelo HadCM3 pierde mayor superficie (628 km²) que el modelo CSIRO (587 km²).

Con el modelo HadCM3 las áreas de aptitud A3 se desplazan a mayores altitudes que con el modelo CSIRO.

Los mejores promedios en rendimientos lo presenta el escenario 2080 A2 para el modelo HadCM3 y el escenario 2080 B2 para el modelo CSIRO.

Se seguirá cultivando papa en la cuenca del río Reventazón siempre y cuando los cultivadores de papa adopten medidas correctivas y opten por nuevas variedades tolerantes a estreses abióticos y resistentes a plagas.

Es importante destacar que ni la adaptación ni la mitigación por si mismas conseguirán evitar todos los impactos del cambio climático, sin embargo pueden complementarse y en conjunto reducir de manera notable los riesgos. Sin embargo a largo plazo, un cambio climático sin medidas de mitigación superaría la capacidad de adaptación de los sistemas agrícolas.

6.2 RECOMENDACIONES

Para trabajos posteriores se recomienda, tener una buena base de datos biofísicos, desde el punto de vista de aptitud de tierras y contar con la más completa y actual información sobre las características físico químicas del suelo de la zona de estudio.

Realizar la validación de la evaluación de tierra actual, mediante una segunda opinión de expertos y recorridos en campo. A su vez, realizar las evaluaciones de sensibilidad al cambio climático mediante nuevos modelos climáticos y validar con datos de clima de las estaciones locales que se encuentran en la cuenca para el escenario actual potencial.

Realizar evaluaciones de cambio climático asociados a la fenología del cultivo de la papa y asociados a riesgo de plagas considerando los microclimas y evaluaciones de campo. A su vez, realizar este tipo de investigación en todas las campañas y compararlas entre sí.

Realizar estudios de cuantificación de CO₂ y relacionarle con el rendimiento del cultivo de papa en la cuenca alta del río Reventazón.

Considerar un levantamiento de información socioeconómica directamente de los agentes involucrados con la agrocadena de la papa. Las razones son que las condiciones agroclimáticas y socioeconómicas en las que se ubican los agricultores actualmente son muy distintas lo cual se refleja en su eficiencia productiva y su capacidad para manejar los riesgos inherente a la agricultura. Es por ello se recomienda hacer un análisis estratificado en relación al tamaño de la finca, a la tecnología que usa, costos generales y que actividades culturales y técnicas cumplen para mitigar y adaptarse al cambio climático. La metodología aplicada en este estudio es muy dinámico por lo que se recomienda su uso en evaluaciones futuras para otros cultivos de importancia económica sensibles al cambio climático.

Se recomienda evaluar una gama de cultivos sensibles al cambio climático para determinar su distribución desde el punto de vista de aptitud y compararlos entre ellas. De igual manera utilizar mayor número de modelos y escenarios de emisiones para generar mayor información respecto a los impactos del cambio climático sobre la agricultura.

Se recomienda que el gobierno costarricense a través de sus instituciones que velan por el desarrollo agrícola ligado a riesgos a cambios climáticos, planifiquen políticas de adaptación al cambio climático en la zona de estudio.

7. BIBLIOGRAFIA

- Abad, Gloria; J. Abad & C. Ochoa. 1995. Historical and scientific evidence that supports the modern theory of the Peruvian Andes as the centre of origin of *Phytophthora infestans*. Pages 239-245 in: *Phytophthora infestans* 150. L, J. Dowley, E. Bannon, L.R. Cooke, T. Keane and E. O' Sullivan, eds. Boole Press Ltd., Ireland.
- Adams *et al.* 1988. Implications of Global Climate Change for Western Agriculture, *Western Journal of Agricultural Economics*, 13 (2): 348-356.
- Aggarwal, P.K., and Mall, R.K. 2002 Climate change and rice yields in diverse agro-environments of India. II. Effect of uncertainties in scenarios and crop models on impact assessment. *Climatic Change*. Vol 52 (3): 331-343.
- Alvarado, J.J., E. Ortega y J. Acevedo. 1993. Evaluación de la densidad de trampas de feromona en la captura de la polilla centroamericana de la papa *Tecia solanivora* Povolny. *Rev. Latinoam. Papa* 5/6(1), 77-88.
- Álvarez G, Trillos O. 1999. Estudio sobre la Biología y Cría de la Polilla de la Papa *Tecia Solanivora* Povolny EN: Conclusiones y Memorias del Taller: Plan Estratégico para el Manejo de *Tecia Solanivora* en Colombia. 22 al 24 de Julio 1.998. Universidad Nacional de Colombia, FEDEPAPA, IICA. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Bogotá. p. 29.
- Amador, R. 1991. Papa. En: Aspectos técnicos sobre cuarenta y cinco cultivos agrícolas de Costa Rica. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Dirección General de Investigación y Extensión Agrícola. Boletín técnico N°74. San José, Costa Rica. 560 p.
- American Phytopathological Society. 1993. Compendium of tomato diseases. Ed. by J.B. Jones, J.P. Jones, R.E. Stall y T.A. Zitter, St. Paul, MN, USA. 73 p.
- Antle, J.M., 1996. Methodological issues in assessing potential impacts of climate change on agriculture. *Forest Meteorol.* 80, 67-85.
- Arbelaés MP y S Henao. 2002. Situación epidemiológica de las intoxicaciones agudas por plaguicidas en el Istmo centroamericano. OPS, OMS; DANIDA, 59.
- Arroyo, L. 1995. Método de evaluación de tierras para cultivos anuales, por medio de Sistemas de Información Geográfica. Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 142 p.
- Barroso, R. 1974. Ciclo biológico de la polilla guatemalteca de la papa *Scrobipalopsis solanivora* (Povolný) (Lepidoptera: Gelechiidae), nueva grave plaga de *Solanum tuberosum*. Tesis Ing. Agro. Escuela de Fitotécnia Universidad de Costa Rica. 56 p.
- Bastidas, S. 2008. Observaciones en el proceso de armonización de políticas públicas para el Manejo Sustentable de Tierras en el Ecuador. Quito, Ecuador

- Bertrand, C., Loutre, M., Crucifix, M. And Berger, A. (2002) Climate of the Last Millennium: A Sensitivity Study. *Tellus A*, 54, 221–244.
- Brenes, F. 1995. Información sobre censos de papa y otras actividades. *Agricultura y Ganadería*. (5):18-19p
- Bindi, M. 2008. El cambio climático pérdidas y ganancias.
- Bosa, F.; Witzgall, P.; Fukumoto, T.; Alba, M. Evaluation of the mating disruption technique on *Tecia solanivora* Povolny (Lepidoptera: Gelechiidae). *Rev. Colomb. Entomol.* July/Dec. 2005, vol.31, no.2, p.145-150. ISSN 0120-0488.
- Bosnjak, D. y Pejic, B. 1996. Potatoes water requirement in the Chernozem zone of Yugoslavia. *Acta Horticulturae*. Consultado el 3 de febrero de 2011. Disponible en http://www.actahort.org/books/449/449_29.htm
- CADETI (Comisión Asesora sobre Degradación de Tierras, CR). 2004. Programa de acción nacional de lucha contra la degradación de tierras en Costa Rica. MINAE. 2 ed. San José, CR.111 p.
- Caldiz *et al.* 1997. Análisis de los factores determinantes del rendimiento en papa (*Solanum tuberosum*) con especial referencia a la situación Argentina. *Revista Facultad de agronomía*. 1997. Tomo 102 (2) 203-229 p. Consultado el 5 junio de 2011. Disponible en http://sedici.unlp.edu.ar/search/request.php?id_document=ARG-UNLP-ART-0000006752.
- Camas, G, R. 1995. Desarrollo de un modelo para la evaluación automatizada de tierra con énfasis en la conservación de los recursos naturales, en la Fraylesca, Chiapas, México. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 136p.
- Casados, J. 1984. Estudio del ciclo biológico de la polilla o palomilla guatemalteca de la papa *Scrobipalopsis solanivora* Povolny en Chimaltenango, Guatemala 1984. Facultad de Agronomía. Universidad de San Carlos de Guatemala, Chimaltenango (Guatemala). 37 p.
- Castillo LE. 1997. Informe sobre plaguicidas para el Proyecto Estado de la Nación. Programa de Plaguicidas, Universidad Nacional, Costa Rica.
- Cifuentes, J. 2010. ABC del cambio climático en Mesoamérica. Documento técnico. CR, CATIE. 86 p.
- Cline, W. R. 2007 Global warming and agriculture: impact estimates by country. Center for Global development, Washington DC.
- Cruz, B, JL. 2002. Evaluación del cambio de uso de la tierra en sistemas de producción agropecuaria en la cuenca del Río Barranca, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 147 p.
- CIP. (Centro Internacional de la Papa).1996. Informe anual 1996. Lima, Perú. CIP. 16 p.

- Cortbaqui, R. 1993. Siembra de papa. Boletín de Información Técnica 11 CIP. Lima, Perú. Centro Internacional de la Papa. Pp 81 – 96.
- Chacón, M. 1993. Producción de semilla certificada de papa. Oficina Nacional de Semillas. San José, Costa Rica. 128pp
- Delecolle, R., Ruget, F., Ripoché, D., Gosse, G. 1995 Possible effects of climate change on wheat and maize crops in France. In Climate change and agriculture: Analysis of potential international impacts. Proceedings of a symposium sponsored by the American Society of Agronomy in Minneapolis, MN, 4-5 Nov. 1992. No. 59, 241-257.
- De los Santos Sanz-Bustillo JJ, L Pratt y JM Pérez. 1997. Uso de plaguicidas en la agroindustria de Costa Rica. INCAE CEN708, diciembre 1997.
- Domínguez, A. 1989. Tubérculos y raíces. Tratado de fertilización, segunda edición. Madrid, España. Ediciones Mundiprensa. 601 p.
- Doorembos, J. y Kassam, A. 1979. Estudio del Agua sobre el Rendimiento de los Cultivos. Riego y Drenaje. Roma, Italia. Estudio FAO, Food and Agriculture Organization of United Nations. p 33.
- Econex 2010. Polilla guatemalteca *Tecia solanivora*. Consultado el 20 Julio de 2010. Disponible en <http://www.e-econex.com/soluciones-para-plagas-ver.php?ids=196&n=Tecia%20solanivora>
- Edwards, C.A. 1990. Sustainable Agricultural Systems. (Soil and Water Conservation Society).
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). 1976. A Framework for land evaluation. Waaganin, Ho. 360 p. (Publication N.º 22).
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). 1984. Proteger y Producir: Conservación del Suelo para el Desarrollo. Roma, IT. 40 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 1985. Esquema para la evaluación de tierras. Roma, IT, FAO. 228 p. (Boletín suelos de la FAO. n.º. 32).
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2010. Bioenergía y Seguridad Alimentaria: “El análisis de BEFS para el Perú”. Roma, IT, FAO. 180 p. (Documento de trabajo).
- Flores, E. M; Araujo, R; Betancourt, E y Liverman, D. 1996. Comportamiento de la superficie potencialmente apta para el cultivo del maíz de temporal ante un cambio climático. Memorias del Segundo Taller.
- Galvao LA, JA Escamilla, S Henao, E Loyola, C Castillo y P Arbeláez. 2002. Plaguicidas en el Istmo Centroamericano. OPS/OMS/MASICA/PLAGSALUD. Diciembre 2002 67 p.

- García JE. 1997. Introducción a los Plaguicidas. Universidad Estatal a Distancia, EUNED. San José 450p.
- Gian-Reto, W; Post, E; Convey, P; Menzel, A; Parmesa, C; Beebee, TJC; Fromentin, JM; Hoegh-Guldeberg, O; y Bairlein, F. 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416: 339-395.
- Giorgi, F. 2005. Climate change prediction. *Climatic change*, 73(3): 239-275.
- Giraldo, D; Juarez, H; Pérez, W; Trebejo, I; Yzarraga, W; y Forbes, G. 2010. Severidad del tizón tardío de la papa (*Phytophthora infestans*) en zonas agrícolas del Perú asociado con el cambio climático. *Revista peruana geo-atmosférico RPGA* (2) 56-67.
- GCOS, 2003. The Second Report on the Adequacy of the Global Observing Systems for Climate in Support of the UNFCCC. WMOIOC-UNEP-ICS, GCOS-82, Technical Document No. 1143, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 85 pp.
- Gutiérrez, J.M; Pons, M.R. (2006) Modelización numérica del cambio climático: bases científicas, incertidumbres y proyecciones para la Península Ibérica. *Revista de Cuaternario y Geomorfología*, 20 (3-4), 15-28.
- Guerrero, A. 1984. Cultivos herbáceos extensivos. Ediciones Mundi-Prensa. Tercera edición. Madrid, España. 743 p.
- Harrison, J. 1992. Effects of the aerial environment on late blight of potato foliage review. *Review Plant Pathology* 41 (4): 384-416.
- Hart, R.D. 1985. Agroecosistemas: conceptos básicos. Turrialba, CR, CATIE. 160 p.
- Haverkort, A. 1986. Manejo de agua en la producción de papa. *Boletín de Información Técnica* 15 CIP. Lima, Perú. Editorial Agropecuaria Hemisferio Sur. Centro Internacional de la Papa. 24 p.
- Haverkort, Aj. 1990. Ecología de los sistemas de cultivo de papa en relación con la latitud y altitud. *Agr Syst* 32:251-272.
- Herrera, F. 1997. La polilla guatemalteca de la papa. Biología, comportamiento y prácticas de Manejo Integrado. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. Regional Uno. Cundinamarca- Boyacá. Bogotá. 14 p.
- Hijmans, RJ, B Condori, Carrillo, R y Kropff, MJ. 2003. Un método específico y la restricción cuantitativa para evaluar el impacto potencial de la nueva tecnología agrícola: el caso de la papa resistente a heladas para el altiplano (Perú y Bolivia). *Agr Syst*. 76:8G55-G11.
- Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, D. Xiaosu, K. Maskell, and C.A. Johnson, C.A. (eds.), 2001. Climate change 2001. The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- ICE (Instituto Costarricense de Electricidad). 2005. Plan de manejo integral de la cuenca del río Reventazón.
- Iglesias, A., and Minguez, M.I. 995 Prospects for maize production in Spain under climate change. In: Climate change and agriculture: Analysis of potential international impacts.
- IMN (Instituto Meteorológico Nacional). 2008. Clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica. Segunda Comunicación Nacional, Comité Regional Nacional de Recursos Hidráulicos. San José, CR, IMN. 72 p.
- INE (Instituto Nacional de Ecología y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2006 Inventario Nacional de Emisiones de Gases Efecto Invernadero 1990-2002., México
- Infocources Focus. 2008. La papa y el cambio climático. Consultado el 10 de diciembre del 2009. Disponible en www.deza.admin.ch/ressources/resourcees168163.pdf. Arreglar bibliografía.
- INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agraria). 2010. El suelo y el cambio climático: Un desafío del futuro. Consultado 7 enero 2011. Disponible en <http://www.fyo.com/granos/ampliar.asp?IdNoticia=100458&IdAutor=11431&idtipoinformacion=22>
- IPCC (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático). 2000. Informe especial: escenarios de emisiones. Consultado 26 de set. 2009. Disponible en <http://www.grida.no/climate/ipcc/spmpdf/sres-s.pdf>
- IPCC (Panel Intergubernamental de expertos sobre cambio climático). 1995. Climate Change: The science of Climate Change, 1996. J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and Maskell, K. (Eds.), Cambridge Univ. Press, Cambridge, 572 pp.
- IPCC (Panel Intergubernamental de expertos sobre cambio climático). 2002. Cambio Climático y Biodiversidad. Documento Técnico V del IPCC. Eds. H. Gitay; A. Suárez; RT. Watson; DJ. Dokken. 85p.
- IPCC-WGI. 2007. Summary for Policymakers. En Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (Eds.) Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge, RU. 996 pp.
- Jaramillo, A. 1979. La papa: control de sus enfermedades y plagas en América Latina. Rohm and Haas Company. Latin American Region. Agricultural Business Team. 40p.

- Jerez, J.; Simpfendorfer, C. 2000. Efecto del riego en cultivos de papa. Tierra Adentro. Especial riego y drenaje. INIA Instituto de Investigaciones Agropecuarias (34): 36-38.
- Karl, T; Trenberth, K. 2005. What is Climate Change?. In Lovejoy, TE; Hannah, L. eds. Climate Change and Biodiversity. Michigan, USA, Yale University Press. p. 15-28.
- Klassen, G.; Mills, G. y Geisel B. 2001. Potato Production. Irrigation. Consultado el 8 de febrero de 2011. Disponible en <http://www.gov.mb.ca/agriculture/crops/potatoes/>
- Kleidon, A. y Mooney, HA. 2000. A global distribution of biodiversity inferred from climatic constraints: results from a process-based modeling study. *Global Change Biology* 6:507-515.
- Kenny, G., Warrick, R.A., Campbell, B.D., Sims, G.C., Camilleri, M., Jamieson, P.D., Mitchell, N.D., Mcpherson, H.J. and Salinger, M.J. 2000. Investigating climate change impacts and thresholds: An application of the CLIMFACTS integrated assessment model for New Zealand agriculture. *Climatic change* 46 91-113.
- Kerr, JT; Kharouba, HM. 2007. Climate Change and Conservation Biology. In May, R; MacLean; A. Theoretical Ecology. Oxford, New York, USA, Oxford University Press. P 190-204.
- Laderach, P; Lundy, M; Jarvis, A; Ramirez, J; Perez, E; Schepp, K. 2008. Predicted impact of climate change on coffeesupply chains. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Managua, Nicaragua. 20pp.
- Lainez, O, MJ. 1997. Análisis de la relación ambiental y financiera de la dinámica de uso de la tierra en la finca comercial de CATIE, Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 136 p.
- Lal, R; Wagner, D; Greenland, T; Quine, D; Billing, R; Evans, K. 1997. Degradation and Resilience of Soils. *The Royal Society* 352(1356):997-1010.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería, CR)/MIRENEM (Ministerio de Recursos Naturales Energía y Minas, CR). 1995. Metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras de Costa Rica. San José, CR. 59 p.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). 2007. Caracterización de la agrocadena de papa. San José, CR, MAG. 61 p.
- Mantecon, J. 2002. Pérdidas potenciales debidas al tizón tardío de la papa (*Phytophthora infestans*) durante la última década. Consultado el 7 de noviembre de 2010. Disponible en www.argenpapa.com.ar.
- Marelli, H. 2003. Conservación de Suelos. Consultado el 5 de junio de 2010. Disponible en <http://www.inta.gov.ar/mjuarez/info/documentos/Suelos/bensust03.htm>

- Martínez, C; Moreno, U. 1992. Expresiones fisiológicas de resistencia a la sequía en dos variedades de papa sometidas a estrés hídrico en condiciones de campo. *Revista Brasileira de Fisiología Vegetal* 4(1): 33-38.
- McCarthy, J.J., O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken, and K.S. White, 2001. *Climate change 2001. Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Mendoza, Z. C. 1996. *Enfermedades fungosas de hortalizas*. Departamento de Parasitología. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México, 85 p.
- Midmore, D. 1998. *Fisiología de la planta de papa bajo condiciones de clima cálido*. Guía de Investigación 24. Lima, Perú. CIP, Centro Internacional de la Papa. 15 p.
- Murillo, R. 1981. La polilla de la papa *Scrobipalopsis solanivora* Povolny. Boletín Técnico N 69. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Costa Rica. 12 p.
- Niño, L. 2004. Revisión sobre polilla de la papa *Tecia solanivora* en Centro y Suramérica. Suplemento Revista Latinoamericana de la papa. 1-18. p.
- Niño, L.; Notz, A. 2000. Desarrollo y sintomatología de las larvas de la polilla de la papa *Tecia solanivora* (Povolny) 1973 (Lipodeptera: Gelechiidae) infectadas por un virus granulosis nativo. *Boletín Entomológico Venezolano*. Vol. 15 N°. 1. 29-38
- Notz, A. 1996. Influencia de la temperatura sobre la biología de *Tecia solanivora* (Povolny) (Lepidoptera: Gelechiidae) criadas en tubérculos de papa *Solanum tuberosum* L. *Boletín Entomología Venezolana*. 11 (1): 49-54.
- Okunaga, Y. y Ochoa R.. 1987. Estudio de dinámica reproductiva en la palomilla de la papa *Scrobipalopsis solanivora* y relación natalidad/mortalidad para *S. solanivora* y *Phthorimaea operculella*. In: Memoria XIII Reunión Asociación Latinoamericana de la papa (ALAP), Panamá, 402-421 p.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial). 2000. Cambio climático y desertificación. 4 p.
- ONU (Organización de las Naciones Unidas) 1992. *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Nueva York, Estados Unidos. 27 p.
- Ordaz, J; Ramírez, D; Mora, J; Acosta, A; Sema, B. 2010. Costa Rica: Efectos del cambio climático sobre la agricultura. México; DF.CEPAL. 76 p.
- Orozco, SG. 1993. Desarrollo de un modelo para la utilización de tierras de uso agroforestal para la región IV de Nicaragua, con el Sistema Automatizado de Evaluación de Tierras (ALES). Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 127 p.
- Orús, F; Quílez, D; y Betrán, J. 2000. *El Código de Buenas Prácticas Agrarias (I). Fertilización nitrogenada y contaminación por nitratos*. Edita: Diputación General de Aragón. Dirección General de Tecnología Agraria.

- PACC (Proyecto Adaptación al Cambio Climático a través de una Efectiva Gobernabilidad del Agua en el Ecuador) 2008. Estudio de vulnerabilidad actual a los riesgos climáticos en el sector de los recursos hídricos en las cuencas de los Ríos Paute, Jubones, Catamayo, Chone, Portoviejo y Babahoyo, Ecuador, 166 p.
- Palacios, M. Centro Internacional de la Papa. 1997. Principales plagas de la papa: La polilla y la mosca minadora. Consultado el 4 de febrero de 2011. p.94. Disponible en http://www.asocam.org/biblioteca/R0030_completo.pdf
- Parry, M. Climate change and world agriculture. Earthscan Publications Limited London. 1990.
- Parry, ML, Rosenzweig, C, Iglesias, A, Livermore, M & Fischer, G 2004, 'Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios', Global Environmental Change, vol. 14, pp. 53-67.
- Parry, M., J. Palutikof, C. Hanson y J. Lowe (2008), "Squaring Up to Reality". Nature 2:68–71.
- Parson, E.A. y K. Fisher-Vanden, (1995), "Searching for Integrated Assessment: A Preliminary Investigation of Methods, Models, and Projects in the Integrated Assessment of Global Climatic Change", Consortium for International Earth Science Information Network (CIESIN). University Center, Mich. Consultado el 20 de agosto de 2010. Disponible en <http://sedac.ciesin.columbia.edu/mva/iamcc.tg/mva-questions.html>
- Pérez, A; Calvo, G; González, JL. 2001. La importancia del manejo de la cuenca del Río Reventazón. Turrialba, CR, ICE-UIPRE. 16 p.
- Porter, J; Parry, M.; Carter, T. 1991. The potential effects of climatic change on agricultural insect pests. Agricultural and forestry meteorology. 57: 221-240.
- Pimentel, CE. 2009. Evaluación de tierras con fines de recuperación de tierras degradadas en la cuenca alta del río San Pedro, Panamá, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 199 p.
- Pinto, HS; Junior; JZ; Assad, ED. 2008. El calentamiento global y la agricultura brasileña. La agricultura ¿otra víctima del cambio climático? Santiago de Chile.
- PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). 2010. "Evaluación de los flujos de inversión y financieros para la adaptación de los sectores de biodiversidad e hídrico necesario para hacer frente al cambio climático". Consultado el 27 enero 2011. Disponible en http://nacionesunidas.or.cr/index.php?option=com_content&task=view&id=346&Itemid=121
- Rivera, CG. 1999. Conceptos introductorios a la fitopatología. EUNED.San José, CR. 336 p.

- Rosenzweig, C. y Liverman, D. 1992. Predicted effects of climate change on agriculture: A comparison of temperate and tropical regions. In: S.K. Majumdar (ed.). Global climate change: Implications, challenges, and mitigation measures. The Pennsylvania Academy of Sciences, Philadelphia, USA. p. 342-61.
- Rosenzweig, C and Hillel, D. 2008. Climate change and the global harvest: impacts of El Nino and other oscillations on agroecosystems. Oxford University Press, New York.
- Rossiter, DG; Jimenez, T, A; Van Wambeke, A. 1995. Sistema automatizado para la evaluación de tierras ALES, versión 4.5 en español: Manual para usuarios. Ithaca, US, Cornell University. 173 p. (Serie Teaching Series no. T93-1).
- Rossiter, DG. 1998. Evaluación de Tierras. Conceptos básicos y Procedimientos de Evaluación de Tierras. Ithaca, US, Cornell University. 49 p.
- Retana, A. 1990. Posibles efectos de la fase de calidez del niño oscilación sur (ENSO) en la agricultura: Un análisis cualitativo de estadísticas de producción agropecuarias. Consultado el 8 de febrero de 2011. Disponible en <http://www.cne.go.cr/CEDO-CRID/20v20/CEDO/pdf/spa/doc12652/doc12652-contenido.pdf>
- Sauri, D. 2007. Potential effects of global change at Catalanian's socio-economic and cultural levels. Proc. of Adaptation to climate change: bridging science and decision making Seminary ETC/LUSI/GenCat/UAB.
- Savé, R. 2007. Potential effects of global change on Catalanian's agriculture. Proc. Of Adaptation to climate change: bridging science and decision making Seminary ETC/LUSI/GenCat/UAB.
- SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria) 1993. Diagnóstico del sector agropecuario. Tomo I. SEPSA. San José, Costa Rica. 165pp.
- Sheng, T.C. 1971. Proyecto de clasificación de la tierra orientada a su tratamiento para tierras marginales montañosas del Trópico Húmedo. Kingston, Ja, FAO. 169 p.
- Smith, J.B. and Lazo, J.K. 2001. A summary of climate change impact assessments from the U.S. Country Study Program. Climatic Change 50:1-29.
- Stern, N. 2006. Stern Review on the Economics of Climate Change. Cambridge University
Consultado el 20 de noviembre de 2010. Disponible en www.sternreview.org.uk
- Stern, N. 2007. *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Stocking, M; Murnaghan, N. 2003. Manual para la evaluación de campo de la degradación de la tierra. Madrid, EP, Mundi Prensa. 173 p.
- Stott, P.A., Stone, D.A, Allen, M.R. 2004. Human contribution to the European heatwave of 2003, Nature 432, 610-614.

- Stoorvogel, J., Schipper, R., Jansend, D. 1995. USTED: a methodology for a quantitative analysis of land use scenarios. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 43: 5-18.
- Sibaja, J. 1995. Se agudiza crisis para los productores de papa en Alvarado. *Agricultura y Ganadería* (5):16-17p.
- Soboh, G., Sully, R. y Hopkins, H. 2000. Mecanismos para incrementar el número de tubérculos. *Boletín de la Papa*, Red Papa. Consultado el 30 octubre de 2010. Disponible en <http://redepapa.org/boletintreintacuatro.html>
- Sogreah Ingenierie SNC; Gómez, Cajiao y Asociados S.A.; SINERGIA69 S.A. 1999a. Plan de manejo integral de la cuenca del río Reventazón: Diagnóstico, síntesis de diagnóstico. San José, CR. 487 p.
- Taub, DR; Miller, B; y Allen, H. 2008. Effects of elevated CO₂ on the protein concentration of food crops: a meta analysis. *Journal Global Change Biology* 14: 565-575.
- Thompson, J. 1983. Influencia de los parámetros meteorológicos en la fenología y rendimiento de la papa (*Solanum tuberosum*) en tres elevaciones de la zona norte de Cartago, Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Departamento de Agronomía. 67 p.
- Torres, F. 1989. Algunos aspectos de la biología y comportamiento de la polilla de la papa *Scrobipalopsis solanivora* Povolny 1.973, (Lepidoptera: Gelechiidae) en el estado Táchira, Venezuela. Tesis MSc en Entomología, Fac. Agron Universidad Central de Venezuela, 86p.
- Tosi J. 1985. Sistema para la determinación de la capacidad de uso de las tierras de Costa Rica. Centro Científico Tropical. San José, CR. 106 p.
- Treharne, K. 1989. The implications of the “greenhouse effect” for fertilizer and agrochemicals. In: *The Greenhouse Effect and UK Agriculture* 19 [de Bennet, R.M. ed. Centre for Agricultural Strategy, University of Reading, United Kingdom, pp. 67 - 78.
- Trenberth, K. 2005. What is Climate Change? In Lovejoy, TE; Hannah, L. eds. *Climate Change and Biodiversity*. Michigan, USA, Yale University Press. p 15-28.
- Quevedo, J. 1977. Influencia de los parámetros meteorológicos en los eventos fenológicos de la papa, variedad Cuzco. Tesis para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Universidad Nacional Agraria La Molina. Programa Académico de Agronomía. Lima, Perú. 98pp.
- Vallejo, A. 1997. Sistema experto para la evaluación del impacto del complejo Bemisia tabaco-Geminivirus en frijol, tomate y chile dulce, con fines de planificación, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 120 p.
- Villalobos, A. 1979. Algunos aspectos del cultivo y comercialización de la papa (*Solanum tuberosum*) en la provincia de Cartago. Facultad de Agronomía. Escuela de Economía Agrícola. Universidad de Costa Rica. 26 p.

Watson, R; Zinyowera, M; Moss, R; Dokken, D. 1997. The regional impacts of climate change: an assessment of vulnerability. Summary for policymakers. Report of IPCC Working group II. 16pp.

8. ANEXOS

Anexo 1. Subclases de aptitud final para el escenario actual potencial

| N° | Subclases de aptitud | Área (km²) | Área (%) | N° | Subclases de aptitud | Área (km²) | Área (%) |
|-------|---|------------|----------|----|---------------------------|------------|----------|
| 1 | 3CapLabor/CondEnra/Tmax/RelCaMg/Poli/DegSue/Tizon | 1.5 | 0.23 | 20 | 3K/Precip/DegSue/Tizon | 30.6 | 4.66 |
| 2 | 3CapLabor/CondEnra/Tmax/RelCaMg/Poli/Tizon | 0.3 | 0.04 | 21 | 3K/Tmax/Poli/Tizon | 11.4 | 1.73 |
| 3 | 3CapLabor/CondEnra/Tmed/RelCaMg | 1.1 | 0.17 | 22 | 3K/Tmax/DegSue/Tizon | 1.5 | 0.22 |
| 4 | 3CapLabor/CondEnra/Tmed/RelCaMg/Poli | 10.0 | 1.52 | 23 | 3K/Poli/Tizon | 10.7 | 1.63 |
| 5 | 3CapLabor/CondEnra/Tmed/RelCaMg/Poli/DegSue/Tizon | 2.6 | 0.40 | 24 | 3K/DegSue/Tizon | 6.0 | 0.92 |
| 6 | 3CapLabor/CondEnra/Tmed/RelCaMg/DegSue/Tizon | 11.2 | 1.70 | 25 | 3ReTmax/Poli/DegSue/Tizon | 4.9 | 0.75 |
| 7 | 3CapLabor/CondEnra/RelCaMg/qPoli/DegSue/Tizon | 24.6 | 3.74 | 26 | 3ReTmax/Poli/Tizon | 9.7 | 1.47 |
| 8 | 3CapLabor/CondEnra/RelCaMg/qPoli/Tizon | 1.4 | 0.22 | 27 | 3ReTmed | 1.6 | 0.25 |
| 9 | 3CapLabor/CondEnra/ReqPoli/DegSue/Tizon | 0.7 | 0.10 | 28 | 3ReTmed/Poli | 24.9 | 3.79 |
| 10 | 3CapLabor/K/ReAltura/Tmax/Poli/DegSue/Tizon | 0.2 | 0.03 | 29 | 3ReTmed/Poli/DegSue/Tizon | 23.4 | 3.57 |
| 11 | 3CapLabor/K/Precip/Tmax/DegSue/Tizon | 0.2 | 0.03 | 30 | 3ReTmed/Poli/Tizon | 9.6 | 1.46 |
| 12 | 3CapLabor/K/Precip/DegSue/Tizon | 6.9 | 1.04 | 31 | 3ReTmed/DegSue/Tizon | 14.2 | 2.17 |
| 13 | 3CapLabor/Tmed/Poli/DegSue/Tizon | 0.2 | 0.02 | 32 | 3ReTmed/RiTizon | 2.6 | 0.40 |
| 14 | 3K/Altura/Precip/Tmax/qPoli/DegSue/Tizon | 0.2 | 0.02 | 33 | 3ReqPoli/DegSue/Tizon | 61.1 | 9.30 |
| 15 | 3K/Altura/Precip/Tmax/DegSue/Tizon | 0.1 | 0.02 | 34 | 3ReqPoli/RiTizon | 29.9 | 4.55 |
| 16 | 3K/Altura/Tmax/Poli/Tizon | 0.7 | 0.10 | 35 | 4CapLabor/Altura/Tmin | 0.9 | 0.13 |
| 17 | 3K/Precip/Tmax/Poli/DegSue/Tizon | 1.1 | 0.17 | 36 | 4CapLabor/Tmin | 1.1 | 0.16 |
| 18 | 3K/Precip/Tmax/DegSue/Tizon | 10.4 | 1.58 | 37 | 4ReAltura/Tmin | 209.6 | 31.90 |
| 19 | 3K/Precip/Tmax/RiTizon | 0.2 | 0.02 | 38 | 4ReTmin | 129.63 | 19.73 |
| Total | | | | | | 657 | 100 |

Anexo 2. Subclases de aptitud final con el modelo HadCM3 hacia el año 2050 bajo el escenario de emisiones A2

| N° | Subclases de aptitud | Área (km²) | Área (%) | N° | Subclases de aptitud | Área (km²) | Área (%) |
|-------|---|------------|----------|----|-----------------------|------------|----------|
| 1 | 3CapLabor/CondEnra/Tmed/RelCaMg | 11.0 | 1.68 | 12 | 3K/ReqPoli/Tizon | 4.4 | 0.68 |
| 2 | 3CapLabor/CondEnra/Tmed/RelCaMg/Poli | 4.6 | 0.70 | 13 | 3ReTmax/Poli/Tizon | 9.3 | 1.41 |
| 3 | 3CapLabor/CondEnra/RelCaMg/Poli/RiTizon | 21.3 | 3.25 | 14 | 3ReTmed | 16.3 | 2.47 |
| 4 | 3CapLabor/K/Precip/Tmax/DegSue/Tizon | 0.2 | 0.03 | 15 | 3ReTmed/Poli | 20.7 | 3.14 |
| 5 | 3CapLabor/K/Precip/DegSue/Tizon | 0.2 | 0.02 | 16 | 3ReqPoli/Tizon | 86.2 | 13.12 |
| 6 | 3CapLabor/K/Tmax/Poli/DegSue/Tizon | 1.0 | 0.14 | 17 | 4CapLabor/Altura/Tmin | 0.9 | 0.13 |
| 7 | 3CapLabor/K/Poli/DegSue/Tizon | 2.1 | 0.31 | 18 | 4CapLabor/Tmin | 1.1 | 0.16 |
| 8 | 3CapLabor/Poli/Tizon | 0.2 | 0.02 | 19 | 4ReAltura/Tmax/Tmin | 127.1 | 19.35 |
| 9 | 3K/RePrecip/Tmax/DegSue/Tizon | 0.5 | 0.08 | 20 | 4ReAltura/Tmin | 82.5 | 12.56 |
| 10 | 3K/RePrecip/DegSue/Tizon | 2.0 | 0.30 | 21 | 4ReTmin | 261.7 | 39.83 |
| 11 | 3K/ReTmax/Poli/Tizon | 3.8 | 0.57 | | | | |
| Total | | | | | | 657 | 100 |

Anexo 3. Subclases de aptitud final con el modelo HadCM3 hacia el año 2080 bajo el escenario de emisiones A2

| N° | Subclases de aptitud | Área (km²) | Área (%) | N° | Subclases de aptitud | Área (km²) | Área (%) |
|-------|--|------------|----------|----|----------------------------|------------|----------|
| 1 | 3CapLabor/CondEnra/Precip/Tmed/RelCaMg | 6.9 | 1.05 | 8 | 3RiTizon | 22.1 | 3.36 |
| 2 | 3CapLabor/CondEnra/Precip/RelCaMg | 15.5 | 2.35 | 9 | 4CapLabor/Altura/Tmax/Tmin | 0.9 | 0.13 |
| 3 | 3CapLabor/CondEnra/RelCaMg/RiTizon | 2.4 | 0.36 | 10 | 4CapLabor/Tmax/Tmin | 0.3 | 0.05 |
| 4 | 3CapLabor/Precip | 0.2 | 0.02 | 11 | 4CapLabor/ReTmin | 0.7 | 0.11 |
| 5 | 3RePrecip | 43.1 | 6.56 | 12 | 4ReAltura/Tmax/Tmin | 209.6 | 31.90 |
| 6 | 3RePrecip/Tmed | 8.8 | 1.34 | 13 | 4ReTmax/Tmin | 63.0 | 9.59 |
| 7 | 3ReTmed | 0.1 | 0.02 | 14 | 4ReTmin | 283.2 | 43.11 |
| Total | | | | | | 657 | 100 |

Anexo 4. Subclases de aptitud final con el modelo HadCM3 hacia el año 2050 bajo el escenario de emisiones B2

| N° | Subclases de aptitud | Área (km ²) | Área (%) | N° | Subclases de aptitud | Área (km ²) | Área (%) |
|-------|---|-------------------------|----------|----|---------------------------|-------------------------|----------|
| 1 | 3CapLabor/CondEnra/Tmax/RelCaMg/Poli/DegSue/Tizon | 3.8 | 0.58 | 16 | 3ReTmax/Poli/DegSue/Tizon | 0.7 | 0.11 |
| 2 | 3CapLabor/CondEnra/Tmed/RelCaMg | 12.0 | 1.82 | 17 | 3ReTmax/Poli/Tizon | 3.0 | 0.46 |
| 3 | 3CapLabor/CondEnra/Tmed/RelCaMg/Poli | 8.0 | 1.21 | 18 | 3ReTmed | 15.5 | 2.35 |
| 4 | 3CapLabor/CondEnra/RelCaMg/Poli/DegSue/RiTizon | 14.8 | 2.26 | 19 | 3ReTmed/Poli | 16.7 | 2.54 |
| 5 | 3CapLabor/CondEnra/RelCaMg/Poli/RiTizon | 2.5 | 0.37 | 20 | 3ReTmed/Poli/DegSue/Tizon | 1.0 | 0.15 |
| 6 | 3CapLabor/K/Precip/Tmax/DegSue/Tizon | 0.2 | 0.03 | 21 | 3ReTmed/Poli/Tizon | 9.6 | 1.46 |
| 7 | 3CapLabor/K/Precip/DegSue/Tizon | 3.4 | 0.51 | 22 | 3ReTmed/DegSue/Tizon | 0.4 | 0.07 |
| 8 | 3CapLabor/K/Tmax/Poli/DegSue/Tizon | 0.4 | 0.06 | 23 | 3ReTmed/Tizon | 2.6 | 0.40 |
| 9 | 3CapLabor/K/Tmax/DegSue/Tizon | 0.3 | 0.04 | 24 | 3ReqPoli/DegSue/Tizon | 47.8 | 7.27 |
| 10 | 3CapLabor/Poli/DegSue/Tizon | 0.2 | 0.02 | 25 | 3ReqPoli/Tizon | 48.5 | 7.38 |
| 11 | 3K/Precip/Tmax/Poli/DegSue/Tizon | 0.1 | 0.02 | 26 | 4CapLabor/Altura/Tmin | 0.9 | 0.13 |
| 12 | 3K/Precip/Tmax/DegSue/Tizon | 0.6 | 0.09 | 27 | 4CapLabor/Tmin | 1.1 | 0.16 |
| 13 | 3K/Precip/DegSue/Tizon | 8.4 | 1.27 | 28 | 4ReAltura/Tmax/Tmin | 46.9 | 7.13 |
| 14 | 3K/Tmax/DegSue/Tizon | 6.1 | 0.94 | 29 | 4ReAltura/Tmin | 162.7 | 24.77 |
| 15 | 3K/DegSue/Tizon | 2.7 | 0.41 | 30 | 4ReTmin | 236.2 | 35.95 |
| Total | | | | | | 657 | 100 |

Anexo 5. Subclase de aptitud final para el modelo HadCM3 hacia el año 2080 con el escenario de emisiones B2

| N° | Subclases de aptitud | Área (km ²) | Área (%) | N° | Subclases de aptitud | Área (km ²) | Área (%) |
|-------|---|-------------------------|----------|----|-----------------------|-------------------------|----------|
| 1 | 3CapLabor/CondEnra/Tmed/RelCaMg | 12.0 | 1.82 | 11 | 3ReTmed | 17.8 | 2.71 |
| 2 | 3CapLabor/CondEnra/RelCaMg/Poli/RiTizon | 15.4 | 2.34 | 12 | 3ReTmed/Poli | 5.9 | 0.89 |
| 3 | 3CapLabor/CondEnra/RelCaMg/Tizon | 5.8 | 0.88 | 13 | 3ReqPoli/Tizon | 61.0 | 9.29 |
| 4 | 3CapLabor/K/Tmax/Poli/Tizon | 0.1 | 0.02 | 14 | 3RiTizon | 14.6 | 2.22 |
| 5 | 3CapLabor/K/Poli/DegSue/Tizon | 0.3 | 0.05 | 15 | 4CapLabor/Altura/Tmin | 0.9 | 0.13 |
| 6 | 3CapLabor/K/Poli/Tizon | 0.6 | 0.09 | 16 | 4CapLabor/Tmin | 1.1 | 0.16 |
| 7 | 3CapLabor/Poli/Tizon | 0.2 | 0.02 | 17 | 4ReAltura/Tmax/Tmin | 201.8 | 30.71 |
| 8 | 3K/ReTmax/Poli/Tizon | 2.7 | 0.41 | 18 | 4ReAltura/Tmin | 7.8 | 1.19 |
| 9 | 3K/ReqPoli/Tizon | 2.8 | 0.43 | 19 | 4ReTmax/Tmin | 4.7 | 0.71 |
| 10 | 3ReTmax/Poli/Tizon | 4.5 | 0.69 | 20 | 4ReTmin | 297.1 | 45.22 |
| Total | | | | | | 657 | 100 |

Anexo 6. Subclases de aptitud final con el modelo CSIRO hacia el año 2050 bajo el escenario de emisiones A2

| N° | Subclases de aptitud | Área (km ²) | Área (%) | N° | Subclases de aptitud | Área (km ²) | Área (%) |
|-------|---|-------------------------|----------|----|-----------------------|-------------------------|----------|
| 1 | 3CapLabor/CondEnra/Tmed/RelCaMg/Poli | 6.4 | 0.97 | 12 | 3ReTmed/Poli/Tizon | 4.6 | 0.70 |
| 2 | 3CapLabor/CondEnra/Tmed/RelCaMg/Poli/DegSue/Tizon | 1.8 | 0.27 | 13 | 3ReTmed/DegSue/Tizon | 16.4 | 2.49 |
| 3 | 3CapLabor/CondEnra/ReTmed/RelCaMg/DegSue/Tizon | 12.0 | 1.82 | 14 | 3ReTmed/Tizon | 7.6 | 1.16 |
| 4 | 3CapLabor/CondEnra/RelCaMg/Poli/DegSue/Tizon | 20.7 | 3.16 | 15 | 3ReqPoli/DegSue/Tizon | 70.4 | 10.72 |
| 5 | 3CapLabor/CondEnra/RelCaMg/Poli/Tizon | 0.1 | 0.02 | 16 | 3ReqPoli/Tizon | 22.5 | 3.42 |
| 6 | 3CapLabor/K/Precip/Tmax/DegSue/Tizon | 0.2 | 0.03 | 17 | 4CapLabor/Altura/Tmin | 0.9 | 0.13 |
| 7 | 3CapLabor/K/Precip/DegSue/Tizon | 3.4 | 0.51 | 18 | 4CapLabor/Tmin | 1.1 | 0.16 |
| 8 | 3CapLabor/Poli/DegSue/Tizon | 0.2 | 0.02 | 19 | 4ReAltura/Tmax/Tmin | 7.9 | 1.20 |
| 9 | 3K/Precip/DegSue/Tizon | 11.6 | 1.77 | 20 | 4ReAltura/Tmin | 201.7 | 30.70 |
| 10 | 3ReTmed/Poli | 9.9 | 1.51 | 21 | 4ReTmin | 245.7 | 37.40 |
| 11 | 3ReTmed/Poli/DegSue/Tizon | 11.8 | 1.80 | | | | |
| Total | | | | | | 657 | 100 |

Anexo 7. Subclases de aptitud final con el modelo CSIRO hacia el año 2080 bajo el escenario de emisiones A2

| N° | Subclases de aptitud | Área (km ²) | Área (%) | N° | Subclases de aptitud | Área (km ²) | Área (%) |
|-------|---|-------------------------|----------|----|-----------------------|-------------------------|----------|
| 1 | 3CapLabor/CondEnra/Tmed/RelCaMg/Poli/DegSue/Tizon | 5.8 | 0.89 | 10 | 3ReTmed/Tizon | 2.2 | 0.33 |
| 2 | 3CapLabor/CondEnra/Tmed/RelCaMg/DegSue/Tizon | 6.1 | 0.93 | 11 | 3ReqPoli/DegSue/Tizon | 36.1 | 5.49 |
| 3 | 3CapLabor/CondEnra/RelCaMg/Poli/DegSue/Tizon | 7.3 | 1.11 | 12 | 3ReqPoli/Tizon | 24.0 | 3.65 |
| 4 | 3CapLabor/CondEnra/RelCaMg/Poli/Tizon | 7.8 | 1.19 | 13 | 4CapLabor/Altura/Tmin | 0.9 | 0.13 |
| 5 | 3CapLabor/Poli/DegSue/Tizon | 0.2 | 0.02 | 14 | 4CapLabor/Tmin | 1.1 | 0.16 |
| 6 | 3K/RePrecip/DegSue/Tizon | 0.4 | 0.06 | 15 | 4ReAltura/Tmax/Tmin | 174.0 | 26.48 |
| 7 | 3ReTmed/Poli/DegSue/Tizon | 8.3 | 1.27 | 16 | 4ReAltura/Tmin | 35.6 | 5.42 |
| 8 | 3ReTmed/Poli/Tizon | 5.9 | 0.90 | 17 | 4ReTmax/Tmin | 0.4 | 0.07 |
| 9 | 3ReTmed/DegSue/Tizon | 7.3 | 1.11 | 18 | 4ReTmin | 333.5 | 50.76 |
| Total | | | | | | 657 | 100 |

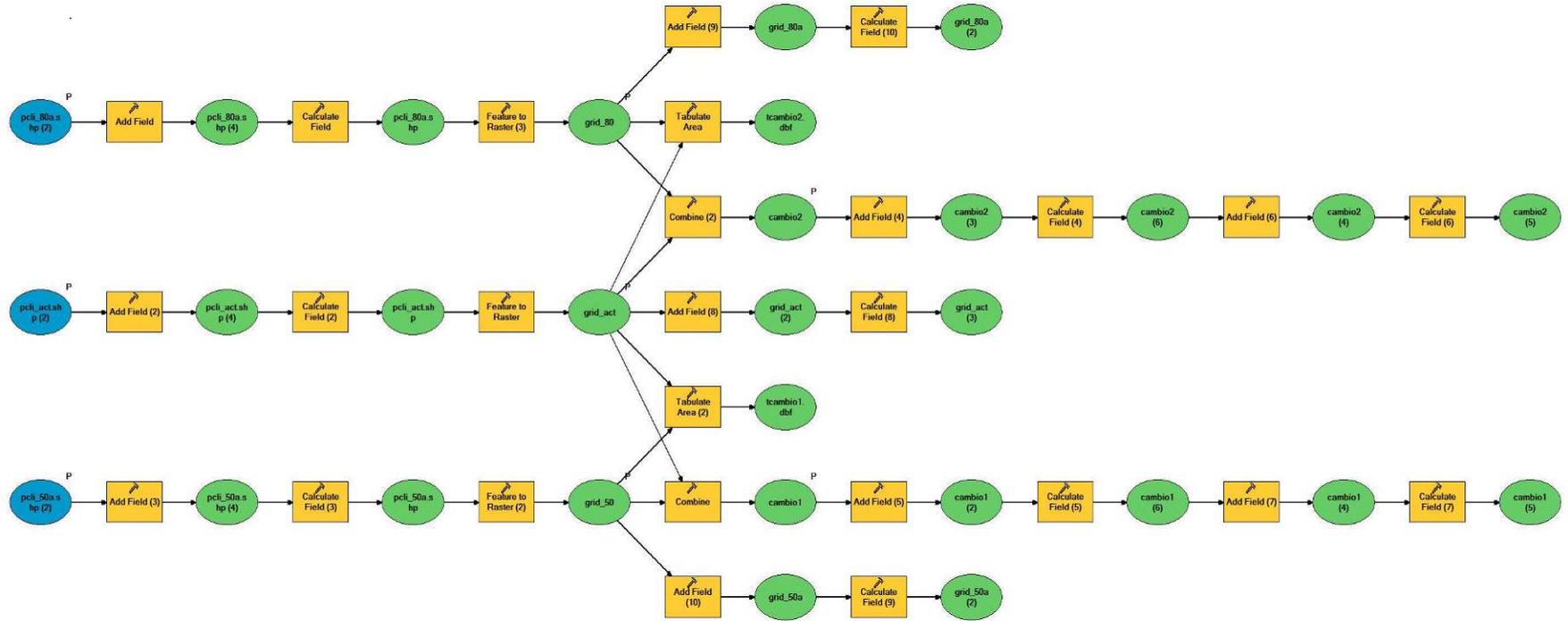
Anexo 8. Subclases de aptitud final con el modelo CSIRO hacia el año 2050 bajo el escenario de emisiones B2

| N° | Subclases de aptitud | Área (km ²) | Área (%) | N° | Subclases de aptitud | Área (km ²) | Área (%) |
|-------|---|-------------------------|----------|----|---------------------------|-------------------------|----------|
| 1 | 3CapLabor/CondEnra/Tmed/RelCaMg/Poli | 5.6 | 0.86 | 12 | 3ReTmed/Poli/DegSue/Tizon | 12.2 | 1.85 |
| 2 | 3CapLabor/CondEnra/Tmed/RelCaMg/Poli/DegSue/Tizon | 2.5 | 0.37 | 13 | 3ReTmed/Poli/Tizon | 0.3 | 0.05 |
| 3 | 3CapLabor/CondEnra/Tmed/RelCaMg/DegSue/Tizon | 12.1 | 1.84 | 14 | 3ReTmed/DegSue/Tizon | 16.5 | 2.52 |
| 4 | 3CapLabor/CondEnra/RelCaMg/Poli/DegSue/Tizon | 20.9 | 3.18 | 15 | 3ReTmed/RiTizon | 11.9 | 1.81 |
| 5 | 3CapLabor/K/Precip/Tmax/DegSue/Tizon | 0.6 | 0.09 | 16 | 3ReqPoli/DegSue/Tizon | 74.5 | 11.34 |
| 6 | 3CapLabor/K/Precip/DegSue/Tizon | 3.6 | 0.55 | 17 | 3ReqPoli/Tizon | 20.5 | 3.11 |
| 7 | 3CapLabor/Poli/RiDegSue/Tizon | 0.2 | 0.02 | 18 | 4CapLabor/Altura/Tmin | 0.9 | 0.13 |
| 8 | 3K/RePrecip/Tmax/DegSue/Tizon | 0.1 | 0.02 | 19 | 4CapLabor/Tmin | 1.1 | 0.16 |
| 9 | 3K/RePrecip/DegSue/Tizon | 17.8 | 2.70 | 20 | 4ReAltura/Tmax/Tmin | 7.9 | 1.20 |
| 10 | 3ReTmax/Poli/DegSue/Tizon | 0.1 | 0.02 | 21 | 4ReAltura/Tmin | 201.7 | 30.70 |
| 11 | 3ReTmed/Poli | 9.4 | 1.43 | 22 | 4ReTmin | 236.6 | 36.01 |
| Total | | | | | | 100 | 657 |

Anexo 9. Subclases de aptitud final con el modelo CSIRO hacia el año 2080 bajo el escenario de emisiones B2

| N° | Subclases de aptitud | Área (km ²) | Área (%) | N° | Subclases de aptitud | Área (km ²) | Área (%) |
|-------|---|-------------------------|----------|----|-----------------------|-------------------------|----------|
| 1 | 3CapLabor/CondEnra/Tmed/RelCaMg/Poli | 0.7 | 0.10 | 11 | 3ReTmed/Poli/Tizon | 9.6 | 1.46 |
| 2 | 3CapLabor/CondEnra/Tmed/RelCaMg/Poli/DegSue/Tizon | 5.1 | 0.77 | 12 | 3ReTmed/DegSue/Tizon | 11.2 | 1.71 |
| 3 | 3CapLabor/CondEnra/Tmed/RelCaMg/DegSue/Tizon | 9.3 | 1.42 | 13 | 3ReTmed/Tizon | 2.6 | 0.40 |
| 4 | 3CapLabor/CondEnra/RelCaMg/Poli/DegSue/Tizon | 13.0 | 1.98 | 14 | 3ReqPoli/DegSue/Tizon | 57.3 | 8.72 |
| 5 | 3CapLabor/CondEnra/RelCaMg/Poli/Tizon | 5.1 | 0.78 | 15 | 3ReqPoli/Tizon | 20.8 | 3.17 |
| 6 | 3CapLabor/K/RePrecip/DegSue/Tizon | 2.2 | 0.34 | 16 | 4CapLabor/Altura/Tmin | 0.9 | 0.13 |
| 7 | 3CapLabor/Poli/DegSue/Tizon | 0.2 | 0.02 | 17 | 4CapLabor/Tmin | 1.1 | 0.16 |
| 8 | 3K/RePrecip/DegSue/Tizon | 6.4 | 0.97 | 18 | 4ReAltura/Tmax/Tmin | 115.6 | 17.59 |
| 9 | 3ReTmed/Poli | 1.5 | 0.23 | 19 | 4ReAltura/Tmin | 94.0 | 14.31 |
| 10 | 3ReTmed/Poli/DegSue/Tizon | 10.8 | 1.65 | 20 | 4ReTmin | 289.5 | 44.06 |
| Total | | | | | | 657 | 100 |

Anexo 10. Modelo para generar los cambios entre clases de aptitud bajo escenarios de emisiones A2 y B2



Anexo 11. Expertos consultados en la evaluación de tierras en la cuenca alta del río Reventazón

| Nombre | Especialidad | Institución |
|--------------------------------|---|-----------------------|
| Dr. Oscar Gómez | Suelos | MAG |
| Dr. Alfredo Alvarado Ph.D | Suelos | UNA |
| Dr. José Arze Borda | Software ALES | CATIE |
| Dr. Diógenes Cubero | Suelos | INTA-MAG |
| Dra. Vera Sánchez Ph.D | Plagas | CATIE |
| Dr. Rodolfo Amador | Plagas-Producción Hortícola | Corp. Hortícola |
| MSc. Carlos Alfaro | Manejo-Gerente Programa Nacional Papa | MAG |
| MSc. Francisco Brenes | Manejo-Director Agencia Central Cartago | MAG |
| Ing. Rodolfo Méndez Chinchilla | SIG-Servicio Fitosanitario del Estado | MAG |
| Ing. Beatríz Molina Bermúdez | Plagas-Extensionista-ASA | MAG-Pacayas |
| Ing. Alberto Hernández | Manejo-Extensionista-ASA | MAG-Tierra Blanca |
| MSc. Iván Serrano Bulakar | Manejo-Extensionista-ASA | MAG-Llano Grande |
| MSc. Mireya Ugalde | Manejo-Extensionista-ALES | FAO-Costa Rica |
| Ing. Alexis Vargas | Suelos | INTA-MAG |
| MSc. Alvaro Coto | Fitopatología | MAG-Cartago |
| Ing. Jeanet Avilés | Manejo y Mejoramiento genético papas | MAG |
| MSc. Sergio Velásquez M. | SIG y Software ALES | CATIE |
| MSc. Renato Jiménez Zuñiga | Suelos-Director servicios técnicos del INTA | INTA-MAG |
| MSc. Wilfredo Chávez Huamán | SIG | Gobierno de Cusco |
| Dra. Yaneth Gómez Bonillo | Plagas | INTA-MAG |
| Ing. Fabián Segura | Manejo,Plagas-Presidente cámara de paperos | Empresario de Pacayas |
| Ing. Julieta Guzmán | Manejo Integrado de Plagas | INTA-MAG |
| Eco. Rolando Tensio | Avíos | MAG-Cartago |
| MSc. Luís Vargas Cartagena | Plagas | INTA-MAG |
| Tec. Mayno Alfaro | SIG | IMN-Costa Rica |
| Ing. Gustavo Calvo Domingo | Manejo Cuenca Reventazón | ICE-Costa Rica |
| Ing. Luís Zamora Gonzáles | Suelos | ProDUS-UCR |
| Dr. Arturo Brenes Angulo | Plagas | CIA-UCR |
| Sr. Rosario Brenes Angulo | Productor de papa | Tierra Blanca |
| Sr. Bernardo Brenes Gómez | Productor de papa | Tierra Blanca |
| Sr. Rigoberto Serrano | Productor de Papa | Pacayas |
| Marcolibio Durán | Productor de Papa | Pacayas |
| Ing Carlos Chuquillanqui | Manejo | CIP-Perú |
| MSc. Heydi Gamarra | Plagas | CIP-Perú |

Anexo 12. Ficha validada de recolección de la información de los RUT y CAT aplicado a expertos para el cultivo de la papa.



Ficha final para determinar los Requerimientos (RUT) y las Características (CAT) del cultivo de la papa en la cuenca alta del río Reventazón

Nombre:.....Especialidad.....Experiencia.(años).....

Institución y/o comunidad donde labora.....Fecha.....

| Cualidades de la tierra (RUT) | Característica de la tierra (CAT) | Unidades (CAT) | Niveles de Severidad | | | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|----------------|----------------------|---|---|---|---|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Humedad disponible | Drenaje | Clase | | | | | |
| | Textura | Clase | | | | | |
| Disponibilidad de nutrientes | CIC | meq/100gr | | | | | |
| | pH | % | | | | | |
| | MO | % | | | | | |
| Condición de enraizamiento | Profundidad del suelo | cm | | | | | |
| | Pedregosidad | % | | | | | |
| Capacidad de laboreo | Pendiente | % | | | | | |
| | Pedregosidad | % | | | | | |
| Requerimiento de Potasio | K | Meq/100gr | | | | | |
| Relación Magnesio -Calcio | RelCaMg | Meq/100gr | | | | | |
| Req. Temperatura Máxima | Temperatura Máxima | °C | | | | | |
| Req. Temperatura Media | Temperatura Media | °C | | | | | |
| Req. Temperatura Mínima | Temperatura Mínima | °C | | | | | |
| Requerimiento de Elevación | Elevación | msnm | | | | | |
| Precipitación del ciclo | Precipitación | mm | | | | | |

Anexo 13. Avío costo de producción de papa por hectárea (semilla Floresta de buena calidad) en condiciones actuales en la cuenca alta del río Reventazón, MAG-2010

| Rubro | Unidad | Cantidad | Costo Unitario | Costo Total Colones | Costo Total Dólares | Porcentaje % |
|---------------------------------|-------------------|---------------|----------------|--------------------------|---------------------|---------------|
| A. Labores contratadas | | | | | | |
| Preparación terreno: | | | | | | |
| Arada | Hs | 4.5 | 13000 | 58.500 | 110.0 | 1.00 |
| Rotada | Hs | 4.5 | 13000 | 58.500 | 110.0 | 1.00 |
| Zurc. Y tapada con animal | Día/animal | 3 | 25000 | 75.000 | 141.0 | 1.29 |
| Cosecha | TM | 25 | 13043 | 330.423 | 621.0 | 5.67 |
| SUBTOTAL A | | | | 522.423 | 982.0 | 8.97 |
| B. Labores ordinarias | | | | | | |
| Quema | Jls | 1 | 60000 | 6.000 | 11.3 | 0.10 |
| Desinfección de semilla | Jls | 1 | 60000 | 6.000 | 11.3 | 0.10 |
| Clasificación de semilla | Jls | 1 | 60000 | 6.000 | 11.3 | 0.10 |
| Riega semilla | Jls | 6 | 60000 | 36.000 | 67.7 | 0.62 |
| Tapada con azada | Jls | 8 | 60000 | 48.000 | 90.2 | 0.82 |
| Fertilización | Jls | 16 | 60000 | 96.000 | 180.5 | 1.65 |
| Aporca | Jls | 10 | 60000 | 60.000 | 112.8 | 1.03 |
| Atomización | Jls | 45 | 60000 | 270.000 | 507.5 | 4.63 |
| Acarreo interno | Jls | 2 | 60000 | 12.000 | 22.6 | 0.21 |
| Subtotal | | 90 | 60000 | 540.000 | 1015.0 | 9.27 |
| CCSS | 2 peones | | | 84.000 | 243.6 | 2.2 |
| SUBTOTAL B | | | | 624.000 | 1258.6 | 11.5 |
| C. Materiales | | | | | | |
| Semilla Floresta de calidad | Kg | 2.5 | 1.087 | 2717.391 | 5107.9 | 46.65 |
| Abono 10-30-10 | Kg | 1590 | 422 | 671.333 | 1261.9 | 11.52 |
| Fertilización 15-3-31 | Kg | 1.13 | 486 | 549.054 | 1032.1 | 9.42 |
| Nutran | Kg | 138 | 63 | 8.625 | 16.2 | 0.15 |
| Antracol | Kg | 15 | 6.5 | 97.500 | 183.3 | 1.67 |
| Daconil | Lt | 9 | 6.475 | 58.275 | 109.5 | 1.00 |
| Manzate | Kg | 20 | 4.801 | 96.022 | 180.5 | 1.65 |
| Hidrocop | Kg | 9 | 16.100 | 144.900 | 272.4 | 2.49 |
| Metalosato Calcio | Lt | 4 | 8.076 | 32.304 | 60.7 | 0.55 |
| Nitrato Potasio | Kg | 1 | 513 | 513 | 1.0 | 0.01 |
| Fetrilon Combi 1 | Kg | 1.4 | 5.169 | 7.237 | 13.6 | 0.12 |
| Clorpirifos | 15 Kg | 2 | 16.000 | 32.000 | 60.2 | 0.55 |
| Padan | Kg | 8 | 15.160 | 121.280 | 228.0 | 2.08 |
| Evisect | Kg | 0.4 | 34.550 | 13.820 | 26.0 | 0.24 |
| Decis | Lt | 0.7 | 25.820 | 18.074 | 34.0 | 0.31 |
| Sufacid (aditivo) | Lt | 1 | 5.925 | 5.925 | 11.1 | 0.10 |
| Multiminerales | Lt | 2 | 9.035 | 18.070 | 34.0 | 0.31 |
| Radex | Lt | 7 | 2.620 | 18.340 | 34.5 | 0.31 |
| Metalosato Zinc | Lt | 1 | 18.450 | 18.450 | 34.7 | 0.32 |
| SUBTOTAL C | | | | 4.629.113 | 8.701 | 79.46 |
| Combustible transporte | | | | 50.000 | | |
| TOTAL COSTO | | | | 5.825.536 | 10.942 | 100 |
| | Zona alta: | 33.000 | kg/ha | Costo/kg | ₡ 177 | por kg |
| | Zonamedia: | 25.000 | kg/ha | Costo/kg | ₡ 233 | por kg |
| | Zona baja: | 18.000 | kg/ha | Costo/kg | ₡ 324 | por kg |
| | Promedio: | 25.333 | | Costo/kg promedio | ₡ 244 | |
| Precio finca a mayo 2010 | | | | | 391 | col/kg |

Anexo 14. Lista de insumos para condiciones actuales y futuras en la cuenca alta del río Reventazón

| Código del insumo | Nombre del insumo | Unidad | Costo Unitario ¢ |
|-------------------|--|------------|------------------|
| Abo | Abono 10-30-10 | Kg | 422.00 |
| Acrr | Acarreo interno | Jornal | 6,000.00 |
| Antr | ** Antracol | Kg | 6,500.00 |
| Apo | Aporca | Hora | 6,000.00 |
| Ard | Arada | Jornal | 13,000.00 |
| Aplica | Aplicaciones | Jornal | 6,000.00 |
| CCSS | Aporte a la CCSS | Peón | 42,000.00 |
| ClaSem | Clasificación de semilla | Jornal | 6,000.00 |
| ClorPir | ** Clorpirifos | Kg | 16,000.00 |
| Cscha | Cosecha | TM | 1.00 |
| Daco | ** Daconil | Litros | 6,475.00 |
| DeSem | Desinfección de semilla | Jornal | 6,000.00 |
| Dec | ** Decis | Litro | 25,820.00 |
| Esta_BV | * Establecimiento de Barreras Vivas | Obra/ha | 10,200.00 |
| Esta_GI | * Establecimiento de Gavetas de Infiltración | Obra/ha | 12,000.00 |
| Esta_SC | * Establecimiento de Siembra en Contorno | Obra/ha | 9,000.00 |
| Evis | ** Eviset | Kg | 34,550.00 |
| Fert | Fertilización | Jornal | 6,000.00 |
| Fert15 | Fertilización 15-3-31 | Kg | 486.00 |
| Fetri | Fetrilon Combi 1 | Kg | 5,169.00 |
| Hidr | ** Hidrocop | Kg | 16,100.00 |
| Mant_BV | * Mantenimiento de Barreras Vivas | Obra/ha | 12,000.00 |
| Mant_GI | * Mantenimiento de Gavetas de Infiltración | Obra/ha | 72,000.00 |
| Mant_SC | * Mantinimiento de Siembra en Contorno | Obra/ha | 9,000.00 |
| Manz | ** Manzate | Kg | 4,801.00 |
| MetCal | ** Metalosato Calcio | Litro | 8,076.00 |
| Met Zn | ** Metalosato de Zinc | Litro | 18,450.00 |
| MulMin | Multiminerales | Litro | 9,035.00 |
| NitPot | Nitrato de Potasio | Kg | 513.00 |
| Nutr | Nutran | Kg | 63.00 |
| Padn | ** Padan | Kg | 15,160.00 |
| Qma | Quema | Jornal | 6,000.00 |
| Radx | ** Radex | Litro | 2,620.00 |
| RieSem | Riega de Semilla | Jornal | 6,000.00 |
| Rtd | Rotada | Horas | 13,000.00 |
| Sem | Semilla de calidad (Floresta) | Kg | 1,087.00 |
| Surf | ** Sufacid | Litro | 5,925.00 |
| TapAza | Tapada con Azada | Jornal | 6,000.00 |
| Trans | Transporte | T | 1.00 |
| ZurTap | Zurqueado y Tapado con animal | Día animal | 25,000.00 |

* Insumos adicionales de conservación de suelos.

** Insumos adicionales de agrotóxicos.

Anexo 15. Costo de producción de papa con insumos adicionales para la UC 1000 bajo el escenario de emisiones A2 hacia el año 2050 modelo HadCM3

| ALEX | | PsAc2011 <Papa secano condiciones 2011> Margen Bruto - Costo [C/ha-año] | |
|------------------|---|---|--|
| Papa Secano 2010 | | ¿Por qué? | |
| UC-100 | UC: UC-1000 <UC-1000.U1e.Iraz-> <18.97 ha> | | |
| UC-1000 | TUT: Papa Secano 2010 <Papa en Secano condiciones 2011> | | |
| UC-1001 | costo A1 <TUT> [C/ha-año] | 5,320,162.85 | |
| UC-1002 | costo adicional <UC,TUT> [C/ha-año] | 654,528.80 | |
| UC-1004 | costo dependiente de la producción [C/ha-año] | 52.13 | |
| UC-1004 | Costo [C/ha-año] | 5,974,743.78 | |
| UC-1005 | | | |
| UC-1006 | | | |
| UC-1007 | | | |
| UC-1008 | | | |
| UC-1009 | | | |

| ALEX | | PsAc2011 <Papa secano condiciones 2011> Margen Bruto - Costo [C/ha-año] | |
|------------------|---|---|--|
| Papa Secano 2010 | | ¿Por qué? | |
| UC-100 | TUT: Papa Secano 2010 <Papa en Secano condiciones 2011> | ...<más>... ↑ | |
| UC-1000 | Costos adicionales para [C/ha-año] : | | |
| UC-1001 | CapLabor <Capacidad de Laboreo> | 0.00 | |
| UC-1001 | CondEnra <Condición de Enraizamiento> | 0.00 | |
| UC-1001 | DispNut <Disponibilidad de Nutrientes> | 0.00 | |
| UC-1002 | HumDisp <Humedad disponible> | 0.00 | |
| UC-1002 | K <Requerimientos de potasio> | 0.00 | |
| UC-1004 | ReAltura <Requerimiento de elevación> | 0.00 | |
| UC-1004 | RePrecip <Requerimiento de precipitación> | 0.00 | |
| UC-1005 | ReTmax <Requerimiento de temp. máxima> | 0.00 | |
| UC-1005 | ReTmed <Requerimiento de temp. media> | 0.00 | |
| UC-1006 | ReTmin <Requerimiento de temp. mínima> | 0.00 | |
| UC-1006 | RelCaMg <Relación Calcio/Magnesio> | 0.00 | |
| UC-1007 | ReqPoli <Requerimientos Polilla Guatemalteca> | 0.00 | |
| UC-1008 | RiDegSue <Riesgo de Degradación del Suelo> | 106,200.00 | |
| UC-1008 | RiTizon <Requerimientos Tizón Tardío> | 548,328.80 | |
| UC-1009 | | 654,528.80 | |

| ALEX | | PsAc2011 <Papa secano condiciones 2011> Margen Bruto - Costo [C/ha-año] | |
|------------------|--|---|--------|
| Papa Secano 2010 | | ¿Por qué? | |
| UC-100 | ↑ | ...<más>... ↑ | |
| UC-1000 | RieSem <Riega de Semilla> | 6 Jornal | e C6, |
| UC-1000 | ...000.00 -> | C36,000.00 | |
| UC-1001 | Rtd <Rotada> | 4.5 horas | e C13, |
| UC-1001 | ...000.00 -> | C58,500.00 | |
| UC-1002 | Sem <Semilla de calidad> | 2500 Kg | e C1, |
| UC-1002 | ...087.00 -> | C2,717,500.00 | |
| UC-1004 | Surf <Surfacid> | 1 Litro | e C5, |
| UC-1004 | ...925.00 -> | C5,925.00 | |
| UC-1005 | TapAza <Tapada con Azada> | 8 Jornal | e C6, |
| UC-1005 | ...000.00 -> | C48,000.00 | |
| UC-1006 | Trans <Transporte> | 25 T | e |
| UC-1006 | ... C1.00 -> | C25.00 | |
| UC-1007 | ZurTap <Zurqueado y Tapado con animales> | 3 Día animal | e C25, |
| UC-1007 | ...000.00 -> | C75,000.00 | |
| UC-1008 | ... | | |
| UC-1009 | Costo anual \$1 [C/ha-año] | C5,320,162.85 | |

Anexo 16. Árboles de decisión utilizados en la evaluación de tierras en la cuenca del río Reventazón

Evaluación de Tierras cuenca del río Reventazón, Costa Rica

PsAc2011 (Papa seco condiciones 2011)

Arboles de decisión

N° Tipo Fecha: 16 de junio de 2011

1 Nivel de la cualidad ReTmed

> Tmed (Temperatura media del ciclo)

B (Baja) [0-8 Grados cen: 4

Mb (Mod. Baja) [8-16 Gra: 3

O (Optima) [16-20 Grados: 1

Mo (Mod. Optima) [20-22: 2

Alt (Alta) [22-40 Grados: 3

2 Nivel de la cualidad HumDisp

> Drenaje (Drenaje del Suelo)

Le (Lento) > Textura (Textura del suelo para el cultivo de papa)

Gr (Gruesa).....: 4

Fi (Fina).....: 4

Me (Media).....: 4

?.....: ?

Mo (Moderado) > Textura (Textura del suelo para el cultivo de papa)

Gr (Gruesa).....: 3

Fi (Fina).....: 2

Me (Media).....: 1

?.....: ?

B (Bueno) > Textura (Textura del suelo para el cultivo de papa)

Gr (Gruesa).....: 2

Fi (Fina).....: 1

Me (Media).....: 1

?.....: ?

Me (Mod. Excesivo) > Textura (Textura del suelo para el cultivo de papa)

Gr (Gruesa).....: 3

Fi (Fina).....: 2

Me (Media).....: 1

?.....: ?

Exc (Excesivo) > Textura (Textura del suelo para el cultivo de papa)

Gr (Gruesa).....: 3

Fi (Fina).....: 2

Me (Media).....: 2

4 Nivel de la cualidad ReTmin

> Tmin (Temperatura mínima del ciclo)

Na (No Apto) [0-2 Grados: 4

Mc (Muy Crítico) [2-4 Gr: 3

C (Crítico) [4-6 Grados: 3

Moc (Mode. Crítico) [6-8: 2

A (Apto) [8-15 Grados ce: 1

Nap (No apto) [15-50 Gra: 4

5 Nivel de la cualidad ReTmax

> Tmax (Temperatura máxima del ciclo)

A (Apto) [10-22 Grados c: 1 (Apto)

MoA (Mode. Apto) [22-25: 2 (Mod. Apto)

C (Crítico) [25-27 Grado: 3 (Marg. Apto)

MoC (Mode. Crítico) [27- : 3 (Marg. Apto)

Na (No Apto) [30-40 Grad: 4 (No Apto)

6 Nivel de la cualidad ReAltura

> Altitud (Altura sobre el nivel del mar)

Mb (Muy bajo) [0-1000 me: 4

B (Bajo) [1000-1200 metr: 3

O (Optimo) [1200-2800 me: 1

Mo (Mod. Optimo) [2800-3: 2

Ma (Muy Alto) [3400-6000: 4

7 Nivel de la cualidad RePrecip

> Prec (Precipitación durante el ciclo)

Mb (Muy bajo) [0-200 mm]: 4 (No Apto)

B (Bajo) [200-400 mm]...: 3 (Marg. Apto)

O (Optimo) [400-1000 mm] : 1 (Apto)

A (Alto) [1000-1500 mm]. : 2 (Mod. Apto)

Exc (Excesivo) [1500-7000: 3 (Marg. Apto)

8 Nivel de la cualidad K

> K (Potasio)

Mb (Muy bajo) [0-.12 meq: 3

B (Bajo) [.12-.23 meq]...: 2

O (Optimo) [.23-.33 meq]: 1

Alt (Alto) [.33-.38 meq]: =3

Ma (Muy alto) [.38-5 meq: =3

11 Nivel de la cualidad CondEnra

> ProfSuel (Profundidad del Suelo)

Sup (Superficial) [0-10: 4 (No Apto)

MoSup (Mod. Superficial) [10-40 cm] > Pdre (Pedregosidad)

Sped (Sin pedregosidad): 2 (Mod. Apto)

Pped (Poco pedregoso) [5: =1

Ped (Pedregoso) [15-25 %: 3 (Marg. Apto)

Muped (Muy pedregoso) [2: 3 (Marg. Apto)

Exped (Excesivamente ped: 4 (No Apto)

?.....: ?

MoProf (Mod. Profundo) [40-90 cm] > Pdre (Pedregosidad)

Sped (Sin pedregosidad): 1 (Apto)

Pped (Poco pedregoso) [5: =1

Ped (Pedregoso) [15-25 %: 2 (Mod. Apto)

Muped (Muy pedregoso) [2: 3 (Marg. Apto)

Exped (Excesivamente ped: =4

?.....: ?

Prof (Profundo) [90-120 cm] > Pdre (Pedregosidad)

Sped (Sin pedregosidad): 1 (Apto)

Pped (Poco pedregoso) [5: =1

Ped (Pedregoso) [15-25 %: 2 (Mod. Apto)

Muped (Muy pedregoso) [2: 3 (Marg. Apto)

Exped (Excesivamente ped: =4

?.....: ?

MProf (Muy Profundo) [120-600 cm] > Pdre (Pedregosidad)

Sped (Sin pedregosidad): 1 (Apto)

Pped (Poco pedregoso) [5: =1

Ped (Pedregoso) [15-25 %: 2 (Mod. Apto)

Muped (Muy pedregoso) [2: 3 (Marg. Apto)

Exped (Excesivamente ped: =4

12 Nivel de la cualidad CapLabor

> Pend (Pendiente)
 PI (Plano) [0-8 %] > Pdre (Pedregosidad)
 Sped (Sin pedregosidad): 1
 Pped (Poco pedregoso) [5: =1
 Ped (Pedregoso) [15-25 %: 2
 Muped (Muy pedregoso) [2: 3
 Exped (Excesivamente ped: 3
 ?..... : ?
 LOn (Ligeramente Ondulado) [8-15 %] > Pdre (Pedregosidad)
 Sped (Sin pedregosidad): 1
 Pped (Poco pedregoso) [5: 2
 Ped (Pedregoso) [15-25 %: 2
 Muped (Muy pedregoso) [2: 3
 Exped (Excesivamente ped: 3
 ?..... : ?
 MOnD (Mode. Ondulado) [15-30 %] > Pdre (Pedregosidad)
 Sped (Sin pedregosidad): 2
 Pped (Poco pedregoso) [5: 2
 Ped (Pedregoso) [15-25 %: 3
 Muped (Muy pedregoso) [2: 3
 Exped (Excesivamente ped: 4
 ?..... : ?
 FOnd (Fuertemente Ondulado) [30-60 %] > Pdre (Pedregosidad)
 Sped (Sin pedregosidad): 2
 Pped (Poco pedregoso) [5: 3
 Ped (Pedregoso) [15-25 %: 3
 Muped (Muy pedregoso) [2: 3
 Exped (Excesivamente ped: 4
 ?..... : ?
 Es (Escarpado) [60-300 %] > Pdre (Pedregosidad)
 Sped (Sin pedregosidad): 3
 Pped (Poco pedregoso) [5: 3
 Ped (Pedregoso) [15-25 %: 3
 Muped (Muy pedregoso) [2: 4
 Exped (Excesivamente ped: 4

13 Nivel de la cualidad DispNut

> CIC (Capacidad de Intercambio Catiònico)
 Ba (Bajo) [0-5 meq] > pH (Potencial de Hidrógeno del Suelo)
 Ba (Bajo) [0-5.5 unidades] > MaOrg (Contenido de Materia Orgánica del Suelo)
 Ba (Baja) [0-3 %].....: 3
 Me (Media) [3-10 %]..... : =1
 Alt (Alta) [10-50 %].....: =1
 ?..... : ?
 Me (Medio) [5.5-6.5 unid: =1
 Alt (Alto) [6.5-8 unid: =1
 ?..... : ?
 Me (Medio) [5-20 meq] > pH (Potencial de Hidrógeno del Suelo)
 Ba (Bajo) [0-5.5 unidades] > MaOrg (Contenido de Materia Orgánica del Suelo)
 Ba (Baja) [0-3 %].....: 3
 Me (Media) [3-10 %]..... : =1
 Alt (Alta) [10-50 %].....: =1
 ?..... : ?
 Me (Medio) [5.5-6.5 unidades] > MaOrg (Contenido de Materia Orgánica del Suelo)
 Ba (Baja) [0-3 %].....: 2
 Me (Media) [3-10 %]..... : 1
 Alt (Alta) [10-50 %].....: =2
 ?..... : ?

Alt (Alto) [6.5-8 unidades] > MaOrg (Contenido de Materia Orgánica del Suelo)
 Ba (Baja) [0-3 %].....: 3
 Me (Media) [3-10 %]..... : =1
 Alt (Alta) [10-50 %].....: =1
 ?..... : ?
 Alt (Alto) [20-100 meq] > pH (Potencial de Hidrógeno del Suelo)
 Ba (Bajo) [0-5.5 unidades] > MaOrg (Contenido de Materia Orgánica del Suelo)
 Ba (Baja) [0-3 %].....: 3
 Me (Media) [3-10 %]..... : 2
 Alt (Alta) [10-50 %].....: =2
 ?..... : ?
 Me (Medio) [5.5-6.5 unidades] > MaOrg (Contenido de Materia Orgánica del Suelo)
 Ba (Baja) [0-3 %].....: 2
 Me (Media) [3-10 %]..... : 1
 Alt (Alta) [10-50 %].....: =2
 ?..... : ?
 Alt (Alto) [6.5-8 unidades] > MaOrg (Contenido de Materia Orgánica del Suelo)
 Ba (Baja) [0-3 %].....: 3
 Me (Media) [3-10 %]..... : 2
 Alt (Alta) [10-50 %].....: =2

14 Nivel de la cualidad RiDegSue

> Prec_e (Precipitación riesgo erosión)
 Ba (Baja) [0-300 mm] > Pend (Pendiente)
 PI (Plano) [0-8 %] > Textura_re (Textura para el riesgo de erosión)
 Gr (Gruesa).....: 1 (Apto)
 Me (Media)..... : =1
 Fi (Fina).....: =1
 ?..... : ?
 LOn (Ligeramente Ondulado) [8-15 %] > Textura_re (Textura para el riesgo de erosión)
 Gr (Gruesa).....: 1 (Apto)
 Me (Media)..... : =1
 Fi (Fina).....: =1
 ?..... : ?
 MOnD (Mode. Ondulado) [15-30 %] > Textura_re (Textura para el riesgo de erosión)
 Gr (Gruesa).....: 2 (Mod. Apto)
 Me (Media)..... : 1 (Apto)
 Fi (Fina).....: =2
 ?..... : ?
 FOnd (Fuertemente Ondulado) [30-60 %] > Textura_re (Textura para el riesgo de erosión)
 Gr (Gruesa).....: 2 (Mod. Apto)
 Me (Media).....: =1
 Fi (Fina).....: =1
 ?..... : ?
 Es (Escarpado) [60-300 %] > Textura_re (Textura para el riesgo de erosión)
 Gr (Gruesa).....: 2 (Mod. Apto)
 Me (Media).....: =1
 Fi (Fina).....: =1
 ?..... : ?
 Me (Media) [300-800 mm] > Pend (Pendiente)
 PI (Plano) [0-8 %] > Textura_re (Textura para el riesgo de erosión)
 Gr (Gruesa).....: 1 (Apto)
 Me (Media)..... : =1
 Fi (Fina).....: =1
 ?..... : ?

LOn (Ligeramente Ondulado) [8-15 %] > Textura_re
(Textura para el riesgo de erosión)
Gr (Gruesa).....: 3 (Marg. Apto)
Me (Media).....: 2 (Mod. Apto)
Fi (Fina).....: =2
?.....: ?

MOnd (Mode. Ondulado) [15-30 %] > Textura_re
(Textura para el riesgo de erosión)
Gr (Gruesa).....: 3 (Marg. Apto)
Me (Media).....: 2 (Mod. Apto)
Fi (Fina).....: =2
?.....: ?

FOnd (Fuertemente Ondulado) [30-60 %] >
Textura_re (Textura para el riesgo de erosión)
Gr (Gruesa).....: 3 (Marg. Apto)
Me (Media).....: =1
Fi (Fina).....: 2 (Mod. Apto)
?.....: ?

Es (Escarpado) [60-300 %] > Textura_re (Textura
para el riesgo de erosión)
Gr (Gruesa).....: 3 (Marg. Apto)
Me (Media).....: 3 (Marg. Apto)
Fi (Fina).....: =2
?.....: ?

Alt (Alta) [800-8000 mm] > Pend (Pendiente)
Pl (Plano) [0-8 %] > Textura_re (Textura para el
riesgo de erosión)
Gr (Gruesa).....: 1 (Apto)
Me (Media).....: =1
Fi (Fina).....: =1
?.....: ?

LOn (Ligeramente Ondulado) [8-15 %] > Textura_re
(Textura para el riesgo de erosión)
Gr (Gruesa).....: 3 (Marg. Apto)
Me (Media).....: =1
Fi (Fina).....: 2 (Mod. Apto)
?.....: ?

MOnd (Mode. Ondulado) [15-30 %] > Textura_re
(Textura para el riesgo de erosión)
Gr (Gruesa).....: 3 (Marg. Apto)
Me (Media).....: =1
Fi (Fina).....: =1
?.....: ?

FOnd (Fuertemente Ondulado) [30-60 %] >
Textura_re (Textura para el riesgo de erosión)
Gr (Gruesa).....: 3 (Marg. Apto)
Me (Media).....: =1
Fi (Fina).....: 3 (Marg. Apto)
?.....: ?

Es (Escarpado) [60-300 %] > Textura_re (Textura
para el riesgo de erosión)
Gr (Gruesa).....: 3 (Marg. Apto)
Me (Media).....: =1
Fi (Fina).....: 3 (Marg. Apto)

15 Nivel de la cualidad RiTizon

> Temp_pl (Temperatura Tizón)
Ba (Baja) [0-16 Grados centígrados] > Prec_pl
(Precipitación Tizón)
B (Baja) [0-400 mm].....: 1
M (Media) [400-1000 mm]. : 2
A (Alta) [1000-7000 mm]. : 3
?.....: ?

Me (Media) [16-26 Grados centígrados] > Prec_pl
(Precipitación Tizón)
B (Baja) [0-400 mm].....: 2
M (Media) [400-1000 mm]. : 3

A (Alta) [1000-7000 mm]. : 3
?.....: ?

Alt (Alta) [26-40 Grados centígrados] > Prec_pl
(Precipitación Tizón)
B (Baja) [0-400 mm].....: 1
M (Media) [400-1000 mm]. : 2
A (Alta) [1000-7000 mm]. : 3

16 Nivel de la cualidad ReqPoli

> Temp_ins (Temperatura polilla)
B (Baja) [0-15 Grados centígrados] > Altura_ins
(Altura polilla)
B (Baja) [0-1000 metros] > Prec_ins (Precipitación
polilla)
B1 (Baja 1) [0-500 mm]...: 1
Me1 (Media 1) [500-700 m: 1
Alt (Alta) [700-1200 mm]: 2
Me2 (Media 2) [1200-1400: 1
B2 (Baja2) [1400-6000 mm: 1
?.....: ?

MeB (Media Baja) [1000-2500 metros] > Prec_ins
(Precipitación polilla)
B1 (Baja 1) [0-500 mm]: 2
Me1 (Media 1) [500-700 m: 2
Alt (Alta) [700-1200 mm]: 3
Me2 (Media 2) [1200-1400: 2
B2 (Baja2) [1400-6000 mm: 2
?.....: ?

MeA (Media Alta) [2500-2800 metros] > Prec_ins
(Precipitación polilla)
B1 (Baja 1) [0-500 mm]...: 1
Me1 (Media 1) [500-700 m: 2
Alt (Alta) [700-1200 mm]: 2
Me2 (Media 2) [1200-1400: 2
B2 (Baja2) [1400-6000 mm: 1
?.....: ?

Alt (Alta) [2800-7000 metros] > Prec_ins
(Precipitación polilla)
B1 (Baja 1) [0-500 mm]...: 1
Me1 (Media 1) [500-700 m: 1
Alt (Alta) [700-1200 mm]: 2
Me2 (Media 2) [1200-1400: 1
B2 (Baja2) [1400-6000 mm: 1
?.....: ?

MeB (Media Baja) [15-20 Grados centígrados] >
Altura_ins (Altura polilla)
B (Baja) [0-1000 metros] > Prec_ins (Precipitación
polilla)
B1 (Baja 1) [0-500 mm]...: 1
Me1 (Media 1) [500-700 m: 2
Alt (Alta) [700-1200 mm]: 2
Me2 (Media 2) [1200-1400: 2
B2 (Baja2) [1400-6000 mm: 1
?.....: ?

MeB (Media Baja) [1000-2500 metros] > Prec_ins
(Precipitación polilla)
B1 (Baja 1) [0-500 mm]...: 2
Me1 (Media 1) [500-700 m: 3
Alt (Alta) [700-1200 mm]: 3
Me2 (Media 2) [1200-1400: 3
B2 (Baja2) [1400-6000 mm: 2
?.....: ?

MeA (Media Alta) [2500-2800 metros] > Prec_ins
(Precipitación polilla)
B1 (Baja 1) [0-500 mm]...: 2
Me1 (Media 1) [500-700 m: 2
Alt (Alta) [700-1200 mm]: 3

Me2 (Media 2) [1200-1400: 2
 B2 (Baja2) [1400-6000 mm: 1
 ?..... : ?
 Alt (Alta) [2800-7000 metros] > Prec_ins
 (Precipitación polilla)
 B1 (Baja 1) [0-500 mm]...: 1
 Me1 (Media 1) [500-700 m: 2
 Alt (Alta) [700-1200 mm]: 3
 Me2 (Media 2) [1200-1400: 2
 B2 (Baja2) [1400-6000 mm: 2
 ?..... : ?
 MeA (Media Alta) [20-25 Grados centígrados] >
 Altura_ins (Altura polilla)
 B (Baja) [0-1000 metros] > Prec_ins (Precipitación
 polilla)
 B1 (Baja 1) [0-500 mm]...: 2
 Me1 (Media 1) [500-700 m: 2
 Alt (Alta) [700-1200 mm]: 3
 Me2 (Media 2) [1200-1400: 2
 B2 (Baja2) [1400-6000 mm: 2
 ?..... : ?
 MeB (Media Baja) [1000-2500 metros] > Prec_ins
 (Precipitación polilla)
 B1 (Baja 1) [0-500 mm]...: 3
 Me1 (Media 1) [500-700 m: 3
 Alt (Alta) [700-1200 mm]: 3
 Me2 (Media 2) [1200-1400: 3
 B2 (Baja2) [1400-6000 mm: 3
 ?..... : ?
 MeA (Media Alta) [2500-2800 metros] > Prec_ins
 (Precipitación polilla)
 B1 (Baja 1) [0-500 mm]...: 2
 Me1 (Media 1) [500-700 m: 3
 Alt (Alta) [700-1200 mm]: 3
 Me2 (Media 2) [1200-1400: 3
 B2 (Baja2) [1400-6000 mm: 2
 ?..... : ?
 Alt (Alta) [2800-7000 metros] > Prec_ins
 (Precipitación polilla)
 B1 (Baja 1) [0-500 mm]...: 2
 Me1 (Media 1) [500-700 m: 2
 Alt (Alta) [700-1200 mm]: 3
 Me2 (Media 2) [1200-1400: 2
 B2 (Baja2) [1400-6000 mm: 2
 ?..... : ?
 Alt (Alta) [25-40 Grados centígrados] > Altura_ins
 (Altura polilla)
 B (Baja) [0-1000 metros] > Prec_ins (Precipitación
 polilla)
 B1 (Baja 1) [0-500 mm]...: 1
 Me1 (Media 1) [500-700 m: 1
 Alt (Alta) [700-1200 mm]: 2
 Me2 (Media 2) [1200-1400: 1
 B2 (Baja2) [1400-6000 mm: 1
 ?..... : ?

MeB (Media Baja) [1000-2500 metros] > Prec_ins
 (Precipitación polilla)
 B1 (Baja 1) [0-500 mm]...: 2
 Me1 (Media 1) [500-700 m: 2
 Alt (Alta) [700-1200 mm]: 3
 Me2 (Media 2) [1200-1400: 2
 B2 (Baja2) [1400-6000 mm: 2
 ?..... : ?
 MeA (Media Alta) [2500-2800 metros] > Prec_ins
 (Precipitación polilla)
 B1 (Baja 1) [0-500 mm]...: 1
 Me1 (Media 1) [500-700 m: 2
 Alt (Alta) [700-1200 mm]: 2
 Me2 (Media 2) [1200-1400: 2
 B2 (Baja2) [1400-6000 mm: 1
 ?..... : ?
 Alt (Alta) [2800-7000 metros] > Prec_ins
 (Precipitación polilla)
 B1 (Baja 1) [0-500 mm]...: 1
 Me1 (Media 1) [500-700 m: 1
 Alt (Alta) [700-1200 mm]: 2
 Me2 (Media 2) [1200-1400: 1
 B2 (Baja2) [1400-6000 mm: 1

17 Nivel de la cualidad RelCaMg

> RelCaMg (Relación Calcio/Magnesio)
 Ba (Baja) [0-2.5 unidades: 2 (Déficit Calcio)
 Me (Media) [2.5-3.5 unid: 1 (Adecuado)
 Alt (Alta) [3.5-10 unida: 3 (Déficit Magnesio)

18 Rendimiento Proporcional PaCoFre

> ReTmed (Requerimiento de temp. media)
 1 > ReTmax (Requerimiento de temp. máxima)
 1 (Apto).....: 1
 2 (Mod. Apto).....: .9
 3 (Marg. Apto).....: .8
 4 (No Apto).....: .4
 ?..... : ?
 2 > ReTmax (Requerimiento de temp. máxima)
 1 (Apto).....: .9
 2 (Mod. Apto).....: .8
 3 (Marg. Apto).....: .7
 4 (No Apto).....: .4
 ?..... : ?
 3 > ReTmax (Requerimiento de temp. máxima)
 1 (Apto).....: .8
 2 (Mod. Apto).....: .7
 3 (Marg. Apto).....: .6
 4 (No Apto).....: .4
 ?..... : ?
 4 > ReTmax (Requerimiento de temp. máxima)
 1 (Apto).....: .6
 2 (Mod. Apto).....: .5
 3 (Marg. Apto).....: .4
 4 (No Apto).....: .2

Anexo 17. Ejemplos de impactos y medidas potenciales de mitigación y adaptación

| Impactos previstos | Clases Aptitud Impactadas | Medidas de Mitigación | Secuestro (tn CO ₂ /ha) | Efectos positivos sobre el ambiente | Efectos negativos sobre el ambiente | Medidas de adaptación |
|--|---------------------------|--|------------------------------------|---|--|--|
| Impactos sobre la conservación de suelos. | A2, A3 | Cubiertas vegetales. | 0.33 | Captación de CO ₂ , Incremento de la biodiversidad. | Incrementos de plagas específicas y adventicias. | Manejo agronómico sostenible y mejorado para aumentar la resiliencia del suelo. |
| | A2 y A3 | Laboreo reducido y/o regulado. | 0.17 | Captación de CO ₂ , Reducción de procesos de oxidación y, en consecuencia liberación de CO ₂ a la atmósfera. | Plagas y proliferación de adventicias. | Manejo agronómico sostenible y mejorado para aumentar la resiliencia del suelo. |
| | A1, A2 y A3 | Utilización de restos de cosechas. | 0.17 | Captación de CO ₂ , Menor coste de transporte y ahorro energético. Ahorro de energía necesaria en la producción de agroquímicos. | Ninguno | Manejo agronómico sostenible y mejorado para aumentar la resiliencia del suelo. |
| | A1, A2 y A3 | Optimización del uso de fertilizantes | 0.33 | Menor contaminación, Menos coste de transporte, Ahorro de energía necesaria en la producción de agroquímicos. | Pueden ser altamente contaminantes si no hay buena gestión y almacenaje. | Manejo agronómico sostenible y mejorado para aumentar la resiliencia del suelo. |
| | A1, A2 y A3 | Rotación de cultivos. | 0.39 | Fijación de nitrógeno atmosférico, Ahorro energético, Aumento de la biomasa subterránea (capacidad de retención de CO ₂). | Ninguno | Manejo agronómico sostenible y mejorado para aumentar la resiliencia del suelo. |
| | A1, A2 y A3 | Asociación con leguminosas. | 0.39 | Aumento de CO ₂ y de nitrógeno atmosférico por (rizobium), Ahorro energético (no uso de fertilizantes de síntesis). | Ninguno | Manejo agronómico sostenible y mejorado para aumentar la resiliencia del suelo. |
| Riesgo a pérdida de los recursos fitogenéticos (RF). | A1, A2 y A3 | - | - | - | - | Financiación e incentivos gubernamentales para estimular la conservación de RF, Análisis de zonas de alto riesgo. Colección de RF. |
| Cambios en la fenología del cultivo. | A2 y A3 | - | - | - | Pérdida de RF | Cambios en las fechas de siembra y cosecha. |
| Por precipitación. | A2 y A3 | Laboreo reducido | 0.17 | Para UC que tienen limitación por deficiencia de lluvia. Esta estrategia aumenta la lluvia efectiva (menos escorrentía). | Plagas y proliferación de adventicias. | Manejo agronómico sostenible y mejorado para aumentar la resiliencia del suelo, S de alertas tempranas. |
| | A1, A2 y A3 | Optimización de los fertilizantes | 0.33 | Mejor calidad de agua | Pueden ser altamente contaminantes si no hay buena gestión y almacenaje. | Manejo agronómico sostenible y mejorado para aumentar la resiliencia del suelo. |
| | A2 y A3 | Utilización de restos de cosecha por deficiencia de precipitación. | 0.17 | Ayuda a mantener un microclima fresco y retiene el recurso hídrico. | Ninguno | Nuevas variedades tolerantes al estrés hídrico. |

| Impactos previstos | Clases Aptitud Impactados | Medidas de Mitigación | Secuestro (tn CO ₂ /ha) | Efectos positivos sobre el ambiente | Efectos negativos sobre el ambiente | Medidas de adaptación |
|---|---------------------------|--|------------------------------------|--|---|---|
| Pérdida gradual de la aptitud climática del cultivo y disminución de la productividad, incluyendo el abandono de las tierras agrícolas actuales | A1, A2 y A3 | - | - | - | Reducción de la producción. | Investigación en materiales genéticos resistentes y/o tolerantes a estrés térmico e hídrico. Servicios de alerta temprana. |
| | A2 y A3 | Cubiertas vegetales | 0.33 | Captación de CO ₂ . Incremento de la biodiversidad. | Incrementos de plagas específicas y adventicias. | Manejo agronómico sostenible y mejorado para aumentar la resiliencia del suelo. |
| | A2 y A3 | Utilización de restos de cosechas, laboreo reducido. | 0.17 | Ayuda a mantener un microclima fresco y retiene el recurso hídrico. | Ninguno | Nuevas variedades tolerantes al estrés hídrico. |
| | A1, A2 y A3 | Laboreo reducido y/o regulado. | 0.17 | Captación de CO ₂ , Reducción de procesos de oxidación y, en consecuencia liberación de CO ₂ a la atmósfera. | Plagas y proliferación de adventicias. | Manejo agronómico sostenible y mejorado para aumentar la resiliencia del suelo. |
| Cambios en plagas y aumento del riesgo, prevalencia y desplazamiento a nuevas regiones. | A1, A2 y A3 | - | - | - | Reducción en la producción. | Implementación de sistemas de alerta temprano. Nuevas variedades resistentes y tolerantes. |
| | A1, A2 y A3 | Rotación de cultivos. | 0.39 | Menores plagas específicas: control de plagas natural. | Ninguno | Investigación en sistemas de rotación de cultivos |
| | A2 y A3 | Cubiertas vegetales. | 0.33 | Reducción de la contaminación de las aguas por herbicidas. | Incrementos de plagas específicas y adventicias. | Manejo agronómico sostenible y mejorado para aumentar la resiliencia del suelo. |
| Intensificación de los procesos de degradación del suelo. | A2 y A3 | - | - | - | Reducción de la fertilidad del suelo, Reducción de la producción. | Siembra de papa en contorno en contra de pendientes. Disminuir el número de aradas de rastra en la preparación del terreno. |
| | A2 y A3 | Cubiertas vegetales. | 0.33 | Freno de la erosión | Incrementos de plagas específicas y adventicias. | Implementación de sistemas de alerta temprano. Nuevas variedades resistentes y tolerantes. |
| | A2 y A3 | Laboreo reducido y/o regulado. | 0.17 | Menor erosión del suelo | Plagas y proliferación de adventicias. | Manejo agronómico sostenible y mejorado para aumentar la resiliencia del suelo. |
| | A2 y A3 | Implementación de gavetas de infiltración | - | Menor erosión del suelo | - | Procesos de educación en una cultura ecoamigable |
| | A1, A2 y A3 | Barreras vivas | - | Menor erosión del suelo | - | Procesos de educación en una cultura ecoamigable |
| | A1, A2 y A3 | Siembra en contorno | - | Menor erosión del suelo | - | Procesos de educación en una cultura ecoamigable |
| Vulnerabilidad de los pequeños productores al cambio climático. | A1, A2 y A3 | - | - | - | - | Creación de subsidios de adaptación y de un sistema de seguros agrícolas. |

Elaboración propia basada en COAG 2008

Anexo 18. Mapas de las variables biofísicas del suelo de la cuenca alta del río Reventazón

