



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**PLANEACIÓN ÓPTIMA DE LA PRODUCCIÓN DE
AGUACATE EN MICHOACÁN CONSIDERANDO
ASPECTOS ECONÓMICOS, TÉCNICOS Y AMBIENTALES**

TESIS presentada por:

JOAN CRISTIAN GONZÁLEZ ESTUDILLO

**A la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería
Química como requisito parcial para obtener el grado de:**

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

**Asesor: José María Ponce Ortega
Doctor en Ciencias en Ingeniería Química**

Morelia, Michoacán

Agosto de 2017

DEDICATORIA

A mis padres, Humberto González Verduzco y Celia Estudillo Téllez, por ser el cimiento de mi formación, un ejemplo auténtico de superación, quienes por todas las enseñanzas proporcionadas a lo largo de la vida, su apoyo, su dedicación y esfuerzo han forjado parte de lo que soy. Gracias por todo.

A Naomi Citlalli y Jatziri Yosberani González por el afecto mostrado y su gran apoyo.

A Elva Téllez Fuentes, en tu memoria, por ser el motor de inspiración principal de éste y muchos logros más, sobre todo por tu entusiasmo impregnado en cada palabra, donde estés, gracias.

A mi familia por su respaldo y confianza.

A mis amigos.

Joan Cristian

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer:

Al Dr. José María Ponce Ortega, por su constante dedicación, su paciencia, sus enseñanzas y ante todo por otorgarme la oportunidad de desarrollar este trabajo junto a él.

Al Dr. Fabricio Nápoles Rivera, por su incipiente entusiasmo en el arte de la enseñanza, por haber sido el mentor por excelencia de mi formación, sobre todo por guiarme y representar dignamente la vocación de ser maestro.

Al Dr. Agustín Jaime Castro Montoya, al Dr. Luis Ignacio Salcedo Estrada y la Dra. Janett Betzabe González Campos, por aceptar ser parte del comité evaluador de la tesis y por contribuir eficientemente con sus aportes a esta investigación, sin ustedes no sería la misma.

Al Dr. Mahmoud M. El-Halwagi, por su buen criterio, su aporte académico, sus consejos y mayormente por ser mi mentor durante la breve estancia de investigación en Texas A&M University.

A mis compañeros de estudio y amigos del posgrado de la facultad de ingeniería química de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por su amistad, su tiempo, sus consejos, su apoyo y por todo lo que me han enseñado, especialmente a Saúl Domínguez García, Baltazar Castro Cedeño y Gerardo Giovanni Esquivel Patiño.

Al consejo de ciencia y tecnología (CONACYT) por su apoyo económico y a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, así como a Texas A&M University por ser la puerta que me permitió adquirir cada nuevo conocimiento.

INDICE

Dedicatoria.....	(II)
Agradecimientos.....	(III)
Índice.....	(IV)
Lista de figuras.....	(VI)
Lista de tablas.....	(VII)
Lista de Variables y parámetros.....	(VIII)
Abstract.....	(XIV)
Resumen.....	(XV)
1.- Introducción.....	(1)
1.1 Generalidades.....	(1)
1.2 El aguacate.....	(5)
1.3 El agua y el aguacate.....	(7)
1.3.1 Consumos de agua.....	(10)
1.4 El mercado del aguacate.....	(15)
1.4.1 Demanda internacional.....	(16)
1.4.2 Demanda nacional.....	(17)
1.4.3 Aguacate procesado.....	(22)
1.5 Distritos productores.....	(23)
1.6 Costos y precios del negocio del aguacate.....	(30)
1.7 Impacto ambiental.....	(33)
2. Justificación	(35)
3. Hipótesis.....	(36)
4. Objetivos.....	(36)
4.1 Objetivo general.....	(36)
4.2 Objetivos específicos.....	(36)
5. Marco teórico.....	(37)
6. Metodología.....	(40)
6.1 Definición del problema.....	(40)

6.2 Superestructura.....	(41)
6.3 Modelo matemático.....	(41)
6.3.1 Uso de tierra.....	(42)
6.3.2 Consumos de hídricos.....	(43)
6.3.3 Producción de aguacate.....	(44)
6.3.4 Distribución del aguacate del huerto al empaque.....	(44)
6.3.5 Producto en mercado en función de la demanda.....	(46)
6.3.6 Costos y ventas.....	(47)
6.3.7 Costo de cultivo.....	(47)
6.3.8 Costo de empaque.....	(48)
6.3.9 Costo de transporte.....	(48)
6.3.10 Ventas.....	(48)
6.3.11 Beneficio.....	(49)
6.3.12 Impacto ambiental.....	(49)
7. Resultados.....	(55)
7.1 Escenario 1. Análisis sin restricciones de área.....	(55)
7.2 Escenario2- Comparativa entre el uso de suelo boscoso y pastizal.....	(58)
7.3 Escenario 3.- Sensibilidad a la disponibilidad de pastizales en cada distrito.....	(62)
8. Conclusiones.....	(68)
9. Referencias.....	(70)

Lista de Figuras

Figura 1.1. Producción mundial de aguacate en 2014

Figura 1.2. Mapa del uso de suelo michoacano hasta el año 2014

Figura 1.3. Porcentaje de suelo forestal por distrito y pérdida forestal anual (CIGA, 2014)

Figura 1.4. Proceso productivo de aguacate y sus principales desventajas

Figura 1.5. Rendimiento de la producción de aguacate, 1980-2010 (Secretaría de Economía)

Figura 1.6. Impacto del uso de sistemas de riego en el rendimiento para cada distrito productor.

Figura 6.1. Superestructura del proyecto.

Figura 7.1.- Área nueva instalada sin restricciones de área

Figura 7.2.- Producción anual sin restricciones de área

Figura 7.3 Impacto ambiental generado por el negocio del aguacate si no existieran restricciones para el crecimiento del área

Figura 7.4 Hectáreas instaladas considerando la alternativa de instalar en bosques y pastizales

Figura 7.5.- Distribución de áreas nuevas.

Figura 7.6 Relación entre la ganancia y el uso del suelo

Figura 7.7.- Relación entre los consumos hídricos y la ganancia

Figura 7.8.- Ganancia en función

Figura 7.9. Comportamiento del área con la disponibilidad del terreno

Figura 7.10.- Comparativa de las ganancias contra el impacto ambiental

Figura 7.11.- Ganancia en función del consumo de agua

Figura 7.12.- Resultados del análisis del escenario 3

Figura 7.13.- Áreas óptimas instaladas.

Lista de tablas

Tabla 1.1. Ciclo de vida del aguacate

Tabla 1.2. Factor Kc para cada mes del año en el aguacate

Tabla 1.3. Uso consuntivo de agua por distrito

Tabla 1.4 Consumos de agua y precipitación en cada distrito

Tabla 1.5. Países importadores de aguacate mexicano (FAOSTAT, 2013).

Tabla 1.6. Histórico de exportación por mercado y crecimiento anual promedio.

Tabla 1.7. Proyección de la demanda internacional

Tabla 1.8. Área y producción nacional en el año 2014 (INEGI 2015).

Tabla 1.9. Distribución de la población basada en el anuario estadístico geográfico por entidad federativa 2015. INEGI.

Tabla 1.10. Demanda nacional de aguacate.

Tabla 1.11. Demanda de proceso para los 20 años del proyecto

Tabla 1.12. Rendimientos bajo ambas modalidades de los distritos productores de aguacate en Michoacán.

Tabla 1.13. Áreas destinadas por distrito a la producción de aguacate

Tabla 1.14. Áreas de cada distrito y su uso asociado.

Tabla 1.15. Costo fijo de instalación de una hectárea nueva.

Tabla 1.16. Costos en cada modalidad

Tabla 1.17. Distancia entre zonas de empaques y puntos de distribución

Tabla 1.18: Precios de venta.

Tabla 7.1 Resultados generales del escenario 1

Tabla 7.2 Área potencial considerando el 100% del territorio de cada distrito con vocación forestal y junglas

Tabla 7.3 Área potencial considerando el 100% del territorio de cada distrito dedicado a pastizales

Tabla 7.4 Áreas Disponibles para varios porcentajes de área potencial de pastizal

Tabla 7.5.- Resultados del análisis del escenario 3

Lista de variables y parámetros del modelo

A_i^{EXIRI} = Área existente en modalidad riego en el distrito i (Ha)

A_i^{EXTEM} = Área existente en modalidad temporal en cada distrito i (Ha)

A_i^{POT} = Área potencial de cada distrito (Ha) A_i^{YORI} = Área de huertos jóvenes en modalidad de riego en cada distrito (Ha)

A_i^{YOTEM} = Área de huertos jóvenes en modalidad temporal en cada distrito (Ha)

a_i = Área total de cada distrito (Ha)

a_i^{new} = Área nueva en cada distrito (Ha)

$a_i^{new\ ir}$ = Área nueva en modalidad de riego (Ha)

$a_i^{new\ tem}$ = Área nueva en modalidad temporal (Ha)

$Cost^{hubs}$ = Costo de maquila (\$1000 Dólares)

$Cost^{cult}$ = Costo de cultivo (\$1000 Dólares)

$Cost^{Transp}$ = Costo de transporte (\$1000 Dólares)

$D_{h,m2,t}^{cull-fs}$ = Aguacate excedente de primera calidad que es enviada al de segunda calidad (Ton)

$D_{h,m3,t}^{cull-sp}$ = Aguacate excedente de segunda calidad que es enviada al de proceso (Ton)

$D_{AVOPROD}^{ACID}$ = Factor de efecto de acidificación del suelo por producción de aguacate.

$D_{AVOPROD}^{CARINOGENIC}$ = Factor de efecto carcinógeno debido a la producción de aguacate

$D_{AVOPROD}^{CLIM}$ = Factor de efectos al cambio climático por la producción de aguacate.

$D_{AVOPROD}^{ECOTOX}$ = Factor de efectos eco tóxicos por la producción de aguacate

$D_{AVOPROD}^{FUEL}$ = Factor de efecto a combustibles por la producción de aguacate

$D_{AVOPROD}^{ION}$ = Factor de efecto ionizante debido a la producción de aguacate

$D_{AVOPROD}^{LAND}$ = Factor de efecto por uso de tierra debido a la producción de aguacate

$D_{AVOPROD}^{MINERAL}$ =Factor de efecto a minerales debido a la producción de aguacate
 $D_{AVOPROD}^{OZ}$ =Factor de efecto a la capa de ozono por la producción de aguacate
 $D_{AVOPROD}^{RESPI}$ =Factor de efecto a las vías respiratorias por la producción de aguacate
 $D_{GUACAMOLE}^{ACID}$ =Efectos de acidificación por la producción de guacamole
 $D_{GUACAMOLE}^{CAR}$ =Efecto carcinógeno por la producción de guacamoles
 $D_{GUACAMOLE}^{CLIM}$ =Efecto al cambio climático por la producción de guacamole
 $D_{GUACAMOLE}^{ECOTOX}$ =Efectos eco tóxicos por la producción de guacamole
 $D_{GUACAMOLE}^{FUEL}$ =Efecto a los combustibles fósiles por la producción de guacamole
 $D_{GUACAMOLE}^{ION}$ =Efecto ionizante debido a la producción de guacamole
 $D_{GUACAMOLE}^{LAND}$ =Efecto debido al uso de la tierra debido a la producción de guacamole
 $D_{GUACAMOLE}^{MINERAL}$ =Efecto debido a la extracción de minerales por la producción de guacamole
 $D_{GUACAMOLE}^{OZ}$ =Efecto a la capa de ozono por la producción de guacamole
 $D_{GUACAMOLE}^{RESPI}$ =Efecto a las vías respiratorias por la producción de guacamole
 D_{H-M1} =Distancia entre empaques y mercados de primea calidad (Km)
 D_{H-M2} = Distancia entre empaques y mercados de segunda calidad (Km)
 D_{H-M3} = Distancia entre empaques y mercados de proceso (Km)
 D_{I-H} = Distancia entre huertos y empaques (Km)
 D_{OIL}^{ACID} =Efecto debido a la acidificación del suelo por la extracción de aceite de aguacate
 D_{OIL}^{CAR} =Efecto carcinógeno por la extracción de aceite de aguacate
 D_{OIL}^{CLIM} =Efecto al cambio climático por la extracción de aceite de aguacate
 D_{OIL}^{ECOTOX} =Efecto eco tóxico por la extracción de aceite de aguacate
 D_{OIL}^{FUEL} =Efecto a los combustibles fósiles por la extracción de aceite de aguacate
 D_{OIL}^{ION} =Efectos ionizantes por la extracción de aceite de aguacate
 D_{OIL}^{LAND} =Efecto debido al uso de la tierra por la producción de aceite de aguacate

$D_{OIL}^{MINERAL}$ = Efecto a los minerales debido a la extracción de aceite de aguacate.

D_{OIL}^{OZ} = Efecto a la capa de ozono por la extracción de aceite aguacate

D_{OIL}^{RESPI} = Efecto las vías respiratorias por la extracción de aceite de aguacate

$D_{Transport}^{ACID}$ = Efectos de acidificación del suelo por el transporte de aguacate

$D_{Transport}^{CARC}$ = Efectos carcinógenos por el transporte de aguacate

$D_{Transport}^{CLIM}$ = Efecto al cambio climático por el transporte de aguacate

$D_{Transport}^{ECOTOX}$ = Efectos eco tóxicos por el transporte de aguacate

$D_{Transport}^{FOSSILFUELS}$ = Efecto del uso de combustibles fósiles por el transporte de aguacate

$D_{Transport}^{ION}$ = Efecto ionizante por el transporte de aguacate

$D_{Transport}^{LAND-OCUPATION}$ = Efectos del uso de suelo por el transporte de aguacate

$D_{Transport}^{MINERALEXTRACTION}$ = Efecto de la extracción de minerales por el transporte de aguacate

$D_{Transport}^{OZ}$ = Efecto a la capa de ozono por el transporte de aguacate

$D_{Transport}^{RESPI}$ = Efecto a las vías espiratorias por el transporte de aguacate

$d_{ECOSYSTEM}^{AVOPPROD}$ = Daño al ecosistema debido a la producción de aguacate

$d_{ECOSYSTEM}^{GUACAMOLE}$ = Daño al ecosistema por la producción de guacamole

$d_{ECOSYSTEM}^{GUACAMOLE}$ = Daño al ecosistema por la producción de guacamole

$d_{ECOSYSTEM}^{OIL}$ = Daño al ecosistema por la extracción de aceite de aguacate

$d_{ECOSYSTEM}^{TRANSPORT-O-H}$ = Daño al ecosistema por el transporte I-H

$d_{ECOSYSTEM}^{TRANSPORT-H-M}$ = Daño al ecosistema por transportar aguacate H-M

$d_{HUMAN-HEALTH}^{AVOPPROD}$ = Daño a la salud debido a la producción de aguacate

$d_{HUMAN-HEALTH}^{GUACAMOLE}$ = Daño a la salud por la producción de guacamole

$d_{HUMAN-HEALTH}^{OIL}$ = Daño a la salud humana por la extracción de aceite de aguacate

$d_{HUMAN-HEALTH}^{TRANSPORT-O-H}$ = Daño a la salud humana por el transporte I-H

$d_{HUMAN-HEALTH}^{TRANSPORT-H-M}$ =Daño a la salud por transportar aguacate H-M

$d_{RESOURCES}^{AVOPPROD}$ =Daño a los recursos debido a la producción de aguacate

$d_{RESOURCES}^{GUACAMOLE}$ =Daño a los recursos por la producción de guacamole

$d_{RESOURCES}^{GUACAMOLE}$ =Daño a los recursos por la producción de guacamole

$d_{RESOURCES}^{OIL}$ =Daño a los recursos por la extracción de aceite de aguacate

$d_{RESOURCES}^{TRANSPORT-O-H}$ =Daño a los recursos por el transporte I-H

$d_{RESOURCES}^{TRANSPORT-H-M}$ =Daño a los recursos por transportar aguacate H-M

$ei_{AVOPPROD}$ = Impacto ambiental debido a la producción de aguacate

$ei_{GUACAMOLE}$ =Impacto ambiental debido a la producción de guacamoles

$ei_{GUACAMOLE}$ =Impacto ambiental debido a producir guacamole

ei_{OIL} =Impacto ambiental debido a la extracción de aceite de aguacate

ei_{TOTAL} =Impacto ambiental total

$ei_{TRANSPORT-H-M}$ =Impacto ambiental debido a transportar del empaque al mercado

$ei_{TRANSPORT-O-H}$ =Impacto ambiental debido al transporte del huerto al empaque.

$fc_i^{new-areair}$ = Costo fijo de nuevas áreas en modalidad de riego (\$1000 Dólares)

$fc_i^{new-areatem}$ = Costo fijo de nuevas áreas en modalidad temporal (\$1000 Dólares)

NPV_t =Factor de anualización (Depende de la inflación (3% anual))

$p_{h,m1,t}^{hub-market-fq}$ =Producto que va de empaques a mercados de primera calidad (Ton)

$p_{h,m2,t}^{hub-market-sq}$ = Producto que va de empaques a mercados de segunda calidad (Ton)

$p_{h,m3,t}^{hub-market-process}$ = Producto que va de empaques a mercado de proceso (Ton)

$p_{h,t}^{guacamole}$ =Producción de guacamole en cada zona de empaque en cada año (Ton)

$p_{h,t}^{oil}$ =Producción de aceite de aguacate en cada zona de proceso (Ton)

$p_{h,t}^{stored-hub}$ = Aguacate almacenado en cada empaque (Ton)

$p_{h,t}^{tot-hub-market}$ = Aguacate que se distribuirá de los empaques (Ton)

$p_{i,h,t}^{orch-hub}$ = Aguacate transportado de cada huerto a cada distrito (Ton)

$P_{i,t}$ = Producción de aguacate en cada distrito (Ton)

$p_{m1,t}^{Demand-fq}$ = Demanda de aguacate de primera calidad (Ton)

$p_{m2,t}^{Demand-sq}$ = Demanda de aguacate de segunda calidad (Ton)

$p_{m3,t}^{Demand-process}$ = Demanda de aguacate de proceso (Ton)

$p_{m2,t}^{market-sq}$ = Producto en mercados de segunda calidad

$profit$ = Beneficio total (\$1000 dólares)

$sales$ = Ventas totales (\$1000 dólares)

$uT_{h,m1}^{cost-hub-market-fq}$ = Costo unitario de transporte de primera calidad (\$1000 dólares/Ton-Km)

$uT_{h,m2}^{cost-hub-market-sq}$ = Costo unitario de transporte de segunda calidad (\$1000 dólares/Ton-Km)

$uT_{h,m3}^{cost-hub-market-process}$ = Costo unitario de transporte de proceso (\$1000 dólares/Ton-Km)

$uT_{i,h,t}^{cost-orch-hub}$ = Costo unitario de transporte del huerto al empaque (\$1000 dólares/Ton-Km)

$uc_{h,t}^{stored}$ = Costo de maquila de aguacate (\$1000 dólares/Ton)

$uc_{i,t}^{cult-ir}$ = Costo unitario de cultivo en modalidad de riego (\$1000 dólares/Ha)

$uc_{i,t}^{cult-tem}$ = Costo unitario de cultivo en modalidad temporal (\$1000 dólares/Ha)

$uc_{i,t}^{new-areatem}$ = Costo unitario de área nueva en modalidad temporal (\$1000 dólares/Ha)

$uc_i^{new-areair}$ = Costo unitario de área nueva en modalidad de riego (\$1000 dólares/Ha)

$uc_{m1}^{prod-fq}$ = Precio de venta de aguacate de primera calidad (\$1000 dólares/Ton)

$uc_{m2}^{prod-sq}$ = Precio de venta de aguacate de segunda calidad (\$1000 dólares/Ton)

$uc_{m3}^{prod-process}$ = Precio de venta de aguacate de proceso (\$1000 dólares/Ton)

$w_{i,t}^{exist}$ = Requerimiento de agua en huertos existentes (m³)

$w_{i,t}^{new}$ = Requerimientos de agua en nuevos huertos (m³)

$w_{i,t}^{tot}$ = Requerimientos totales de agua (m³)

y_i^{new} = Variable binaria de existencia de nueva área

y_i^{newir} = Variable binaria para la existencia de nueva área en modalidad de riego

y_i^{newtem} = Variable binaria para la existencia de nueva área en modalidad temporal

$\alpha_{i,t}^{EXTEM}$ = Constante de producción para huertos existentes en modalidad temporal

$\alpha_{i,t}^{YOUNGRI}$ = Constante de producción para huertos jóvenes con sistema de riego

$\alpha_{i,t}^{YOUNGTEM}$ = Constante de producción para huertos jóvenes en modalidad temporal

$\alpha_{i,t}^{EXRI}$ = Constante de producción para huertos existentes en modalidad de riego

$\alpha_{i,t}^{newir}$ = Constante de producción para área nueva en modalidad de riego

$\alpha_{i,t}^{newtem}$ = Constante de producción para área nueva en modalidad temporal

$\beta_{i,t}^{newir}$ = Constante de requerimientos hídricos para nuevos huertos con sistema de riego

$\beta_{i,t}^{newtem}$ = Constante de requerimientos hídricos para nuevos huertos sin sistema de riego

$\beta_{i,t}^{extem}$ = Constante de requerimientos hídricos para huertos existentes sin sistema de riego

$\beta_{i,t}^{exir}$ = Constante de requerimientos hídricos para huertos existentes con sistema de riego

$\beta_{i,t}^{yori}$ = Constante de requerimientos hídricos para huertos jóvenes con sistema de riego

$\beta_{i,t}^{yotem}$ = Constante de requerimientos hídricos para huertos jóvenes sin sistema de riego

Abstract

The global market of avocado has increased significantly in recent years. The State of Michoacán in Mexico is one of the largest producers of avocado in the world. The ideal climatic conditions and favorable yields have spurred an interest in growing new orchards for enhancing avocado production. Such growth has a major impact on the environment due to the land use change and the substantial use of fresh water. Therefore, there is a need for an optimal strategic planning for the avocado production while accounting for the sustainable use of the available resources. This paper presents an optimization model for the optimal strategic planning of avocado production to satisfy the current and future demands while simultaneously accounting for the environmental impact (caused by land and water use) and economic factors. The proposed model is based on a new mathematical programming formulation. The results show that with proper planning, it is possible to satisfy the future demands for avocado while protecting the environment and achieving economic gains.

Keywords: Optimal strategic planning; Avocado; Sustainable cultivation; Mathematical programming.

RESUMEN

PLANEACIÓN ÓPTIMA DE LA PRODUCCIÓN DE AGUACATE EN MICHOACÁN CONSIDERANDO ASPECTOS ECONÓMICOS, TÉCNICOS Y AMBIENTALES

La demanda mundial de aguacate ha ido en constante incremento, el gusto y aceptación por este fruto cada vez es mayor entre la población, razón por la cual el cultivo del aguacate en Michoacán y con ello en el territorio destinado a su desarrollo ha tenido un crecimiento acelerado en los últimos años. Este proyecto se enfoca en planificar la producción de aguacate, la instalación óptima de nuevos huertos de producción para maximizar el beneficio global haciendo uso mínimo de recursos hídricos y a su vez minimizando el impacto ambiental generado por el cultivo del aguacate.

La superestructura del problema es enfocada a la producción de aguacate, en la que se ha observado que el rendimiento promedio en un sistema de producción por riego tiene utilidades mayores que un sistema temporal, por lo que la elección de un sistema de riego eficiente maximizaría la producción y reduciría el consumo de agua, con ello se contribuye a frenar el rápido incremento de tierras destinadas al cultivo de aguacate; obteniéndose una reducción en el impacto ambiental debido al cambio de uso de suelo y el impacto negativo que conlleva. Así mismo se observa que en cada distrito los rendimientos, climas y requerimientos hídricos del cultivo son variables, por lo cual se presenta una superestructura en la que los nuevos huertos se instalan en lugares óptimos, brindando así la oportunidad de maximizar el beneficio económico, utilizar el mínimo de recursos hídricos y minimizar el impacto que se genera al ambiente. Para lo anterior, se consideraron todos los costos asociados al proceso productivo del aguacate, la distribución óptima del huerto al empaque, así como del empaque a cada mercado, obteniendo como conclusión que una localización óptima de los nuevos huertos cumplirá con los objetivos, garantizando así un impacto positivo a nivel económico y ambiental.

Palabras Clave: Estrategías de planificación óptima, aguacate, optimización, cultivo sustentable, programación matemática

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se abordan diferentes aspectos del proyecto, entre ellos se encuentran sus generalidades, la importancia del agua, el uso de esta en los huertos de aguacate y el impacto de la misma sobre estos, los aspectos principales del aguacate, además se toma en cuenta el impacto ambiental generado por dicha producción y por otro lado, también se detalla la justificación de la existencia del proyecto, abordando además la hipótesis del mismo y finalmente se presentan sus objetivos y alcance.

1.1. Generalidades

Uno de los problemas más importantes de la historia de la humanidad en cuanto al sector productivo ha sido el uso del agua para la producción de alimentos que con el crecimiento poblacional y la decreciente cantidad de recursos naturales ha hecho que la investigación en este rubro cobre notable importancia.

Las investigaciones se han enfocado en la búsqueda de hacer más eficiente el aprovechamiento del agua y han trabajado en mejorar la calidad de la misma, además se han encontrado nuevos métodos de producción que permiten maximizar los rendimientos para poder satisfacer la demanda alimenticia mundial. Por otro lado, en años recientes se ha estado trabajando en la minimización de los impactos ambientales de los procesos productivos.

La problemática de la investigación actual se centra en la producción del aguacate michoacano. Para el año 2014, la producción mundial de aguacate fue de 5 144 756 toneladas, de las cuales México aportó el 29.95% de la producción (FAOSTAT, 2016), siendo el mayor productor de aguacate a nivel mundial (**Figura 1.1**).

En ese mismo año Michoacán participó con cerca del 78% de la producción nacional de aguacate (Aguacate, 2016). En el año de 1980 la tierra destinada en Michoacán para el cultivo del aguacate era de apenas 30 979 ha, mientras que para el año 2014 la tierra destinada era de 127 084 ha. En un lapso de 34 años se instalaron 96 105 ha, dando un crecimiento promedio anual de 2 826 ha por año.

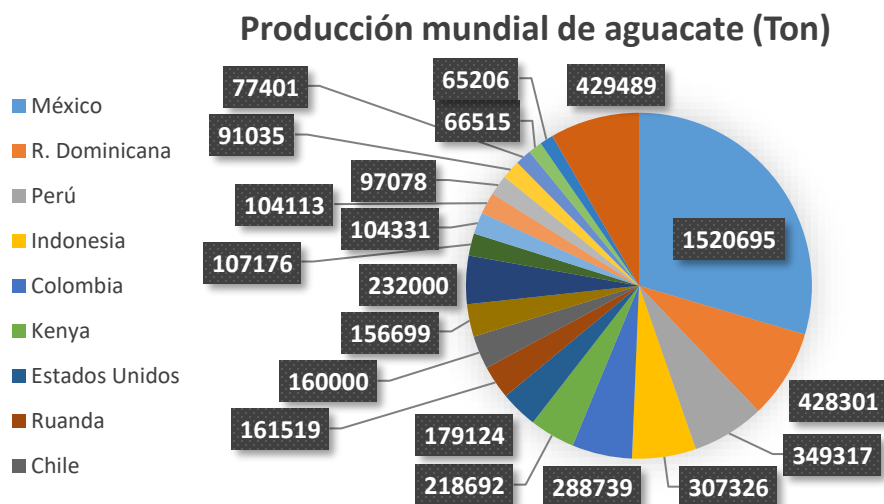


Figura 1.1. Producción mundial de aguacate en 2014

El rápido crecimiento de las tierras de cultivo ha arrojado un impacto económico positivo, generando 1.5 empleos por cada 10 ha de aguacate (INIFAP, 2012). Lo anterior ha suscitado un alto requerimiento de recursos hídricos y provocado un impacto negativo en el ambiente debido al uso de agroquímicos y la tala de bosques para incrementar las tierras de cultivo.

La demanda del fruto ha venido incrementando y se prevé que continúe así, la apertura de nuevos mercados como en el continente asiático y el crecimiento poblacional de países donde el aguacate es bien valorado, sugiere que la demanda aumente y con ello también las tierras de cultivo. Lo expuesto anteriormente abre un campo enorme para utilizar los recursos existentes de manera óptima en el estado. Para el año 2014 se elaboró un mapa (CIGA, 2014) de la distribución y uso de los suelos en el estado de Michoacán, en el cual puede observarse que el territorio destinado al cultivo de perenes (Aguacate) se ha vuelto significativo (**Figura 1.2**).

De la misma manera, se aprecia como existen zonas boscosas amenazadas y rodeadas por cultivos de aguacate que con la falta de un ordenamiento territorial pueden ser transformadas en huertos dedicados al cultivo del este.

Por otro lado, también se elaboró un mapa (**Figura 1.3**) que muestra un análisis de la deforestación en el estado de Michoacán durante el periodo 2007-2014, en él puede notarse que en la zona noroeste del estado se tienen índices de deforestación en lugares circundantes a las zonas aguacateras, lo que evidencia que las zonas boscosas cercanas a la zona aguacatera

están en riesgo de ser deforestadas si no se hace algo para evitar el cambio de uso de suelo forestal por un suelo agrícola (CIGA, 2014).

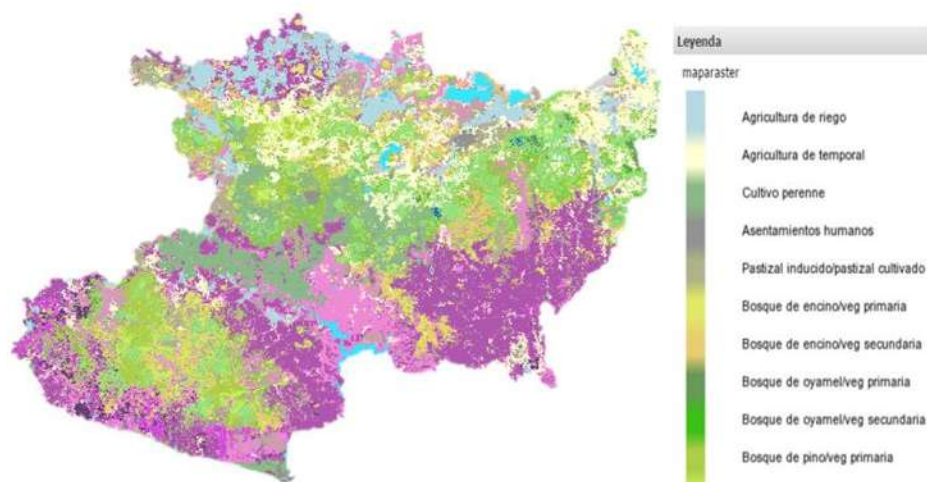


Figura 1.2. Mapa del uso de suelo michoacano hasta el año 2014.

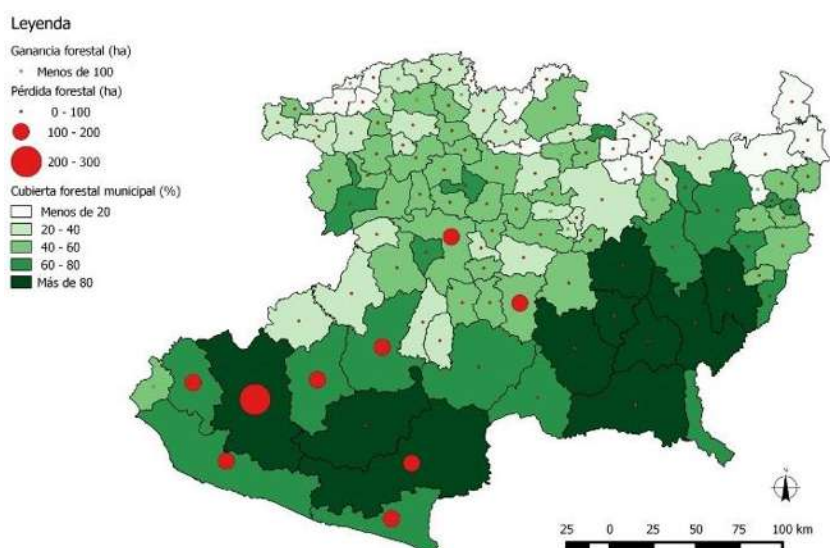


Figura 1.3. Porcentaje de suelo forestal por distrito y pérdida forestal anual (CIGA, 2014)

La problemática no sólo se centra en el crecimiento de las tierras destinadas a la producción de aguacate, sino que no se cuenta con un sistema de planeación para la producción del mismo. En Michoacán existen 49 distritos productores de aguacate, aunque uno de ellos aporta solo 2 hectáreas cosechadas, debido a ello este último no será contemplado para el análisis (Aguacate, 2014), y cada uno presenta requerimientos hídricos y rendimientos diferentes, lo anterior debido a los factores climáticos de cada región.

Se ha notado que el aguacate presenta un alto consumo de agua, por lo cual los rendimientos en la modalidad de riego son en promedio 25% superiores a los de modalidad de temporal. Hasta el año 2010, la producción bajo la modalidad de riego representó el 42.4% del total, mientras que la modalidad de temporal representó el 57.6% (Secretaría de Economía, 2012).

Dado que el rendimiento se ve afectado con el uso de sistemas de riego, se presenta la oportunidad de que los nuevos huertos puedan ser instalados bajo esta modalidad y que los huertos existentes con modalidad de producción temporal migren a una modalidad de producción bajo régimen de riego, por lo cual deberá ser tomado en cuenta el consumo hídrico, así como el impacto ambiental asociado en cada distrito.

La cadena productiva del aguacate consiste en la producción en huertos, recolección y transporte del aguacate hacia las zonas de empaque, la selección, el tratamiento en el empaque y la distribución del aguacate en cada mercado. El modelo de producción y sus desventajas actuales pueden esquematizarse como se muestra en la **Figura 1.4**.

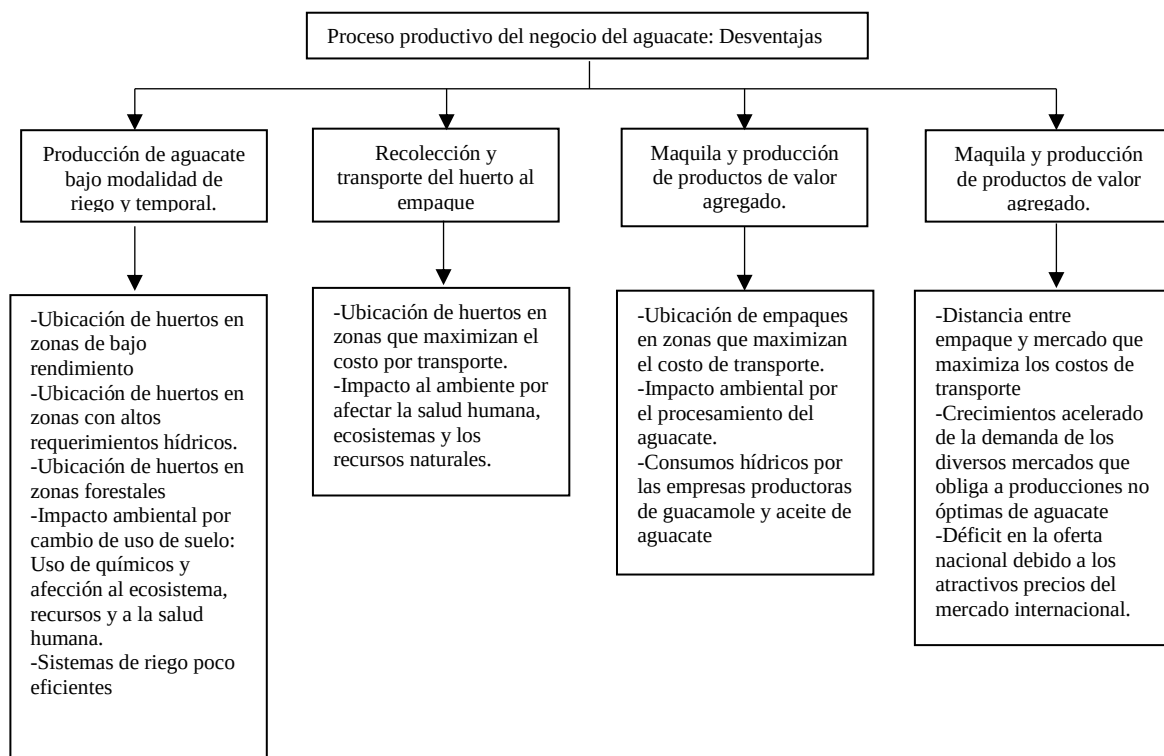


Figura 1.4. Proceso productivo de aguacate y sus principales desventajas

Si bien, un estudio de rentabilidad sobre el negocio del aguacate ha demostrado que el beneficio es considerable, el modelo productivo presenta ciertas fallas que no sólo merman el beneficio económico, sino que impactan de manera significativa al medio ambiente. La obsoleta tecnología de producción, la falta de uso de sistemas de riego eficientes, la mala ubicación de nuevos huertos en función de distancias, recursos hídricos y rendimientos, presentan un punto de mejora en el proceso que pudiese generar un beneficio tanto a productores, consumidores y al mismo medio ambiente.

1.2. El aguacate

El aguacate es un fruto que en años recientes ha ganado popularidad debido a su sabor y sus propiedades nutritivas. Su nombre proviene del término “ahuacatl” del vocablo náhuatl cuyo significado es “Testículos de árbol”. El aguacate era bien conocido por el hombre desde tiempo atrás, ya que las evidencias más antiguas sobre su consumo fueron encontradas en una cueva en Coxcatlán, región de Tehuacán, Puebla, México, datados entre los años 8,000-7,000 B.C. (Smith, 1966).

Después de la conquista, en el siglo XVII, los españoles llevaron el aguacate a España y posteriormente comenzó su distribución a nivel mundial. México es uno de los países con amplia diversidad de tipos de aguacate y existen en el país al menos 20 diferentes especies relacionadas con él. Esta gran variabilidad puede ser debida a diferentes condiciones ambientales presentes a lo largo y ancho del territorio nacional y a la naturaleza que se le ha conferido al aguacate; mecanismos que hacen maximizar el cruzamiento con otros tipos, por lo tanto, incrementa la variabilidad genética y por ende amplía la adaptación a un mayor número de ambientes (Bergh, 1992).

La variedad Hass se ha vuelto particularmente importante por su alta comercialización, es la de más alta demanda mundial, actualmente representa alrededor del 80% del aguacate producido en el mundo. Este fruto tiene forma ovoide, cascara rugosa, comprende más del 75% de pulpa, sin fibra, su contenido de aceite es del 23.7% y posee un hueso pequeño.

El aguacate Hass tiene un alto valor nutritivo, ya que estudios realizados muestran que cada 100 gramos de pulpa, contiene 152 calorías, 1.6 gr. de proteínas, 15.6 gr. de grasa,

4.8 gr. de hidratos de carbono, además calcio, fósforo, hierro y otros elementos como tiamina, riboflavina y ácido ascórbico (PRNSPA, 2012).

En referencia al ciclo biológico del aguacate (Amorteguí-Ferro et al., 2001) se ha estudiado y establecido que la vida del árbol alcanza un promedio de 25 años, teniendo varias etapas en su ciclo de vida como se puede ver la **Tabla 1.1**.

Tabla 1.1. Ciclo de vida del aguacate

Desarrollo en vivero	7 a 10 meses
Desarrollo del árbol joven	1 a 4 años
Desarrollo de la producción	4 a 8 años
Adulto en plena producción	8 a 25 años

En plena producción se hacen notar 4 etapas fundamentales: Fase Vegetativa, fase de floración, fase de fructificación y la fase de maduración del fruto. Para que el desarrollo del cultivo provea rendimientos aceptables deben considerarse algunos aspectos elementales como lo son el tipo de suelo, el clima y las necesidades hídricas del cultivo:

Suelo: Los suelos apropiados para el cultivo del aguacate son los franco-arenosos, bien drenados, sueltos y con capacidad de retener humedad. El pH del suelo debe oscilar entre el 5.5 y el 6.5, en cuanto al relieve puede oscilar entre el plano, no inundable y el ondulado en pequeñas colinas.

Clima: Se prefiere cultivar en zonas secas con una humedad no mayor al 70%.

La temperatura puede oscilar entre los 20 y 28 grados centígrados, mientras que la luminosidad es un factor determinante en la producción, por lo cual se deben de evitar las ramas densas que prohíban la entrada de los rayos del sol.

Agua: Las necesidades hídricas son variantes dependiendo del clima y otros factores, oscilando entre los 1000 y 2000 mm de agua anuales. La cantidad de agua está determinada por la edad del cultivo, el estado fenológico del árbol, el clima y el sistema de riego empleado.

1.3. El agua y el aguacate

El agua y su uso ha sido un tema de estudio con gran importancia para la humanidad, se han realizado trabajos exhaustivos para aprovechar eficientemente este recurso y también se ha estudiado el mejoramiento de la calidad del mismo debido a que este recurso es indispensable para la existencia del ser humano. La problemática del uso de este recurso es la utilidad de las aguas dulces disponibles que pueden ser empleadas de forma económicamente viable y con la calidad necesaria para su aprovechamiento, cuyo valor es menor al 1% del agua total del planeta.

Desde los años sesenta, la producción mundial de alimentos ha mantenido el paso del crecimiento demográfico mundial a costa de los recursos hídricos; el empleo del agua y su gestión han sido un factor esencial para elevar la productividad de la agricultura y asegurar una producción previsible. Al final del siglo XX, la agricultura empleaba por término medio el 70% de toda el agua utilizada en el mundo, y la FAO estima que el agua destinada al riego aumentará un 14% para 2030, por lo que la escasez de agua será cada vez mayor en algunos lugares, lo cual limitará la producción local de alimentos. La mejora en la utilización del agua en la agricultura será fundamental para afrontar las situaciones previstas de escasez de agua (FAO, 2002).

En referencia al uso de agua en la agricultura, del 70% de las extracciones dedicadas a la agricultura alrededor del 50% se consume por evapotranspiración (Kohli, Frenken, & Spottorno, 2010) y por ende el aprovechamiento de esta agua es ineficiente.

La extracción de agua para la agricultura considera las necesidades de riego y la ganadería asociada. Es importante señalar que las fuentes de agua están con frecuencia muy lejos de donde se necesita, y de esta manera es preciso transportarla a enormes distancias para satisfacer la carencia del lugar donde esta se requiere. El punto en el que se extrae el agua (ya sea la bomba o la ingesta de un canal) se llama "punto de retirada" o "fuente", mientras que la ubicación en la que se necesita el agua se conoce como "punto de entrega".

La diferencia en la cantidad de agua entre el punto de retirada y el punto de entrega puede ser muy significativa; entre el 20% al 30% de la cantidad retirada corresponde a pérdidas (Cheong, 1991) pero se puede superar el 60% (Asian Development Bank, 2003).

Lo anterior causa interés particular al momento de minimizar las distancias de transporte de agua o en su defecto eliminarlas y contemplar la captura de agua pluvial, así como su almacenamiento, por otro lado, considerar la instalación de nuevos huertos en zonas donde los efectos de la evapotranspiración y uso consuntivo de agua sean minimizados.

La estimación de la demanda de agua en la agricultura depende del conocimiento de la cantidad de esta que consumen los cultivos y del momento oportuno para aplicarla, debiendo considerarse siempre la evapotranspiración, la cual depende entre otros aspectos de las condiciones climáticas, tipo y estado de desarrollo del cultivo, así como de la disponibilidad de agua del suelo (SARGAPA, 2012).

Para el aguacate el consumo de agua afecta notoriamente el rendimiento y se ha comprobado que históricamente el uso de un sistema de riego puede aumentar los rendimientos promedio, en la **Figura 1.5.** puede observarse la diferencia de rendimientos promedio en México con uso de sistemas de riego y sin el uso de los mismos, haciendo notar que exceptuando los dos primeros años, el rendimiento con sistema de riego logra aumentar hasta casi 3 toneladas por hectárea, lo cual tiene un efecto económico positivo para los productores de aguacate.

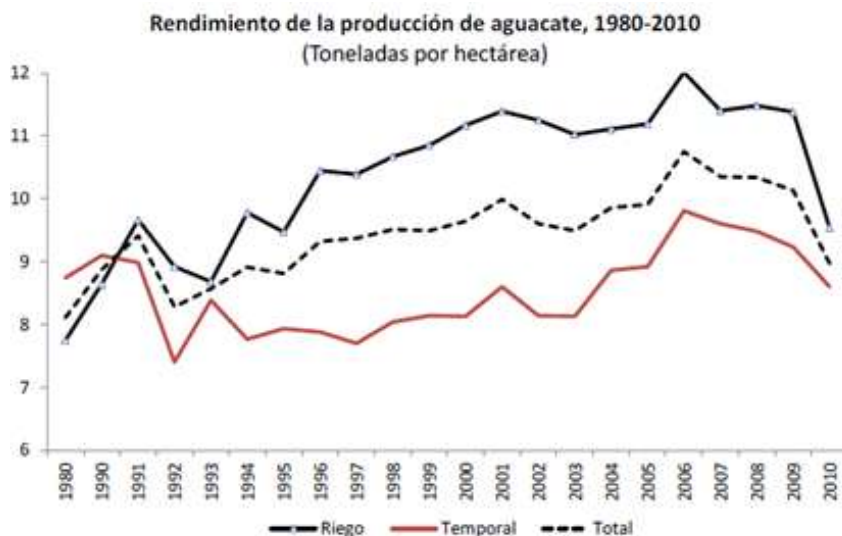


Figura 1.5. Rendimiento de la producción de aguacate, 1980-2010 (Secretaría de Economía, 2016)

Por otro lado, sólo 22 de los 48 distritos productores de aguacate contemplados han experimentado el uso de sistema de riego en los huertos, obteniéndose para cada distrito un incremento de la producción de diferente magnitud. La **figura 1.6.** muestra las toneladas incrementadas en cada distrito cuando se aplica un sistema de riego a los huertos.

Para el cálculo del incremento se consideró un promedio del histórico de los rendimientos bajo cada régimen de producción en los últimos 4 años (Aguacate, 2016). Dado que en los otros distritos no se presentan estudios previos del comportamiento del rendimiento bajo ambos regímenes, sólo se consideran aptos para la instalación de sistemas de riego aquellos distritos con estudios previos de producción bajo ambos.

En la **Figura 1.6** puede notarse que en la mayoría de los distritos el rendimiento se ve favorecido de manera diferente con el uso de sistemas de riego, en algunos distritos el rendimiento de manera imperceptible y en el caso de Tacámbaro el uso de sistema de riego perjudica la producción, ya que un exceso de agua también puede mermar el rendimiento de la producción del árbol.

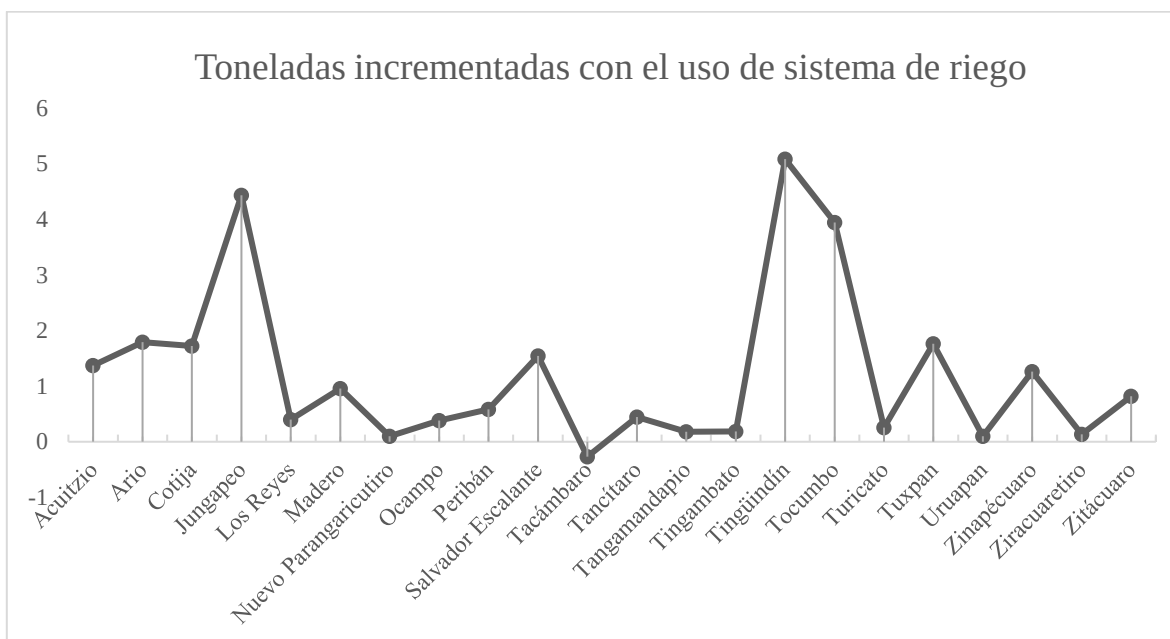


Figura 1.6. Impacto del uso de sistemas de riego en el rendimiento para cada distrito productor.

En consecuencia, se produce un punto de interés alto dado que la selección del lugar donde se debe suministrar agua afectaría tanto el aspecto ambiental, reduciendo consumos de agua, así como el beneficio económico obteniendo rendimientos mayores con el uso ella.

1.3.1. Consumos de agua

El consumo de agua en el árbol de aguacate es de suma importancia para obtener una producción óptima. Como se ha mencionado, los huertos que presentan algún sistema de riego suelen mejorar sus rendimientos en diferentes proporciones, por lo cual el cálculo de agua requerida es un factor determinante en el proyecto.

La determinación de los consumos de agua se realiza a través de fórmulas empíricas; para calcular los requerimientos hídricos del cultivo se ha tomado como base una metodología modificada de la forma propuesta por Blaney y Criddle (1950), en la cual se relaciona la fenología y la precipitación en la zona de cultivo. Sánchez-Tienda (1999) hace uso de ella agregando un factor de corrección para la temperatura y contemplando diferentes aspectos como lo son el porcentaje de horas luz, el coeficiente de desarrollo del aguacate y la precipitación, siendo estos los factores que afectan en mayor proporción al cultivo del aguacate.

Para obtener el uso consuntivo del agua para la cultivación de aguacate se empleará dicha metodología, en la cual se obtiene un uso consuntivo mensual, posterior a eso se hará un comparativo entre el uso consuntivo y la precipitación mensual para calcular el agua que deberá ser suministrada con sistemas de riego en cada distrito.

Las ecuaciones con las que se realizaron los cálculos se muestran a continuación:

$$UCm = K * F \quad (1.1)$$

Donde

UCm es el uso consuntivo en cm.

K es el factor del cultivo de aguacate

F es la sumatoria desde que i es igual a n de f , donde f es igual a:

$$f = \frac{p(T+17.8)}{21.8} \quad (1.2)$$

Donde:

p = Porcentaje de horas luz del mes con respecto al total anual

T = Temperatura media mensual en °C

Dado que las fórmulas anteriores fueron planeadas para zonas desérticas (Phelan, 1948) agregó un factor de corrección para la temperatura K_t ajustándose para zonas menos áridas.

$$K_t = 0.3114T + 0.2396 \quad (1.3)$$

Donde T es la temperatura en °C.

Por lo cual, la fórmula para calcular el uso consuntivo de agua queda como se muestra:

$$UC_m = K_c K_t F \quad (1.4)$$

El valor K_c depende del tipo de cultivo y del mes del año en el que se calcule el consumo hídrico. (Sánchez-Tienda, 1999) proporciona los valores de K_c para el aguacate y se muestran en la siguiente **Tabla 1.2**.

Tabla 1.2. Factor K_c para cada mes del año en el aguacate

Mes	K_c
Enero	0.25
Febrero	0.4
Marzo	0.57
Abril	0.7
Mayo	0.77
Junio	0.78
Julio	0.76
Agosto	0.7
Septiembre	0.65
Octubre	0.53
Noviembre	0.48
Diciembre	0.35

Los porcentajes de horas luz y las temperaturas medias mensuales son variantes para cada distrito de un mes a otro, estos datos son suministrados para cada uno de las Estadísticas Climatológicas Básicas del estado de Michoacán Periodo 1961-2003 (2006).

Para calcular la demanda de agua se debe realizar un cálculo mensual del uso consuntivo y restar la precipitación del mes para obtener la cantidad que debe ser suministrada con un sistema de riego.

$$Ir = UCm - Precm \quad (1.5)$$

Donde:

Ir= El agua a suministrarse con sistemas de riego.

Precm= La precipitación mensual en cada distrito.

El uso consuntivo anual es la suma de los usos consuntivos mensuales en cada distrito. Con las ecuaciones y datos obtenidos de las estadísticas climatológicas se obtuvieron los siguientes consumos para cada distrito (**Tabla 1.3.**)

Tabla 1.3. Uso consuntivo de agua por distrito

DISTRITO	USO CONSUNTIVO ANUAL (mm)	DISTRITO	USO CONSUNTIVO ANUAL (mm)
ACUITZIO	1114.5	PURÉPERO	1189.2
AGUILILLA	1458.1	PÁTZCUARO	1133.5
APATZINGÁN	1528.6	QUERÉNDARO	1140.4
ARIO	1117.4	QUIROGA	1139.6
CHARAPAN	1177.7	SALVADOR ESCALANTE	1124.8
CHARO	1054.4	SUSUPUATO	1248.5
CHILCHOTA	1177.7	TACÁMBARO	1189.4
COALCOMÁN	1458.1	TANCÍTARO	1241.9
COPÁNDARO	1220.3	TANGAMANDAPIO	1010.7
COTIJA	1180.8	TANGANCÍCUARO	1177.7
ERONGARÍCUARO	1133.5	TARETAN	1331
HIDALGO	1065.2	TARÍMBARO	1202.3
HUIRAMBA	1131.5	TINGAMBATO	1124.8
IRIMBO	1065.2	TINGÜINDÍN	1194.2
JIQUILPAN	1210.7	TLAZAZALCA	1205.3
JUNGAPEO	1136.6	TOCUMBO	1194.2
JUÁREZ	1246.3	TURICATO	1386.8
LOS REYES	1288.1	TUXPAN	1065.2
MADERO	1114.6	TZINTZUNTZAN	1131.5
MARAVATÍO	1136.6	TZITZIO	1426.5
MORELIA	1145	URUAPAN	1246.2
NVO. PARANGARICUTIRO	1141.1	ZINAPÉCUARO	1187.1
OCAMPO	1131.5	ZIRACUARETIRO	1331
PERIBÁN	1241.9	ZITÁCUARO	1136.6

Para calcular el agua que deberá ser suministrada con el sistema de riego se toma en cuenta la precipitación en cada mes proporcionada por las estadísticas climatológicas y se resta a la del uso consuntivo mensual. Para obtener el consumo por hectárea se considera una densidad de 100 árboles por hectárea y un área de 4 metros por árbol.

Los requerimientos natos, el requerimiento de agua a ser suministrado con sistema de riego y el consumo de agua por medio de la precipitación se muestran en la **Tabla 1.4**.

Tabla 1.4 Consumos de agua y precipitación en cada distrito

1	ACUITZIO	UCA (m³)	Sistema de riego (m³)	Agua de lluvia (m³)
2	AGUILILLA	445.8	157.012	288.788
3	APATZINGÁN	583.24	289.624	293.616
4	ARIO	611.44	320.604	290.836
5	CHARAPAN	446.96	162.804	284.156
6	CHARO	471.08	193.148	277.932
7	CHILCHOTA	421.76	151.376	270.384
8	COALCOMÁN	471.08	193.148	277.932
9	COPÁNDARO	583.24	289.624	293.616
10	COTIJA	488.12	222.268	265.852
11	ERONGARÍCUARO	472.32	192.724	279.596
12	HIDALGO	453.4	176.372	277.028
13	HUIRAMBA	426.08	118.332	307.748
14	IRIMBO	452.6	176.188	276.412
15	JIQUILPAN	426.08	118.332	307.748
16	JUNGAPEO	484.28	214.212	270.068
17	JUÁREZ	454.64	187.448	267.192
18	LOS REYES	498.52	226.396	272.124
19	MADERO	515.24	202.8	312.44
20	MARAVATÍO	445.84	156.884	288.956
21	MORELIA	454.64	187.608	267.032
22	NVO. PARANGARICUTIRO	458	210.524	247.476
23	OCAMPO	456.44	148.336	308.104
24	PERIBÁN	452.6	176.188	276.412
25	PURÉPERO	496.76	196.604	300.156
26	PÁTZCUARO	475.68	200.756	274.924
27	QUERÉNDARO	453.4	180.932	272.468
28	QUIROGA	456.16	214.708	241.452
29	SALVADOR ESCALANTE	455.84	182.436	273.404
30	SUSUPUATO	449.92	140.912	309.008
31	TACÁMBARO	499.4	227.116	272.284
32	TANCÍTARO	475.76	194.236	281.524
33	TANGAMANDAPIO	496.76	196.604	300.156
34	TANGANCÍCUARO	404.28	190.168	214.112
35	TARETAN	471.08	193.148	277.932
36	TARÍMBARO	532.4	215.46	316.94
37	TINGAMBATO	480.92	195.792	285.128
38	TINGÜINDÍN	449.92	140.912	309.008
39	TLAZAZALCA	477.68	190.08	287.6
40	TOCUMBO	482.12	200.064	282.056
41	TURICATO	477.68	190.08	287.6
42	TUXPAN	554.72	261.864	292.856
43	TZINTZUNTZAN	426.08	118.332	307.748
44	TZITZIO	452.6	176.188	276.412
45	URUAPAN	570.6	251.572	319.028
46	ZINAPÉCUARO	498.48	171.608	326.872
47	ZIRACUARETIRO	474.84	185.76	289.08
48	ZITÁCUARO	532.4	215.46	316.94

1.4 El mercado del aguacate

El aguacate cultivado en Michoacán tiene como destino el mercado nacional, así como la exportación a varios países en el mundo, además cierto porcentaje llega a ser industrializado. Por otro lado, dicho fruto ha tenido una mayor aceptación, siendo consumido en diversos países del mundo.

En la **Tabla 1.5** puede observarse una lista de los países que importan el aguacate mexicano, además de estos consumidores es necesario contemplar el consumo nacional y el de la agroindustria.

Tabla 1.5. Países importadores de aguacate mexicano (FAOSTAT, 2013).

PAÍSES IMPORTADORES DE AGUACATE MEXICANO
ALEMANIA
BÉLGICA
DINAMARCA
SINGAPUR
ESPAÑA
FRANCIA
PAÍSES BAJOS
REINO UNIDO
UCRANIA
CANADÁ
EUA
BERMUDAS
CHILE
COSTA RICA
EL SALVADOR
GUATEMALA
HONDURAS
PANAMÁ
CHINA
HONG KONG
RUSIA
JAPÓN
REPÚBLICA DE COREA

Para hacer un estimado de la demanda del aguacate, es necesario considerar los tres tipos de mercado: Mercado internacional (exportación), el mercado nacional, y el mercado de productos procesados del aguacate (Agroindustria).

Analizando por separado, la demanda internacional cuenta con 4 mercados: El mercado de Norte América que incluye a Estados Unidos y Canadá; el mercado correspondiente a América Latina que incluye a todos los países de Latinoamérica exceptuando a México; mercado de la demanda internacional es el europeo; y finalmente se encuentra el mercado asiático.

Para el caso de la demanda nacional se han considerado 3 mercados: El mercado del norte, el mercado del centro y el mercado del sur de México.

Para el caso de la demanda del proceso del aguacate se contemplan solo dos mercados, siendo ellos el proceso de guacamole y la producción de aceite de aguacate, aunque existen nuevos productos, su producción es muy baja comparada con los ya mencionados y no hay datos suficientes para analizar su mercado a detalle.

Para el proyecto actual se han considerado que las demandas de cada mercado crecen de manera diferente, por lo cual para cada uno la demanda fue estimada en base a datos históricos, haciendo una sencilla proyección.

A continuación, se muestra cómo es que fue calculada la demanda para cada mercado.

1.4.1 Demanda internacional.

En el rubro de la demanda internacional, se analizó el histórico de toneladas de aguacate exportadas a diferentes países desde el año 2010 hasta el año 2015, las toneladas exportadas fueron tomadas del boletín de información al aguacatero (Infohass, 2016). Para calcular la demanda futura se estableció un crecimiento promedio de los últimos seis años, restando la exportación en el año 2010 de la del año 2015 y dividiendo entre el número de años para obtener el crecimiento promedio anual de cada mercado. En la **Tabla 1.6** puede observarse el mercado, su histórico de exportación y el crecimiento promedio anual.

La proyección para los siguientes 20 años se muestra en la **Tabla 1.7**.

Tabla 1.6. Histórico de exportación por mercado y crecimiento anual promedio.

Año\Mercado	Europa	N. América	S. América	Asia
2010	6310	292609	22395	37951
2011	2483	302394	17640	37732
2012	3336	390151	31253	51624
2013	7324	549861	30254	49393
2014	7938	546945	24949	49574
2015	15452	731073	25001	55499
Crecimiento anual promedio	1523.6	73077.3	434.3	2924.6

Tabla 1.7. Proyección de la demanda internacional

Año\Mercado	Europa	N. América	S. América	Asia
2016	16975	804150	25435	58423
2017	18499	877227	25869	61348
2018	20023	950305	26304	64273
2019	21546	1023382	26738	67197
2020	23070	1096459	27172	70122
2021	24594	1169537	27607	73047
2022	26117	1242614	28041	75971
2023	27641	1315691	28475	78896
2024	29165	1388769	28910	81821
2025	30688	1461846	29344	84745
2026	32212	1534923	29778	87670
2027	33736	1608001	30213	90595
2028	35259	1681078	30647	93519
2029	36783	1754155	31081	96444
2030	38307	1827233	31516	99369
2031	39830	1900310	31950	102293
2032	41354	1973387	32384	105218
2033	42878	2046465	32819	108143
2034	44401	2119542	33253	111067
2035	45925	2192619	33687	113992

1.4.2 Demanda Nacional

Para el caso de la demanda nacional son tomados en cuenta los mercados del Norte, Centro y Sur de México. Se ha considerado el porcentaje de la población nacional ubicada en cada zona del país, para y se ha considerado el consumo per cápita de 6 kg/año, por lo cual la demanda de la fruta es una función directa de la población considerando un consumo per cápita constante, y la demanda nacional es estimada con la proyección poblacional proporcionada por la CONAPO (2010-2050).

Por otro lado, el problema de estudio está limitado sólo a la planificación de la producción en Michoacán, sin embargo, la demanda nacional contempla la de todos los estados del país, razón por la cual debe tenerse en cuenta la producción de aguacate en todos los distritos de Michoacán, así como el aguacate producido en los otros estados, se considera que la producción de aguacate en el norte del país es consumida en la misma región, de la misma manera lo hace la región centro y sur, dado que los empaques autorizados para la exportación se encuentran en Michoacán, la zona norte, centro y sur no pueden exportar.

Con lo mencionado anteriormente, y para que el programa cumpla con los balances de materia adecuadamente, la producción en cada zona del país debe ser restada de la demanda en esa misma zona, dando como resultado que desde Michoacán solo se envíe el déficit de aguacate a cada mercado de la demanda nacional.

En la **Tabla 1.8** pueden observarse los estados productores contemplados en cada mercado, así como su área y producción en el año 2014, año anterior al inicio del proyecto.

En la **Tabla 1.9** se muestra la distribución de la población nacional en las tres zonas contempladas para la demanda nacional (INEGI, 2015), lo anterior nos genera un porcentaje de distribución el cual será multiplicado cada año por la población nacional proyectada y esta a su vez se multiplicará por el consumo per cápita. Con la población por zona en cada año y el consumo per cápita se obtiene la demanda en cada zona y en cada año del proyecto.

En la **Tabla 1.10** se muestra la demanda en el tiempo del proyecto, y además se muestra la que el estado de Michoacán deberá suministrar a cada zona del país, lo anterior se hará sustrayendo la producción del año 2014 de la demanda anual para cada tiempo del proyecto, y con ello obtener el aguacate que deberá ser enviado desde el estado de Michoacán.

Tabla 1.8. Área y producción nacional en el año 2014 (INEGI 2015).

Zona	Estado	Área (Ha)	Producción (Ton)
Norte de México	B. California N.	46	185
	B. California S.	152	579
	Durango	1084	3850
	Nuevo León	686	2842
	Sinaloa	14	130
	Sonora	30	407
	TOTAL	2012	7993
Centro de México	Aguascalientes	18	197
	Colima	725	5385
	Estado de México	8162	89040
	Guanajuato	249	905
	Hidalgo	624	2902
	Jalisco	17040	119647
	Morelos	3963	29548
	Nayarit	5385	39148
	Puebla	3058	15519
	Querétaro	124	232
	San Luis Potosí	29	124
	Tlaxcala	25	90
	Veracruz	575	4000
	Zacatecas	45	289
	TOTAL	40022	307026
Sur de México	Chiapas	3147	10091
	Guerrero	4439	16522
	Oaxaca	2153	7133
	Campeche	67	641
	Quintana Roo	22	450
	Tabasco	59	336
	Yucatán	459	10707
	TOTAL	10346	45880

Tabla 1.9. Distribución de la población basada en el anuario estadístico geográfico por entidad federativa 2015. INEGI.

Zona	Estado	Población en el año 2014
Zona Norte de México	Baja California	3432944
	Baja California Sur	741037
	Chihuahua	3673342
	Coahuila	2925594
	Durango	1746805
	Nuevo León	5013589
	Sinaloa	2958691
	Sonora	2892464
	Tamaulipas	3502721
	Total	26887187
Zona Centro de México	Aguascalientes	1270174
	Ciudad de México	8874724
	Colima	710982
	Estado de México	16618929
	Guanajuato	5769524
	Hidalgo	2842784
	Jalisco	7838010
	Michoacán	4563849
	Morelos	1897393
	Nayarit	1201202
	Puebla	6131498
	Querétaro	1974436
	San Luis Potosí	2728208
	Tlaxcala	1260628
	Veracruz	7985893
	Zacatecas	1563324
	Total	73231558
Zona Sur de México	Campeche	894136
	Chiapas	5186572
	Guerrero	3546710
	Oaxaca	3986206
	Quintana Roo	1529877
	Tabasco	2359444
	Yucatán	2091513
	Total	19594458
Nacional	Total	119713203
Porcentaje de distribución de la población	Norte	22.45966721
	Centro	61.17249908
	Sur	16.36783371
	Total	100

Tabla 1.10. Demanda nacional de aguacate.

	Población	Demanda Nacional Total	Demanda Real			Aguacate proveniente de Michoacán (Demanda nacional del proyecto)		
Año	Personas	(Ton)	Norte	Centro	Sur	Norte	Centro	Sur
2016	122273473	733640	161400	447520	124718	153407	140494	78838
2017	123518269	741109	163043	452076	125988	155050	145050	80108
2018	124737788	748426	164653	456539	127232	156660	149513	81352
2019	125929439	755576	166226	460901	128447	158233	153875	82567
2020	127091642	762549	167760	465154	129633	159767	158128	83753
2021	128230519	769383	169264	469323	130795	161271	162297	84915
2022	129351846	776111	170744	473427	131938	162751	166401	86058
2023	130451690	782710	172196	477453	133060	164203	170427	87180
2024	131529467	789176	173618	481397	134159	165625	174371	88279
2025	132584052	795504	175010	485257	135235	167017	178231	89355
2026	133614189	801685	176370	489027	136286	168377	182001	90406
2027	134619410	807716	177697	492706	137311	169704	185680	91431
2028	135599641	813597	178991	496294	138311	170998	189268	92431
2029	136554493	819326	180251	499788	139285	172258	192762	93405
2030	137481335	824888	181475	503181	140230	173482	196155	94350
2031	138383142	830298	182665	506481	141150	174672	199455	95270
2032	139263092	835578	183827	509702	142048	175834	202676	96168
2033	140118934	840713	184956	512834	142921	176963	205808	97041
2034	140950311	845701	186054	515877	143769	178061	208851	97889
2035	141756919	850541	187119	518830	144591	179126	211804	98711
2036	142538744	855232	188151	521691	145389	180158	214665	99509
2037	143295718	859774	189150	524462	146161	181157	217436	100281
2038	144027641	864165	190116	527140	146908	182123	220114	101028
2039	144734345	868406	191049	529727	147629	183056	222701	101749
2040	145415858	872495	191948	532221	148324	183955	225195	102444
2041	146072453	876434	192815	534624	148993	184822	227598	103113
2042	146704226	880225	193649	536937	149638	185656	229911	103758
2043	147311185	883867	194450	539158	150257	186457	232132	104377
2044	147893395	887360	195219	541289	150851	187226	234263	104971

1.4.3. Aguacate procesado

Para calcular la demanda del aguacate para procesamiento se tiene un escenario incierto, dado que los últimos datos oficiales publicados son del año 2008 (FFAEM, 2008) en los cuales se notifica el valor de las toneladas del guacamole exportado, así como la exportación de litros de aceite de aguacate. La mayoría de los productos procesados de aguacate son destinados al extranjero, razón por la cual se tomará este valor para calcular la demanda de aguacate para la producción de estos productos de valor agregado.

En el año 2001, la producción de guacamole fue nula y para el año 2008 la producción fue de 62 439 toneladas, dando un incremento medio anual de la demanda de aproximadamente 7 804 toneladas por año; para el caso del aceite de aguacate en el año 2001 la producción era 8 000 litros y para el año 2008 la producción fue de 64 796 litros de aguacate, dando como incremento medio anual un valor de 7 100 litros.

Para la producción del aceite de aguacate debe contemplarse su densidad (0.92 g/ml) y que el aguacate Hass contiene del 15% al 25% de su peso en aceite, dependiendo de su grado de madurez, y sólo se obtienen rendimientos del 10% de la fruta fresca (Olaeta, 2003), por lo cual se puede calcular la masa total del aguacate necesario en cada año para cumplir la demanda de estos productos.

Para el caso del guacamole se analizó que para producir un lote de 195.4 kg de guacamole son requeridos 178.36 kg de aguacate, ya que para la producción del mismo es necesario restar la merma del aguacate ocasionada por el deshueso y despulpe, además se tienen que añadir otros componentes como lo son sal, cebolla, ajo, cilantro y conservantes; dando como resultado un valor de 0.9127 kg aguacate/kg de guacamole producido (Paez Arguello, 2010). Con el dato anterior y en función de la demanda se calcula la demanda de aguacate requerida para el proceso de guacamole multiplicando la demanda de guacamole por el factor de 0.9127 kg de Aguacate/kg de guacamole.

La demanda de aguacate para la producción de guacamole y aceite de aguacate se detalla en la **Tabla 1.11**.

Tabla 1.11. Demanda de proceso para los 20 años del proyecto

Demanda para el aceite de aguacate				Demanda para el guacamole	
Año	Litros	Kg (Aceite)	Aguacate (Ton)	Ton Guacamole	Ton de aguacate
2016	121596	111868	1118	124871	113969
2017	128696	118400	1184	132675	121092
2018	135796	124932	1249	140479	128215
2019	142896	131464	1314	148283	135337
2020	149996	137996	1379	156087	142460
2021	157096	144528	1445	163891	149583
2022	164196	151060	1510	171695	156706
2023	171296	157592	1575	179499	163828
2024	178396	164124	1641	187303	170951
2025	185496	170656	1706	195107	178074
2026	192596	177188	1771	202911	185196
2027	199696	183720	1837	210715	192319
2028	206796	190252	1902	218519	199442
2029	213896	196784	1967	226323	206565
2030	220996	203316	2033	234127	213687
2031	228096	209848	2098	241931	220810
2032	235196	216380	2163	249735	227933
2033	242296	222912	2229	257539	235055
2034	249396	229444	2294	265343	242178
2035	256496	235976	2359	273147	249301

1.5 Distritos productores

En el estado de Michoacán existen un total de 48 productores de aguacate (Aguacate, 2016), los cuales presentan diferentes rendimientos bajo cada una de las modalidades de producción, lo anterior debido a diferentes factores como lo son la precipitación, temperatura, altura, tipo de suelo, entre otros factores que pudiesen alterar su producción.

Para obtener una estimación aceptable del rendimiento en cada distrito, se analizaron los rendimientos en cada uno en el periodo de 2010-2014 y se obtuvo un promedio para cada uno y para cada régimen de producción (temporal y riego). Estas constantes de producción (rendimiento) varían para cada distrito, para cada año del proyecto y para cada modalidad de producción: huertos en producción sin sistema de riego, huertos en producción con sistema de riego, huertos jóvenes sin producción y sin sistema de riego, huertos jóvenes sin

producción y con sistema de riego, huertos nuevos instalados sin sistema de riego y huertos nuevos instalados con sistema de riego respectivamente.

Cada una de las constantes de producción depende del rendimiento promedio con riego o sin riego, variando sólo el porcentaje de ese rendimiento en función del tiempo, por lo cual el parámetro determinante es el propio rendimiento en cada modalidad de producción.

Se ha tomado en cuenta que la productividad va aumentando desde que inicia a los 4 años hasta alcanzar el rendimiento promedio en plena producción, se estabiliza a los 8 años y su vida útil es de 25 años. Por lo tanto, para los huertos nuevos que se instalen se tendrá una en periodo de 4 años sin producción, en los huertos jóvenes se tomará que tienen una edad de 2 años, dado el desconocimiento de la edad de cada huerto, en cuanto a los huertos en plena producción se asumirá que tienen un aproximado de 20 años útiles, después el rendimiento irá en disminución debido a factores de edad, enfermedades y renovación paulatina del huerto.

En la **Tabla 1.12** se muestran los distritos productores del estado de Michoacán junto con su número de identificación para el proyecto, los rendimientos promedio con sistema de riego y sin sistema de riego para cada tipo de huerto en cada distrito.

Tabla 1.12. Rendimientos bajo ambas modalidades de los distritos productores de aguacate en Michoacán.

No	Distrito	Rendimiento sin riego	Rendimiento con riego
1	Acuitzio	5.44	6.812
2	Aguililla	0	7.964
3	Apatzingán	5.51	0
4	Ario	10.312	12.104
5	Charapan	0	0
6	Charo	0	4.72
7	Chilchota	0	7.5
8	Coalcomán	0	4.702
9	Copándaro	0	4.24
10	Cotija	7.14	8.86
11	Erongarícuaro	0	12.08
12	Hidalgo	7.28	0
13	Huiramba	7.474	0
14	Irimbo	7.28	0
15	Jiquilpan	0	8.536
16	Jungapeo	3.98	8.412
17	Juárez	0	10.1
18	Los Reyes	10.66	11.06
19	Madero	5.032	5.9925
20	Maravatío	0	5.98
21	Morelia	0	4.62
22	Nuevo Parangaricutiro	9.356	9.458
23	Ocampo	8.72	9.1
24	Peribán	10.48	11.062
25	Purépero	8.16	0
26	Pátzcuaro	8.724	0
27	Queréndaro	5.9	0
28	Quiroga	9.65	0
29	Salvador Escalante	10.558	12.102
30	Susupuato	9.74	0
31	Tacámbaro	11.804	11.536
32	Tancítaro	8.944	9.388
33	Tangamandapio	9.754	9.3
34	Tangancícuaro	8.04	0
35	Taretan	0	9.056
36	Tarímbaro	0	5.2
37	Tingambato	9.042	9.226
38	Tingüindín	7.2	12.28
39	Tlazazalca	0	2.2
40	Tocumbo	8.5	12.44
41	Turicato	11.312	11.568
42	Tuxpan	6.54	8.3
43	Tzintzuntzan	9.166	0
44	Tzitzio	0	0.44
45	Uruapan	9.688	9.79
46	Zinapécuaro	5.04	6.3
47	Ziracuaretiro	9.07	9.046
48	Zitácuaro	9.78	10.6

En el desarrollo del modelo se han contemplado varias áreas, tales como lo son las existentes, y las máximas potenciales que podrían ser instaladas. En el caso de las áreas existentes, se tienen 4 tipos de áreas y 2 nuevas:

a) Área existente de huertos adultos en producción y sin sistema de riego:

Estos son huertos mayores a los 4 años de edad que están en producción y no cuentan con algún sistema de riego.

b) Área existente de huertos adultos en producción y con sistema de riego:

Estos huertos son mayores a los 4 años de edad, están en producción y cuentan con algún sistema de riego.

c) Área existente de huertos jóvenes sin producción y sin sistema de riego:

Estos son huertos jóvenes cuya edad no supera los 4 años y dado que hasta los 4 años comienza la producción de aguacate, estos ocupan área sin producir y están bajo una modalidad sin riego.

d) Área existente de huertos jóvenes sin producción y con sistema de riego:

Estos huertos presentan una edad menor a los 4 años por lo tanto aún no inicia su etapa de producción, estos ocupan un área que aún no produce y cuenta con un sistema de riego.

e) Área nueva instalada con sistema de riego:

Estos huertos comenzarán a producir hasta el año 4 del proyecto y contarán con sistema de riego.

f) Área nueva instalada sin sistemas de riego:

Estos huertos comenzarán a producir hasta el año 4 y no contarán con sistema de riego.

Cada uno de los distritos posee estos tipos de áreas, por lo cual es necesario cuantificar las áreas existentes de producción y a partir de estas realizar una estimación óptima de las nuevas áreas potenciales.

En la **Tabla 1.13** se muestran las áreas existentes en cada modalidad para cada distrito hasta el año 2014 (Aguacate, 2016).

Tabla 1.13. Áreas destinadas por distrito a la producción de aguacate.

No.	Distrito	Área existente en producción sin riego	Área existente en producción con riego	Área de huertos jóvenes sin riego	Área de huertos jóvenes con riego	Área total
1	Acuitzio	98.85	972	120	448	1638.85
2	Aguililla	0	20	0	50	70
3	Apatzingán	385.82	0	63	0	448.82
4	Ario	6820	4625	681	410	12536
5	Charapan	0	0	90	0	90
6	Charo	0	36.7	0	0	36.7
7	Chilchota	0	526.6	0	351.07	877.67
8	Coalcomán de Vázquez Pallares	0	200	0	700	900
9	Copándaro	0	2	0	0	2
10	Cotija	540	330	20	29	919
11	Erongarícuaro	0	415	0	70	485
12	Hidalgo	22	0	0	0	22
13	Huiramba	69	0	25	0	94
14	Irimbo	92	0	0	0	92
15	Jiquilpan	0	60	0	0	60
16	Jungapeo	2.5	21	0	0	23.5
17	Juárez	0	26	0	4	30
18	Los Reyes	2370	520	808	71.6	3769.6
19	Madero	352	380	51.25	365	1148.25
20	Maravatío	0	6	2.25	0	8.25
21	Morelia	0	479	0	305	784
22	Nuevo Parangaricutiro	2400	4100	0	0	6500
23	Ocampo	34	8.5	27	0	69.5
24	Peribán	11100	1278	10	5	12393
25	Purépero	290.62	0	435.94	0	726.56
26	Pátzcuaro	190	0	21	0	211
27	Queréndaro	20	0	0	0	20
28	Quiroga	59	0	14	0	73
29	Salvador Escalante	6753	6040	731	670	14194
30	Susupuato	175	0	25	0	200
31	Tacámbaro	6526	7234	200	272	14232
32	Tancítaro	15350	6250	0	0	21600
33	Tangamandapio	970	600	275	87	1932
34	Tangancícuaro	1232.54	0	580.02	0	1812.56
35	Taretan	0	905	0	0	905
36	Tarímbaro	0	20	0	0	20
37	Tingambato	2202	834	0	0	3036
38	Tingüindín	304	1936	11	30	2281
39	Tlazazalca	0	39.35	0	129.46	168.81
40	Tocumbo	300	209	0	17	526
41	Turicato	2325	257	50	52	2684
42	Tuxpan	52	260	0	0	312
43	Tzintzuntzan	14	0	3	0	17
44	Tzitzio	0	6	0	24	30
45	Uruapan	4960	9070	0	0	14030
46	Zinapécuaro	50	5	10	0	65
47	Ziracuaretiro	1255	2515	0	0	3770
48	Zitácuaro	678	426.5	100	33.5	1238

Por otro lado, los nuevos huertos pueden ser instalados en todos los distritos dado que todos poseen áreas disponibles, pero la elección del lugar donde se instalarán las nuevas áreas depende de los lugares con un mejor rendimiento, de los requerimientos de cada distrito, de las distancias por las que será transportado el aguacate y de un límite superior que posee cada distrito para la instalación de nuevos huertos.

El límite superior dependerá del suelo disponible que sea apto para la instalación. Las instalaciones gubernamentales han hecho un esfuerzo y realizaron para el año 2009 un estudio de los distritos Michoacanos en los cuales se analizó y dictaminó el tipo de suelo y la distribución del mismo. La mayoría de los distritos poseen áreas con vocación forestal, selva, zonas para los asentamientos urbanos, zonas dedicadas a la agricultura, zona de pastizales y zonas cuya área no ha sido especificada (Prontuario, 2009).

La reglamentación ambiental prohíbe el cambio de uso de suelo forestal a uso de suelo agrícola, razón por la cual el área con vocación forestal y las zonas selváticas no pueden ser empleadas para el cultivo del aguacate, por lo tanto, las áreas con esta vocación en cada distrito quedan descartadas y no podrán ser usadas para instalar los nuevos huertos. El área destinada a las zonas urbanas tampoco puede ser usada para los nuevos dado que quitar territorio a la población crearía un problema social afectando directamente a los habitantes, disminuyendo el espacio para viviendas y el crecimiento de la localidad, así como representando riesgos a la salud propiciados por la toxicología de las sustancias químicas empleadas.

Los suelos con vocación no especificada no deberían ser usados dado el desconocimiento del terreno, los suelos agrícolas tampoco se deberían utilizar para el cultivo del aguacate, puesto que al cambiar un cultivo por otro podría generar un desabasto de los productos agrícolas primordiales.

De lo anterior se obtiene como modelo el uso de suelos con pastizales para la instalación de nuevos huertos, sin embargo, no podrían ser usados en su totalidad, ya que afectaría la producción pecuaria y las actividades que se realicen en ella, por ello, sólo un porcentaje de la tierra con pastizales podrá ser empleada. Aunque se hará un análisis de sensibilidad para conocer el porcentaje ideal que se deberá destinar para el aguacate.

La **Tabla 1.14** muestra el distrito y la distribución de su área.

Tabla 1.14. Áreas de cada distrito y su uso asociado.

Distrito	Total (Ha)	Agricultura (Ha)	Zona urbana (Ha)	Zona forestal (Ha)	Pastizales (Ha)	Selva (Ha)	No especificada (Ha)
ACUITZIO	17629	7740	572	8914	371	0	28
AGUILILLA	141567	17752	750	52280	10858	59628	297
APATZINGÁN	163992	55708	2361	24434	3771	76633	1082
ARIO	69460	32076	659	29284	3632	3709	97
CHARAPAN	23362	11473	565	10896	378	0	49
CHARO	32316	6476	326	18959	5144	1273	135
CHILCHOTA	30451	11315	636	16531	1224	730	12
COALCOMÁN	282692	2713	452	204753	49782	24820	169
COPÁNDARO	17327	2694	181	209	992	2427	10820
COTIJA	50528	13061	449	16325	5169	14355	1167
ERONGARÍCUARO	24653	8749	160	11229	246	897	3370
HIDALGO	114360	15301	2401	87302	8005	583	766
HUIRAMBA	7923	3257	101	3242	1313	0	7
IRIMBO	12554	7671	482	2735	1584	0	80
JIQUILPAN	24281	8784	1320	2534	3901	7345	393
JUNGAPEO	26638	6025	223	8034	4222	8132	0
JUÁREZ	14164	6246	97	2583	1219	3965	50
LOS REYES	48097	21528	870	22648	1741	1019	288
MADERO	101876	6326	173	83966	4472	6937	0
MARAVATÍO	69667	35265	2438	12776	16469	1971	745
MORELIA	119695	36674	10904	40277	15644	11610	4584
NVO. PARANGARICUTIRO	23480	9361	436	13202	0	478	0
OCAMPO	14570	5747	317	8338	94	0	71
PERIBÁN	33259	19090	528	6053	5111	2474	0
PURÉPERO	19273	6502	834	7194	2403	2266	71
PÁTZCUARO	43847	16942	1810	20279	767	70	3976
QUERÉNDARO	23373	5875	493	15138	114	1007	743
QUIROGA	21340	7906	642	10215	674	206	1694
SALVADOR ESCALANTE	48798	30083	1337	16093	136	0	1146
SUSUPUATO	26494	9039	63	10769	2575	4045	0
TACÁMBARO	78869	33416	1009	29607	7760	7058	15
TANCÍTARO	71443	40629	321	27319	478	2607	85
TANGAMANDAPIO	31550	13358	883	7089	4237	5817	164
TANGANCÍCUARO	38605	17306	606	8188	4049	7941	513
TARETAN	18523	8009	468	8305	381	1324	33
TARÍMBARO	25695	14949	596	118	4213	5789	28
TINGAMBATO	18750	7606	720	10318	105	0	0
TINGÜINDÍN	17409	9656	322	6009	1162	118	139
TLAZAZALCA	20379	5306	336	4656	4515	5106	456
TOCUMBO	50635	7807	764	18664	8207	14962	227
TURICATO	154417	31068	525	23162	29848	69688	123
TUXPAN	24350	8860	603	13346	1151	314	73
TZINTZUNTZAN	16795	5444	441	6264	755	483	3404
TZITZIO	94121	2136	65	59004	1327	31492	94
URUAPAN	101434	31008	5649	54967	4057	5507	243
ZINAPÉCUARO	59741	18615	1350	21763	7503	2921	7587
ZIRACUARETIRO	15993	7380	471	8050	0	0	89
ZITÁCUARO	51090	20466	2738	22750	1374	2769	991

1.6. Costos y precios del negocio del aguacate.

Se ha estudiado y demostrado que el negocio del aguacate es sumamente atractivo para los inversionistas por su alto margen de ganancia. Los costos asociados al negocio del mismo deben de ser considerados, así como el precio al cual es vendido a cada mercado. Para la evaluación del proyecto se citarán los datos y costos en miles de dólares considerando el dólar a un precio de \$18 pesos mexicanos.

Es bien sabido que los costos de producción varían de un huerto a otro, debido a ello se consideraran un costo promedio de producción en modalidad temporal y riego. Bertuglia et al. (2003) estimaron los costos asociados a la instalación y producción de aguacate bajo el régimen temporal y con sistema de riego.

Existe un costo que no depende de la modalidad; el costo fijo de producción, el cual incluye maquinaria como lo son tractores, trituradoras de vara, mochilas dosificadoras, instrumentos de corte y poda, carretillas, así como otros elementos que conciernen a la maquinaria, además considera el costo de las plantas a instalar y el almacén interno de productos. Este costo se ve reflejado en la **Tabla 1.15**.

Tabla 1.15. Costo fijo de instalación de una hectárea nueva.

Costo fijo por hectárea	
Gasto	\$1000 (Dólares 2016)
Maquinaria	70.096488
Plantación	6.228984
Almacén	2.093592
Costo fijo	78.419064

Por otro lado, se encuentran costos que varían en función de la modalidad en la cual serán instaladas. FIRA (2007) analizó los costos bajo ambas modalidades, los cuales son usados en el presente trabajo. Estos incluyen el costo del terreno, el sistema de riego y el de producción.

El costo del terreno corresponde a una hectárea en el estado de Michoacán, de la cual su costo varía entre los \$44.4 y \$66.4 por hectárea, por tal motivo se tomará un valor intermedio de \$55.5 por hectárea. A este debe ser añadido el costo del sistema de riego, si es

que la modalidad posee y contempla la bomba, tubería, dosificadores, así como las balsas de contención de agua.

También se consideran los costos operativos bajo ambos regímenes de producción, los cuales consideran para la modalidad temporal los asociados a la poda, abonado, herbicidas, aplicación de foliares, costos varios (mano de obra) y de recolección, finalmente para la modalidad de riego se agrega un costo que incluya uno asociado a la irrigación. Aquellos costo que dependen de la modalidad de producción son mostrados en la **Tabla 1.16**.

Tabla 1.16. Costos en cada modalidad.

Costo en modalidad temporal		Costo en modalidad de riego	
Concepto	\$1000/Dólares	Concepto	\$1000/Dólares
Área	64.5	Área	64.5
Sistema de riego	N/A	Sistema de riego	1.5
Costo de operación	5.68	Costo de operación	6

Medina-Niño (2005) estimó el costo de maquila para el cual se ha determinado de aproximadamente \$0.094 ton (actualizados al 2016). Este costo incluye todos aquellos asociados a la maquila de aguacate, incluyendo activos fijos y operativos.

Otro costo que influye de manera drástica es el de transporte, en su caso se usará un factor de \$/ton-km proporcionado por la SCT. Este costo asciende a los \$0.001 (Actualizados al 2016) y este factor debe ser multiplicado por la distancia que recorrerá el aguacate transportado, razón por la cual es imprescindible el uso de tablas que indiquen las distancias entre los huertos y los empaques, así como las distancias entre los empaques y los mercados.

Para lo anterior debe tenerse en cuenta que existen en Michoacán 16 zonas de empaque que acaparan casi todo el aguacate producido. Por otro lado, las zonas a las cuales serán transportados los aguacates serán las fronterizas o puertos de embarque para la exportación, así como los principales mercados de abasto para el mercado nacional.

Se contempla que las zonas de empaque cuentan con centros de procesamiento. Estas zonas de empaque y los lugares a los cuales se transportarán, así como la distancia que hay entre ellos se muestran en la **Tabla 1.17**.

Tabla 1.17. Distancia entre zonas de empaques y puntos de distribución.

	Nacional Norte	Nacional Centro	Nacional Sur	Sur América	Europa/Asia	Norte América
Empaque/Destino	Monterrey	CDMX	Villahermosa	Mérida	Lázaro Cárdenas	Ciudad Juárez
Uruapan	933.3	404.8	1157	1709	232	1731
San Juan Parangaricutiro	982.2	417.7	1170	1722	246.2	1744
Tancítaro	988.1	459.6	1212	1763	234	1663
Patzcuaro	882.6	354.1	1106	1658	263.2	1681
Tingüindín	857.9	483.5	1235	1787	323	1602
Tacámbaro	932.1	403.6	1154	1707	311	1729
Salvador Escalante	895.7	367.2	1118	1671	275	1692
Peribán	888.8	468.5	1220	1772	296	1634
Parácuaro	810	257	1010	1561	380	1609
Tangamandapio	837	459.7	1211	1764	352	1581
Nuevo Parangaricutiro	946.2	417.7	1170	1722	246	1744
Villa Madero	884.4	367.5	1108	1671	313	1683
Acuitzio	866.9	350	1091	1654	295	1665
Ario de Rosales	923.9	395	1146	1699	232	1721
Jungapeo	874.2	184.4	935	1488	476	1747
Tocumbo	868	492	1243	1796	320	1613
Ziracuaretiro	919.8	391.3	1143	1695	223	1718

Finalmente deben considerarse los precios de venta, estos fluctúan demasiado pero para fines del proyecto se analizó el promedio histórico y los datos proporcionados por las instituciones que manejan el negocio del aguacate.

Para el mercado de exportación se analizó el histórico del precio de venta en cada zona proporcionado por el anuario de la FAO (2016), el cual contempla las toneladas exportadas a cada zona, mientras que para el mercado nacional y el de la industria se proporcionan datos del portal del productor de aguacate (APEAM, 2016). Los precios se muestran en la **Tabla 1.18**.

Tabla 1.18: Precios de venta.

Mercado	Precio de venta
Norte América	1.7
Latinoamérica	1.6
Asia	2
Europa	1.7
Norte de México	1.1
Centro de México	1
Sur de México	1.05
Guacamole	0.937
Aceite de aguacate	0.937

1.7 Impacto ambiental

La producción de cualquier producto genera un impacto al medio ambiente, y este impacto es producido desde la fabricación, distribución, embalaje y hasta eliminarse. Para analizar el impacto que produce cualquier producto debe tenerse en cuenta todas las etapas de su ciclo de vida.

El cálculo del impacto ambiental puede ser calculado por medio de eco-indicadores, los cuales expresan el impacto ambiental de un proceso o producto por medio de un valor el cual carece de dimensiones pero sirve para comparar un proceso con otro. Para el cálculo del impacto ambiental generado en el negocio del aguacate se usará la metodología del eco-indicador 99. Para poder emplear dicha metodología se debe limitar el proceso a estudiar, por lo cual y para efectos del presente estudio iniciara desde la instalación del huerto hasta que el producto llegue al mercado correspondiente.

Dicho eco indicador 99 considera tres daños principales:

- a) Daños a la salud humana: Este efecto contempla el número y la longevidad de enfermedades, los años de vida perdidos por causas ambientales, y contempla los efectos al cambio climático, la disminución de la capa de ozono, efectos cancerígenos, respiratorios y por radiación ionizante.

- b) Daños a la calidad del medio ambiente: Esta categoría incluye el efecto sobre la flora y fauna, y los daños incluidos en este apartado contemplan la eco-toxicidad, la acidificación, eutrofización y el uso de suelo.
- c) Daño a los recursos: Aquí se contemplan los daños futuros a los recursos minerales y fósiles, contemplando la disminución de estos.

Para el cálculo del impacto ambiental se tienen contemplados diferentes procesos productivos y para cada caso se tienen contemplados diferentes daños. Cada proceso se contempla de manera diferente: Para la producción de aguacate, guacamole y aceite se considera por tonelada producida, mientras que para el transporte se considera un impacto por ton-km. Cada daño para cada proceso productivo se enlista las cantidades proporcionadas por la base de datos ECOINVENT para calcular el daño producido, y el cálculo se realiza con la metodología ECO-indicador 99. Los daños producidos por cada proceso se muestran en la **Tabla 1.19**.

Cuadro 1.9. Valores de los daños de impacto ambiental

Daño\Proceso	Aguacate	Aceite	Guacamole	Transporte
Calidad del ecosistema	Cantidad	Cantidad	Cantidad	Cantidad
Acidificación y eutrofización	1.5933	1.8499	5.4725	7.97E-05
Eco toxicidad	2.3073	6.3536	3.7072	0.0005956
Ocupación de la tierra	91.586	1338.7	372.78	0.0006362
Salud Humana				
Efectos carcinógenos	95.487	15.156	12.698	0.0001918
Cambio climático	28.403	6.8462	7.9488	0.0004797
Radiación ionizante	0.38193	0.056657	0.020219	3.97E-06
Destrucción de la capa de ozono	0.00124	0.0013326	0.0016821	4.72E-07
Efectos respiratorios	29.314	79.047	27.768	0.0008736
Recursos				
Combustibles fósiles	14.36	25.663	15.923	0.0045822
Extracción de minerales	0.91708	28.439	1.4129	2.09E+00

2. JUSTIFICACIÓN

El sector agrícola es el principal consumidor de agua; por otro lado, la demanda del aguacate michoacano ha tenido un crecimiento acelerado debido al gusto y aceptación de los consumidores, razón por la cual tiene un impacto económico y social considerable.

En los últimos años, la quema de bosques y el cambio de uso de suelo para la producción de aguacate han generado un impacto ambiental y social negativo. Michoacán tiene un vasto territorio dedicado a la siembra de aguacate y la tendencia va al alza, por lo cual lograr un incremento en los rendimientos arrojará un gran impacto económico en el estado.

Lo anterior va aunado al problema de la tecnificación de riego en la región, puesto que sólo una parte cuenta con algún sistema de riego. Los sistemas de riego suelen incrementar el rendimiento por hectárea hasta en un 25%, aunque este porcentaje varía en función de los factores climatológicos de cada distrito.

La existencia de este proyecto se basa en la generación de una estructura que permita reducir la expansión acelerada del territorio destinado a los huertos de aguacate, haciendo un uso eficiente del agua mediante la implementación de sistemas de riego, calculando los requerimientos hídricos necesarios en cada región y al mismo tiempo localizando los nuevos territorios destinados a la producción del aguacate, considerando a su vez el impacto ambiental causado por la producción, distribución y procesamiento del mismo, todo lo anterior con el objetivo de incrementar el beneficio generado en el negocio y minimizando así el impacto ambiental.

3. HIPÓTESIS

La aplicación de un modelo de optimización multi-objetivo que considere aspectos técnicos, económicos y ambientales, permitirá planificar la producción de aguacate en función de la creciente demanda y maximizar los beneficios, reduciendo el impacto ambiental haciendo un uso eficiente del agua.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Desarrollar un sistema de optimización multi-objetivo que permita maximizar la ganancia por la producción y venta de aguacate, y al mismo tiempo minimice los insumos de agua, lo anterior considerando aspectos económicos y ambientales.

4.2. Objetivos específicos

- I. Desarrollar un sistema de optimización multi-objetivo que permita maximizar las ganancias en el negocio del aguacate y minimice los consumos de agua en los huertos.
- II. Planear óptimamente la producción de aguacate en función de las demandas y la disponibilidad del territorio.
- III. Determinar la factibilidad económica del uso de sistemas de riego.
- IV. Analizar el impacto ambiental debido al crecimiento de los huertos de aguacate.

5. MARCO TEÓRICO

El problema del uso adecuado del agua para la agricultura ha sido anteriormente estudiado, varios autores proponen diferentes soluciones para el problema; una solución propone un modelo de optimización basado en estrategias de programación disyuntiva para reusar, almacenar, y distribuir de manera óptima el agua previamente alimentada proveniente de zonas superficiales, subterráneas, mantos acuíferos y colección pluvial, y al mismo tiempo minimizar los costos de riego (Arredondo-Ramirez, K., et al., 2013).

Por otro lado, se hicieron trabajos del diseño simultáneo de sistemas de reutilización de agua y de recolección de agua de lluvia en un complejo residencial para minimizar el consumo de agua fresca y el costo anual total (García-Montoya , M. et al., 2015).

Se ha estudiado además la gestión sostenible del agua para los sistemas macroscópicos, considerando la posibilidad de utilizar fuentes alternativas, como el agua de lluvia y la regenerada para mejorar la sostenibilidad de los cuerpos de agua naturales. Además, se analizó la búsqueda de un mejor esquema para la distribución y el almacenamiento de las fuentes naturales y alternativas para satisfacer las demandas de los diferentes usuarios en un sistema macroscópico, es decir, los usuarios domésticos y agrícolas (Nápoles-Rivera, F., et al., 2013).

Incluso se desarrollaron algunos modelos que incluyen todas las configuraciones en términos de uso, reutilización y regeneración de agua en un campo constituido por una serie de campos de cultivo. El modelo también incluye la asignación de tuberías, bombas y tanques de almacenamiento en diferentes períodos de riego. La función objetivo consiste en maximizar el beneficio anual que está formado por los ingresos económicos, debido a la venta de cultivos, menos los gastos de agua fresca, fertilizantes, tanques de almacenamiento, unidades de tratamiento, tuberías y bombeo (Rubio-Castro, E., et al., 2016).

Así mismo se estudiaron las redes de agua teniendo en cuenta la sostenibilidad de la cuenca circundante, considerando al mismo tiempo la integración del sistema de red de agua y los alrededores de cuencas a proceso, así como se ha hecho un análisis de rentabilidad y los costos de cultivo de los fenómenos naturales que afectan a la composición de la cuenca (Lira-Barragán, L. F., et al., 2011).

La SE (Secretaría de Economía, 2012) realizó una estimación de las tierras dedicadas al cultivo de aguacate en el país, especialmente en el estado de Michoacán, así como la modalidad de cultivo de esas tierras hasta el año 2010, y encontró que los rendimientos en la modalidad de riego son en promedio 25% superiores a los de la modalidad de temporal, para esto se basó en los rendimientos históricos desde el año 1980 hasta el año 2010.

Carr, M. K. V. (2013) estudió la relación entre los requerimientos de agua y la productividad del aguacate, para lo cual analizó el ciclo productivo del mismo encontrando factores de evapotranspiración oscilantes entre 0.4 y 0.6, estimando que el aguacate puede verse favorecido con suministros adecuados de agua por medio de goteo y micro aspersores entre 1 y 2 kg de fruto cada metro cúbico de suelo irrigado.

Por otra parte, se llevó a cabo un análisis de rentabilidad y de los costos de cultivo, en el cual se analizaron varios cultivos de aguacate. Se examinó la tecnología de producción, los rendimientos, los costos asociados, los sistemas de riego, el periodo del año en el cual se efectúa el riego y el porcentaje de este en función del periodo (Dirección de Consultoría en Agronegocio, 2007).

Igualmente se analizan las demandas de riego localizado por micro irrigación, aplicando al cultivo una clase de riego más localizado, minimizando el volumen de suelo humedecido, reduciendo con ello las pérdidas de agua por evaporación y finalmente los intervalos de riego. Dentro de la micro irrigación se incluyen todos los medios que se requieren para los sistemas de goteo, micro aspersión, nebulización, atomización, etc., considerando el volumen de agua requerida, la evapotranspiración, los intervalos de riego y los factores climáticos y del medio. Este tipo de sistemas además de aplicar el agua a los cultivos con gran eficiencia, mejora alguna otra característica del medio (SARGAPA, 2012).

Desde otra perspectiva, se ha analizado el comportamiento de los árboles de aguacate Hass bajo diferentes regímenes de riego, manipulando la frecuencia del riego por goteo y el volumen de la raíz. Los tratamientos experimentales tuvieron poco efecto sobre el crecimiento vegetativo, la floración o procesos de cuajado, sin embargo, hubo diferencias significativas en el tratamiento de la abscisión de fructificación y en consecuencia, sobre el rendimiento de la fruta (Silber, Y. I., et al., 2011).

Amir, I., & Fisher F.M., (1999) presentaron un modelo de optimización lineal para analizar la producción agrícola bajo diversas cantidades de agua, cualidades, plazos, precios

y políticas de precios. El modelo está formulado de manera general para la toma de decisiones hacia los planificadores de la producción agrícola a nivel distrital y nacional. Las soluciones de salida proporcionan la combinación óptima de actividades de consumo de agua para maximizar los ingresos netos de la producción agrícola de los distritos y las demandas de agua bajo diversos precios. También, presenta la formulación del modelo, indicando y analizando los problemas de linealidad y escalamiento, así como las medidas emprendidas para examinarla y verificarla.

Por último, Bravo-Espinoza et al. (2012) evaluaron los cambios en la cobertura de la tierra y el uso de esta entre 2003 y 2008 en la subcuenca del Río Cupatitzio ubicada en el Sistema Volcánico Transversal Mexicano y Depresión de Balsas en México. Para los años 1975, 2003 y 2008, se construyeron bases de datos sobre la cobertura de la tierra y el uso de esta utilizando los datos cartográficos disponibles. Los resultados mostraron que las áreas boscosas en esa zona desaparecieron entre el año 1975-2008 a una tasa de 553 ha/año, mientras que las tierras destinadas a la producción de aguacate crecieron a una tasa de 1001 ha/año. La producción frutícola en Michoacán repuntó de manera significativa de 1980 a 2009. Este incremento se ha visto significativamente reflejado en el valor de la producción, registrándose que las frutas generaron en valor real, 12 mil millones de pesos en 2009 (pesos constantes de 2003), cuando en 1980 su valor era de 2 mil millones de pesos.

Por otro lado, en 2011, los costos promedio por hectárea oscilaban en promedio, entre \$69,600 y \$75,500 en huertas comerciales, sin embargo, estos costos pueden variar mucho, dependiendo del tipo de sistema productivo y la fuente de los datos (De la Tejera-Hernández et al., 2013).

A razón de lo expuesto, este trabajo sugiere una solución diferente al problema, planteando una optimización multi-objetivo, minimizando el uso de agua en la región aguacatera de Michoacán, en el cual se optimiza la localización de los almacenes de agua en función de la ubicación de las cuencas o suministros de agua fresca y considerando con ello la colección pluvial, la optimización de su ubicación y tamaño, contemplando además el sistema de riego eficiente para la producción de aguacate y a la vez minimizando el impacto ambiental. Finalmente, se analizará la posibilidad de emplear los sistemas de riego compartido para minimizar los costos de producción.

6. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del proyecto se ha propuesto una secuencia de pasos a seguir. En primera instancia, debe de plantearse el problema en su totalidad considerando todos los aspectos influyentes. Subsecuentemente, se hace una superestructura que describa gráficamente el problema. Posterior, se formula el modelo matemático y finalmente se prosigue con la obtención de resultados y el análisis de los mismos.

6.1 Definición del problema

El cultivo de aguacate en el estado de Michoacán, México, ha aumentado dramáticamente y sin ningún control en los últimos años, lo que ha producido un gran beneficio económico, pero a su vez, ha causado daños ambientales significativos.

En Michoacán hay 49 distritos productores de aguacate con diferentes potencialidades productivas; los nuevos huertos de aguacate han causado graves problemas asociados a la escasez de agua, además se le ha relacionado con la desaparición de algunas especies de flora y fauna endógena, esto debido al cambio de uso de la tierra, así como del empleo de fertilizantes y pesticidas. Por lo que es necesaria una adecuada planificación estratégica para el cultivo del aguacate que satisfaga las demandas del mercado maximizando el beneficio económico, pero teniendo en cuenta los recursos disponibles.

Dicha planificación debe considerar las tierras disponibles para el cultivo de aguacate en los diferentes municipios del estado, el agua disponible, las condiciones climáticas de cada municipio, el costo de transporte, el costo de almacenamiento, la instalación del nuevo costo de área, los costos de cultivo y el consumo de agua. Además, la planificación estratégica debe considerar la logística asociada para determinar dónde instalar nuevos huertos y nuevos centros.

En virtud de lo señalado en este trabajo, para proporcionar una planificación estratégica adecuada, se propone un enfoque de optimización para el cultivo, almacenamiento y distribución apropiados del aguacate en el estado, el uso eficiente del agua y la instalación de huertos en los lugares adecuados.

6.2. Superestructura

En la **Figura 6.1** puede observarse la superestructura que representa la problemática planteada. Aquí, se puede apreciar que la producción del aguacate es regulada por la demanda creciente y la disponibilidad de área. La superestructura considera una planeación del terreno a usar, en la cual se considera la ubicación óptima para disminuir los costos de transporte del huerto al empaque y del empaque al mercado, la ubicación óptima para disminuir el consumo de agua, atenuar o evitar la destrucción forestal, minimizar el impacto ambiental y a su vez, maximizar el beneficio económico en el estado.

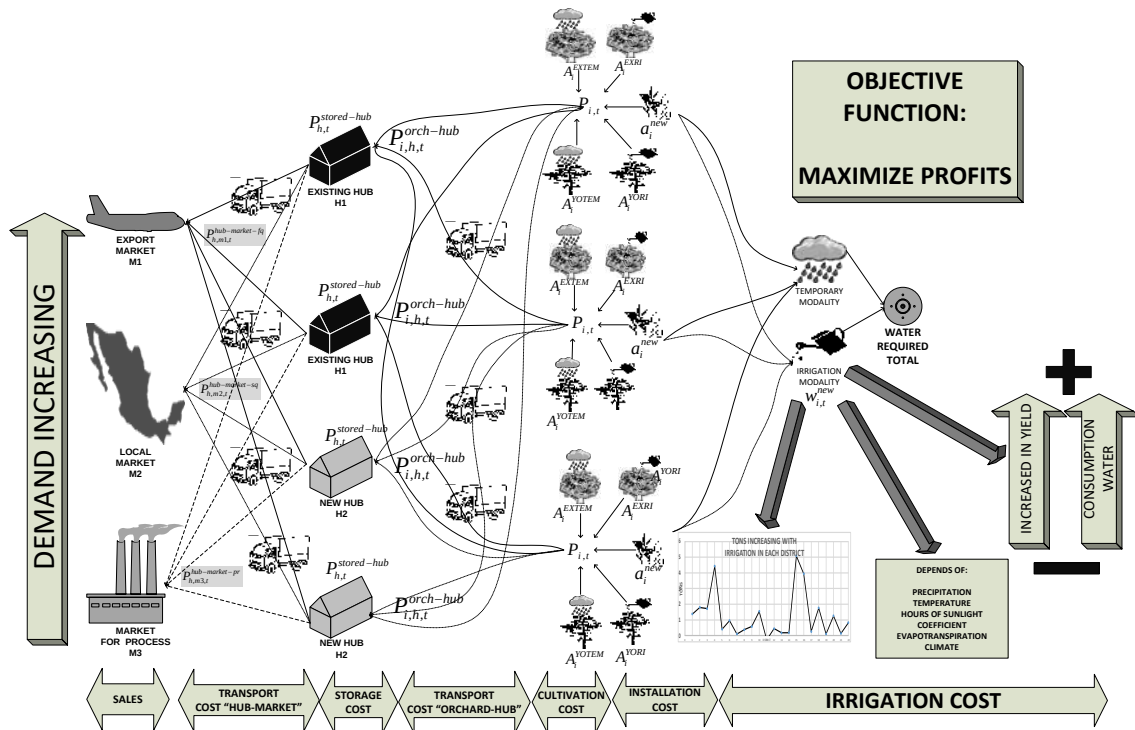


Figura 6.1. Superestructura del proyecto.

6.3. Modelo matemático

En primer lugar, la tierra utilizable se divide en distritos, donde se considera la porción que está libre para el cultivo de aguacate, así como el agua disponible, las condiciones climáticas y la infraestructura asociada. Además, se consideran los huertos existentes, lo que explica la edad de estos huertos que afecta su productividad. Luego, el

modelo debe determinar los nuevos huertos en cada municipio, la distribución del aguacate, los consumos de agua y los impactos ambientales mientras que maximiza el beneficio total. El modelo se describe a continuación:

6.3.1. Uso de tierra

La tierra usada para el cultivo del aguacate en cada distrito i (a_i) es igual al área existente en la modalidad temporal (A_i^{EXTEM}) más el área existente en la modalidad de riego (A_i^{EXRI}), más el área de huertos jóvenes en modalidad temporal que aún no producen (A_i^{YOTEM}) más el área de huertos jóvenes en modalidad de riego que aún no producen (A_i^{YORI}) más el área nueva de producción en cada distrito i (a_i^{new}):

$$a_i = A_i^{EXTEM} + A_i^{EXRI} + A_i^{YOTEM} + A_i^{YORI} + a_i^{new}, \quad \forall i \quad (6.1)$$

Por otro lado, la nueva área (a_i^{new}) debe ser menor o igual que un área potencial de instalación (A_i^{POT}) si es que está existe (y_i^{new}):

$$a_i^{new} \leq A_i^{POT} y_i^{new}(i), \quad \forall i \quad (6.2)$$

La nueva área (a_i^{new}) es igual a la nueva con sistema de riego más la nueva sin sistema de riego (a_i^{newtem}):

$$a_i^{new} = a_i^{newir} + a_i^{newtem}, \quad \forall i, \quad \forall i \quad (6.3)$$

El modelo sólo debe de instalar área nueva en una de las dos modalidades, sea en modo temporal (y_i^{newtem}) o con sistema de riego (y_i^{newir}) si es que existe el área nueva (y_i^{new}) por lo cual tenemos:

$$y_i^{new} = y_i^{newtem} + y_i^{newir}, \quad \forall i \quad (3.4)$$

Y de la misma forma la nueva área con sistema de riego (a_i^{newir}) debe ser menor que un área potencial si es que existe ($A_i^{POT} y_i^{newir}$):

$$a_i^{newir} \leq A_i^{POT} y_i^{newir}, \quad \forall i \quad (6.5)$$

También el área instalada en modalidad temporal debe ser menor que el área potencial:

$$a_i^{newtem} \leq A_i^{maxtem} y_i^{newtem}, \quad \forall i \quad (6.6)$$

6.3.2. Consumos hídricos

El agua requerida para cada huerto existente ($w_{i,t}^{exist}$) depende de un factor ($\beta_{i,t}^{extem}, \beta_{i,t}^{extir}, \beta_{i,t}^{yotem}, \beta_{i,t}^{yori}$) que a su vez pende de cada distrito y de la edad del huerto, así como del área existente correspondiente en cada distrito:

$$w_{i,t}^{exist} = \beta_{i,t}^{extem} A_i^{extem} + \beta_{i,t}^{extir} A_i^{extir} + \beta_{i,t}^{yotem} A_i^{yotem} + \beta_{i,t}^{yori} A_i^{exri} \quad \forall i, \forall t \quad (6.7)$$

De la misma manera, el agua que consumirán los nuevos huertos ($w_{i,t}^{new}$) dependen de un factor que depende del distrito y edad ($\beta_{i,t}^{newir}, \beta_{i,t}^{newtem}$) y del área nueva ($a_i^{newir}, a_i^{newtem}$):

$$w_{i,t}^{new} = \beta_{i,t}^{newir} a_i^{newir} + \beta_{i,t}^{newtem} a_i^{newtem} \quad \forall i, \forall t \quad (6.8)$$

El agua requerida para cada distrito ($w_{i,t}^{tot-mun}$) debe ser igual a la suma del agua que consumen los huertos existentes ($w_{i,t}^{exist}$) y la que consumen los nuevos distritos

($w_{i,t}^{new}$):

$$w_{i,t}^{tot-mun} = w_{i,t}^{exist} + w_{i,t}^{new} \quad \forall i, \forall t \quad (6.9)$$

El agua total consumida en el estado es igual a la sumatoria de todos los consumos de cada distrito para cada año del proyecto ($\sum_i \sum_t w_{i,t}^{tot-mun}$):

$$w_{i,t}^{tot} = \sum_i \sum_t w_{i,t}^{tot-mun} \quad (6.10)$$

6.3.3 Producción de aguacate

La producción de aguacate en cada municipio y en cada año ($P_{i,t}$) es igual a la suma de la producción actual de aguacate de los huertos existentes que ya producen en ambas modalidades, más la producción de los huertos jóvenes en ambas, más la producción de los huertos nuevos.

La producción se calcula multiplicando el área de cada distrito (A_i^{EXTEM} , A_i^{EXRI} , A_i^{YOTEM} , A_i^{YORI} , a_i^{newtem} , a_i^{newwir}) por su factor correspondiente de producción ($\alpha_{i,t}^{EXTEM}$, $\alpha_{i,t}^{EXRI}$, $\alpha_{i,t}^{YOUNGTEM}$, $\alpha_{i,t}^{YOUNGRI}$, $\alpha_{i,t}^{newwir}$, $\alpha_{i,t}^{newtem}$), el cual considera el rendimiento promedio de cada distrito y sigue un comportamiento en función de la edad del huerto, el cual incrementa hasta la madurez y decrece al hacerse viejo:

$$P_{i,t} = \alpha_{i,t}^{EXTEM} * A_i^{EXTEM} + \alpha_{i,t}^{EXRI} * A_i^{EXRI} + \alpha_{i,t}^{YOUNGTEM} * A_i^{YOTEM} + \alpha_{i,t}^{YOUNGRI} * A_i^{YORI} + \alpha_{i,t}^{newwir} * a_i^{newwir} + \alpha_{i,t}^{newtem} * a_i^{newtem}, \quad \forall i, \forall t \quad (6.11)$$

6.3.4 Distribución del aguacate del huerto al empaque

Para la distribución del aguacate se considera inicialmente que debe ser enviado del huerto donde se produce a las zonas de empaque. Por esta razón, el aguacate ya producido en cada distrito por año ($P_{i,t}$) debe ser enviado al empaque que sea más factible, y todo el producido deberá ser igual al aguacate transportado del huerto i al empaque h ($P_{i,h,t}^{orch-hub}$):

$$P_{i,t} = \sum_h P_{i,h,t}^{orch-hub}, \quad \forall i, \quad \forall t, \quad (6.12)$$

Por otro lado, el aguacate que se transporte de los huertos a los empaques debe ser almacenado y maquilado en los empaques ($P_{h,t}^{stored-hub}$), y el producto transportado debe ser igual al almacenado:

$$P_{h,t}^{stored-hub} = \sum_i P_{i,h,t}^{orch-hub}, \quad \forall h, \quad \forall t \quad (6.13)$$

De la misma forma, el aguacate almacenado en los empaques ($P_{h,t}^{stored-hub}$) es igual al que irá al mercado ($P_{h,t}^{tot-hub-market}$):

$$P_{h,t}^{stored-hub} = P_{h,t}^{tot-hub-market}, \quad \forall h, \quad \forall t \quad (6.14)$$

El aguacate es clasificado como de primera, segunda o calidad de proceso. Para la distribución del aguacate que irá a los mercados debe ser multiplicado por un factor que indica la fracción del total que cumple con las características del mercado destinado y el excedente puede ser enviado a un mercado con requerimientos de calidad inferior.

Para el aguacate de primera calidad tenemos que el total este para cada año debe de ser multiplicado por la fracción del total que cumple con las características ($\beta^{fq} P_{h,t}^{tot-hub-market}$), este es igual al producto que irá del empaque a cada mercado de primera calidad en cada año ($P_{h,m1,t}^{hub-market-fq}$), y el excedente se envía al consumo del mercado de segunda calidad ($D_{h,m2,t}^{cull-fs}$):

$$\beta^{fq} P_{h,t}^{tot-hub-market} = \sum_{m1} P_{h,m1,t}^{hub-market-fq} + \sum_{m2} D_{h,m2,t}^{cull-fs}, \quad \forall h, \quad \forall t \quad (6.15)$$

Para el Mercado de segunda calidad será enviado aquel que cumpla con las características ($\beta^{sq} P_{h,t}^{tot-hub-market}$) además del excedente del de primera calidad ($\sum_{m2} D_{h,m2,t}^{cull-fs}$), y el sobrante será enviado al mercado de proceso de aguacate ($\sum_{m3} D_{h,m3,t}^{cull-sp}$):

$$\beta^{sq} P_{h,t}^{tot-hub-market} + \sum_{m2} D_{h,m2,t}^{cull-fs} = \sum_{m2} P_{h,m2,t}^{hub-market-sq} + \sum_{m3} D_{h,m3,t}^{cull-sp}, \quad \forall h, \quad \forall t \quad (6.16)$$

Para el Mercado de proceso deberá ser enviado el excedente del aguacate de segunda calidad ($\sum_{m3} D_{h,m3,t}^{cull-sp}$) más la fracción que cumple con los requisitos del aguacate para proceso ($P_{h,t}^{tot-hub-market} \beta^{process}$):

$$\beta^{process} P_{h,t}^{tot-hub-market} + \sum_{m3} D_{h,m3,t}^{cull-sp} = \sum_{m3} P_{h,m3,t}^{hub-market-process}, \quad \forall h, \quad \forall t \quad (6.17)$$

6.3.5 Producto en Mercado en función de la demanda

El aguacate de primera calidad en mercados ($P_{m1,t}^{market,fq}$) es igual al transportado de cada empaque a cada mercado de primera calidad ($P_{h,m1,t}^{hub-market-fq}$):

$$P_{m1,t}^{market,fq} = \sum_h P_{h,m1,t}^{hub-market-sq}, \quad \forall m1, \quad \forall t \quad (6.18)$$

El aguacate en mercados de segunda calidad ($P_{m2,t}^{market,sq}$) es igual a todo el que se distribuye de cada empaque a cada mercado de segunda calidad ($P_{h,m2,t}^{hub-market-sq}$):

$$P_{m2,t}^{market,sq} = \sum_h P_{h,m2,t}^{hub-market-sq}, \quad \forall m2, \quad \forall t \quad (6.19)$$

El aguacate en cada mercado de proceso ($P_{m3,t}^{market,process}$) es igual al distribuido de cada empaque a cada mercado de proceso ($P_{h,m3,t}^{hub-market-process}$).

Por otro lado, el aguacate en cada Mercado debe ser menor a su demanda

($P_{m1,t}^{Demand-fq}$, $P_{m2,t}^{Demand-sq}$, $P_{m3,t}^{Demand-process}$):

$$P_{m1,t}^{market-fq} \leq P_{m1,t}^{Demand-fq}, \quad \forall m1, \quad \forall t \quad (6.20)$$

$$P_{m2,t}^{market-sq} \leq P_{m2,t}^{Demand-sq}, \quad \forall m2, \quad \forall t \quad (6.21)$$

$$P_{m3,t}^{market-process} \leq P_{m3,t}^{Demand-process}, \quad \forall m3, \quad \forall t \quad (6.22)$$

6.3.6. Costos y ventas

El modelo considera varios costos: El cultivo, de maquila, de transporte, y las ventas en cada mercado.

6.3.7. Costo de cultivo

El costo de cultivo es igual a la suma de todas las áreas involucradas en la producción del aguacate multiplicado por su costo anual de producción, más el costo debido a la instalación de nuevos huertos en cada modalidad, además de un costo fijo debido al acondicionamiento de huertos nuevos, sea cual sea la modalidad. El costo es actualizado con un factor de anualización que depende la inflación:

$$\begin{aligned} Cost^{cult} = & \sum_i \sum_t (uc_{i,t}^{cult-tem} A_i^{EXTEM} NPV_t + uc_{i,t}^{cult-ir} A_i^{EXRI} NPV_t) \\ & + \sum_i \sum_t (uc_{i,t}^{cult-tem} A_i^{YOTEM} NPV_t + uc_{i,t}^{cult-ir} A_i^{YORI} NPV_t) \\ & + k_f \sum_i \left((uc_i^{new-areatem} a_i^{newtem} + fc_i^{new-areatem} a_i^{newtem}) + (uc_i^{new-areair} a_i^{newir} + fc_i^{new-areair} a_i^{newir}) \right) \end{aligned} \quad (6.23)$$

6.3.8. Costo de empaque

El costo asociado al empaque y maquila del aguacate es igual al de maquila de cada tonelada, multiplicado por las toneladas de aguacate tratadas en cada empaque por cada año:

$$Cost^{hubs} = \sum_h \sum_t \sum_i u c_h^{stored} P_{i,h,t}^{orch-hub} NPV_t \quad (6.24)$$

6.3.9. Costo de transporte

El costo asociado al transporte es de los más significativos y considera el precio de llevar cada tonelada de aguacate de cada distrito al empaque, y el costo que se genera al transportar cada tonelada enviada de los empaque a los mercados, considerando que para la exportación es enviado a los puertos o zonas fronterizas y que el costo de su traslado dentro de cada país de destino no es considerado dentro del proyecto. Dicho costo es calculado multiplicando las toneladas enviadas entre huertos-empaques y empaque-mercado, por la distancia entre las zonas de envío y un factor ton/km.

$$\begin{aligned} Cost^{Transp} = & \sum_i \sum_h \sum_t u T_{i,h,t}^{cost-orch-hub} D_{I-H} P_{i,h,t}^{orch-hub} NPV_t \\ & + \sum_h \sum_{m1} \sum_t u T_{h,m1}^{cost-hub-market-fq} D_{H-M1} P_{h,m1,t}^{hub-market-fq} NPV_t \\ & + \sum_h \sum_{m2} \sum_t u T_{h,m2}^{cost-hub-market-sq} D_{H-M2} P_{h,m2,t}^{hub-market-sq} NPV_t \\ & + \sum_h \sum_{m3} \sum_t u T_{h,m3}^{cost-hub-market-process} D_{H-M3} P_{h,m3,t}^{hub-market-process} NPV_t \end{aligned} \quad (6.25)$$

6.3.10. Ventas

El valor generado por las ventas totales es igual a la suma de todo el aguacate vendido en mercados de primera calidad, más el vendido en mercados de segunda calidad, adicionando el aguacate procesado y vendido. Igualmente, que los costos, las ventas deben de ser analizadas con el factor de anualización.

$$\begin{aligned}
Sales = & \sum_{m1} \sum_t uc_{m1}^{prod-fq} P_{m1,t}^{market-fq} NPV_t \\
& + \sum_{m2} \sum_t uc_{m2}^{prod-sq} P_{m2,t}^{market-sq} NPV_t \\
& + \sum_{m3} \sum_t uc_{m3}^{prod-process} P_{m3,t}^{market-process} NPV_t
\end{aligned} \tag{6.26}$$

6.3.11. Beneficio

El beneficio total generado por el negocio del aguacate es igual al valor generado por las ventas menos los costos de cultivo, empaque y distribución de este.

$$profit = Sales - Cost^{Transp} - Cost^{hubs} - Cost^{Cult} \tag{6.27}$$

6.3.12. Impacto ambiental

De una manera aledaña al modelo de producción se analizara como varía el impacto ambiental debido a las actividades referentes al negocio del aguacate, y para esto se usará el ECO-INIDICADOR 99.

El impacto ambiental total es igual al impacto de la producción de aguacate ($ei_{AVOPROD}$). Además del impacto del transporte de los huertos a los centros de acopio ($ei_{AVOPROD}$), el impacto del transporte desde dichos centros a cada mercado ($ei_{TRANSPORT-H-M}$), más el impacto ambiental de la producción de guacamole ($ei_{GUACAMOLE}$), adicionando el impacto de la producción de aceite de aguacate (ei_{OIL}).

$$ei_{TOTAL} = ei_{AVOPROD} + ei_{TRANSPORT-O-H} + ei_{TRANSPORT-H-M} + ei_{GUACAMOLE} + ei_{OIL} \tag{6.28}$$

Para calcular cada uno de los impactos ambientales previos es necesario considerar el impacto del daño a la salud humana ($d_{HUMAN-HEALTH}$), al ecosistema ($d_{ECOSYSTEM}$) y a los recursos naturales ($d_{RESOURCES}$).

En cada daño deben ser analizados muchos factores, para el daño a la salud humana se debe contemplar el efecto carcinógeno en los seres humanos (D^{CARC}), efectos respiratorios causados por sustancias orgánicas e inorgánicas (D^{RESPI}), daños en la salud humana causados por radiaciones ionizantes (D^{ION}), efectos en la salud provocados por el agotamiento de la capa de ozono (D^{OZ}) y daños a la salud humana causados por el cambio climático (D^{CLIM}).

Por daños a la calidad de los ecosistemas se deben considerar aquellos causados por las emisiones eco-tóxicas (D^{ECOTOX}), el daño causado por los efectos combinados de la acidificación sobre la eutrofización (D^{ACID}) y aquellos causados por la ocupación de la tierra y la conversión de esta (D^{LAND}).

Finalmente se considera el daño a los recursos, contemplando el daño causado por la extracción de minerales ($D^{MINERAL}$) y aquel causado por la extracción de combustibles fósiles (D^{FUEL}).

El impacto ambiental por la producción de aguacate es igual a la suma del impacto de los daños a la salud humana, al ecosistema y a los recursos naturales:

$$ei_{AVOPROD} = d_{HUMAN-HEALTH}^{AVOPROD} + d_{ECOSYSTEM}^{AVOPROD} + d_{RESOURCES}^{AVOPROD} \quad (6.29)$$

Dado que los factores se asignan a l Ton de aguacate, para calcular el daño en la salud humana se deben sumar todos los factores multiplicados por la producción en cada distrito i durante el período t :

$$\begin{aligned} d_{HUMAN-HEALTH}^{AVOPROD} = & \sum_i \sum_t p_{i,t} D_{AVOPROD}^{CARINOGENIC} + \sum_i \sum_t p_{i,t} D_{AVOPROD}^{RESPI} \\ & + \sum_i \sum_t p_{i,t} D_{AVOPROD}^{ION} + \sum_i \sum_t p_{i,t} D_{AVOPROD}^{OZ} + \sum_i \sum_t p_{i,t} D_{AVOPROD}^{CLIM} \end{aligned} \quad (6.30)$$

De la misma manera, el daño en la calidad del ecosistema por la producción de aguacate debe sumar todos los factores multiplicados por la producción en cada distrito i durante el período t :

$$d_{ECOSYSTEM}^{AVOPROD} = \sum_i \sum_t p_{i,t} D_{AVOPROD}^{ECOTOX} + \sum_i \sum_t p_{i,t} D_{AVOPROD}^{ACID} + \sum_i \sum_t p_{i,t} D_{AVOPROD}^{LAND} \quad (6.31)$$

El daño en los recursos por la producción de aguacate debe sumar todos los factores multiplicados por la producción en cada distrito i durante el período t .

$$d_{RESOURCES}^{AVOPROD} = \sum_i \sum_t p_{i,t} D_{AVOPROD}^{FUEL} + \sum_i \sum_t p_{i,t} D_{AVOPROD}^{MINERAL} \quad (6.32)$$

Por otro lado, se debe considerar el impacto medio-ambiental del transporte del aguacate desde el huerto hasta los centros de distribución, que debe incluir el impacto del daño a la salud humana, los daños al ecosistema y los daños a los recursos naturales:

$$ei_{TRANSPORT-O-H} = d_{HUMAN-HEALTH}^{TRANSPORT-O-H} + d_{ECOSYSTEM}^{TRANSPORT-O-H} + d_{RESOURCES}^{TRANSPORT-O-H} \quad (3.33)$$

En cada tipo de daño deben tenerse en cuenta todos los factores involucrados multiplicados por la producción y la distancia entre huertos y cubos, ya que el factor de daño se da en ton / km. Por los daños en la salud humana en el transporte de aguacate desde huertos hasta los empaques en cada distrito:

$$d_{HUMAN-HEALTH}^{TRANSPORT-O-H} = \sum_i \sum_h \sum_t p_{i,t} D_{Transport}^{CARC} D_{i,h} + \sum_i \sum_h \sum_t p_{i,t} D_{Transport}^{RESPI} D_{i,h} \\ + \sum_i \sum_h \sum_t p_{i,t} D_{Transport}^{ION} D_{i,h} + \sum_i \sum_h \sum_t p_{i,t} D_{Transport}^{OZ} D_{i,h} + \sum_i \sum_h \sum_t p_{i,t} D_{Transport}^{CLIM} D_{i,h} \quad (6.34)$$

El daño en la calidad del ecosistema por el transporte de aguacate de los huertos a los empaques se calcula de la siguiente manera:

$$d_{ECOSYSTEM}^{TRANSPORT-O-H} = \sum_i \sum_h \sum_t p_{i,t} D_{Transport}^{ECOTOX} D_{i,h} + \sum_i \sum_h \sum_t p_{i,t} D_{Transport}^{ACID} D_{i,h} \\ + \sum_i \sum_h \sum_t p_{i,t} D_{Transport}^{LAND-OCUPATION} D_{i,h} \quad (6.35)$$

El daño en los recursos por el transporte del aguacate de los huertos a los empaques se calcula de la siguiente manera:

$$d_{RESOURCES}^{TRANSPORT-O-H} = \sum_i \sum_h \sum_t p_{i,t} D_{Transport}^{FOSSILFUELS} D_{i,h} + \sum_i \sum_h \sum_t p_{i,t} D_{Transport}^{MINERALEXTRACTION} D_{i,h} \quad (6.36)$$

El impacto ambiental del transporte también debe incluir el impacto por trasladar el aguacate desde los empaques hasta los mercados correspondientes, y debe de considerar los daños a la salud humana, los daños al ecosistema y los daños a los recursos naturales:

$$ei_{TRANSPORT-H-M} = d_{HUMAN-HEALTH}^{TRANSPORT-H-M} + d_{ECOSYSTEM}^{TRANSPORT-H-M} + d_{RESOURCES}^{TRANSPORT-H-M} \quad (6.37)$$

El daño por transporte de aguacate debe considerar los 3 mercados y debe incluir todos los factores multiplicados por la distancia entre el empaque y cada mercado:

$$\begin{aligned}
d_{HUMAN-HEALTH}^{TRANSPORT-H-M} = & \sum_h \sum_{m1} \sum_t p_{h,m1,t}^{HUB-M1} D_{Transport}^{CARC} D_{h,m1} + \sum_h \sum_{m1} \sum_t p_{h,m1,t}^{HUB-M1} D_{Transport}^{RESPI} D_{h,m1} \\
& + \sum_h \sum_{m1} \sum_t p_{h,m1,t}^{HUB-M1} D_{Transport}^{ION} D_{h,m1} + \sum_h \sum_{m1} \sum_t p_{h,m1,t}^{HUB-M1} D_{Transport}^{OZ} D_{h,m1} \\
& + \sum_h \sum_{m1} \sum_t p_{h,m1,t}^{HUB-M1} D_{Transport}^{CLIM} D_{h,m1} + \sum_h \sum_{m2} \sum_t p_{h,m2,t}^{HUB-M2} D_{Transport}^{CARC} D_{h,m2} \\
& + \sum_h \sum_{m2} \sum_t p_{h,m2,t}^{HUB-M2} D_{Transport}^{RESPI} D_{h,m2} + \sum_h \sum_{m2} \sum_t p_{h,m2,t}^{HUB-M2} D_{Transport}^{ION} D_{h,m2} \\
& + \sum_h \sum_{m2} \sum_t p_{h,m2,t}^{HUB-M2} D_{Transport}^{OZ} D_{h,m2} + \sum_h \sum_{m2} \sum_t p_{h,m2,t}^{HUB-M2} D_{Transport}^{CLIM} D_{h,m2} \\
& + \sum_h \sum_{m3} \sum_t p_{h,m3,t}^{HUB-M3} D_{Transport}^{CARC} D_{h,m3} + \sum_h \sum_{m3} \sum_t p_{h,m3,t}^{HUB-M3} D_{Transport}^{RESPI} D_{h,m3} \\
& + \sum_h \sum_{m3} \sum_t p_{h,m3,t}^{HUB-M3} D_{Transport}^{ION} D_{h,m3} + \sum_h \sum_{m3} \sum_t p_{h,m3,t}^{HUB-M3} D_{Transport}^{OZ} D_{h,m3} \\
& + \sum_h \sum_{m3} \sum_t p_{h,m3,t}^{HUB-M3} D_{Transport}^{CLIM} D_{h,m3}
\end{aligned} \tag{6.38}$$

El daño a la calidad del ecosistema por el transporte de aguacate debe considerar el transporte a todos los mercados y debe incluir todos los factores multiplicados por el aguacate que es trasladado y la distancia entre los centros y mercados.

$$\begin{aligned}
d_{ECOSYSTEM}^{TRANSPORT-H-M} = & \sum_h \sum_{m1} \sum_t p_{h,m1,t}^{HUB-M1} D_{Transport}^{ECOTOX} D_{h,m1} + \sum_h \sum_{m1} \sum_t p_{h,m1,t}^{HUB-M1} D_{Transport}^{ACID} D_{h,m1} \\
& + \sum_h \sum_{m1} \sum_t p_{h,m1,t}^{HUB-M1} D_{Transport}^{LAND} D_{h,m1} + \sum_h \sum_{m2} \sum_t p_{h,m2,t}^{HUB-M2} D_{Transport}^{ECOTOX} D_{h,m2} \\
& + \sum_h \sum_{m2} \sum_t p_{h,m2,t}^{HUB-M2} D_{Transport}^{ACID} D_{h,m2} + \sum_h \sum_{m2} \sum_t p_{h,m2,t}^{HUB-M2} D_{Transport}^{LAND} D_{h,m2} \\
& + \sum_h \sum_{m3} \sum_t p_{h,m3,t}^{HUB-M3} D_{Transport}^{ECOTOX} D_{h,m3} + \sum_h \sum_{m3} \sum_t p_{h,m3,t}^{HUB-M3} D_{Transport}^{ACID} D_{h,m3} \\
& + \sum_h \sum_{m3} \sum_t p_{h,m3,t}^{HUB-M3} D_{Transport}^{LAND} D_{h,m3}
\end{aligned} \tag{6.39}$$

El daño a los recursos por el transporte de aguacate debe considerar el traslado a todos los mercados y debe incluir los factores asociados a este rubro multiplicados por el aguacate transportado y la distancia entre los centros y los mercados:

$$\begin{aligned}
d_{RESOURCES}^{TRANSPORT-H-M} = & \sum_h \sum_{m1} \sum_t p_{h,m1,t}^{HUB-M1} D_{Transport}^{FUEL} D_{h,m1} + \sum_h \sum_{m1} \sum_t p_{h,m1,t}^{HUB-M1} D_{Transport}^{MINERAL} D_{h,m1} \\
& + \sum_h \sum_{m2} \sum_t p_{h,m2,t}^{HUB-M2} D_{Transport}^{FUEL} D_{h,m2} + \sum_h \sum_{m2} \sum_t p_{h,m2,t}^{HUB-M2} D_{Transport}^{MINERAL} D_{h,m2} \\
& + \sum_h \sum_{m3} \sum_t p_{h,m3,t}^{HUB-M3} D_{Transport}^{FUEL} D_{h,m3} + \sum_h \sum_{m3} \sum_t p_{h,m3,t}^{HUB-M3} D_{Transport}^{MINERAL} D_{h,m3}
\end{aligned} \tag{6.40}$$

El impacto ambiental generado por producción de guacamole también debe ser contemplado, como los demás rubros debe de incluir el daño a la salud humana, al ecosistema y los recursos naturales:

$$ei_{GUACAMOLE} = d_{HUMAN-HEALTH}^{GUACAMOLE} + d_{ECOSYSTEM}^{GUACAMOLE} + d_{RESOURCES}^{GUACAMOLE} \quad (6.41)$$

Para calcular la producción de guacamole se debe determinar la cantidad de aguacate de mercado de proceso que se destina a producir guacamole:

$$p_{h,t}^{guacamole} = P_{h,1,t}^{HUB-M3} \quad (6.42)$$

El daño a la salud humana por la producción de guacamole debe considerar todos los factores multiplicados por la producción de guacamole en cada distrito durante el período t :

$$\begin{aligned} d_{HUMAN-HEALTH}^{GUACAMOLE} = & \sum_h \sum_t p_{h,t}^{guacamole} D_{GUACAMOLE}^{CARC} + \sum_h \sum_t p_{h,t}^{guacamole} D_{GUACAMOLE}^{RESPI} \\ & + \sum_h \sum_t p_{h,t}^{guacamole} D_{GUACAMOLE}^{ION} + \sum_h \sum_t p_{h,t}^{guacamole} D_{GUACAMOLE}^{OZ} \\ & + \sum_h \sum_t p_{h,t}^{guacamole} D_{GUACAMOLE}^{CLIM} \end{aligned} \quad (6.43)$$

El daño a la calidad del ecosistema por la producción de guacamole debe considerar todos los factores multiplicados por la producción de guacamole en cada distrito i durante el período t :

$$\begin{aligned} d_{ECOSYSTEM}^{GUACAMOLE} = & \sum_h \sum_t p_{h,t}^{GUACAMOLE} D_{GUACAMOLE}^{ECOTOX} + \sum_h \sum_t p_{h,t}^{GUACAMOLE} D_{GUACAMOLE}^{ACID} \\ & + \sum_h \sum_t p_{h,t}^{GUACAMOLE} D_{GUACAMOLE}^{LAND} \end{aligned} \quad (6.44)$$

El daño a la calidad del ecosistema por la producción de guacamole debe considerar todos los factores multiplicados por la producción en cada distrito i durante el período t :

$$d_{RESOURCES}^{GUACAMOLE} = \sum_h \sum_t p_{h,t}^{GUACAMOLE} D_{GUACAMOLE}^{FUEL} + \sum_h \sum_t p_{h,t}^{GUACAMOLE} D_{GUACAMOLE}^{MINERAL} \quad (6.45)$$

El impacto ambiental de la producción de aceite de aguacate debe incluir el daño a la salud humana, al ecosistema y a los recursos naturales:

$$ei_{OIL} = d_{HUMAN-HEALTH}^{OIL} + d_{ECOSYSTEM}^{OIL} + d_{RESOURCES}^{OIL} \quad (6.46)$$

Para calcular la producción de aceite, se debe determinar la cantidad de aguacate de mercado de proceso se destina a producir aceite de aguacate:

$$p_{h,t}^{oil} = P_{h,2,t}^{HUB-M3} \quad (6.47)$$

El daño a la salud humana por la producción de guacamole debe considerar todos los factores multiplicados por la producción de aceite de aguacate en cada distrito i durante el período t :

$$\begin{aligned} d_{HUMAN-HEALTH}^{OIL} = & \sum_i \sum_t p_{i,t}^{OIL} D_{OIL}^{CARC} + \sum_i \sum_t p_{i,t}^{OIL} D_{OIL}^{RESPI} \\ & + \sum_i \sum_t p_{i,t}^{OIL} D_{OIL}^{ION} + \sum_i \sum_t p_{i,t}^{OIL} D_{OIL}^{OZ} + \sum_i \sum_t p_{i,t}^{OIL} D_{OIL}^{CLIM} \end{aligned} \quad (6.48)$$

El daño a la calidad del ecosistema por la producción de aceite de aguacate debe considerar todos los factores multiplicados por la producción este en cada distrito i durante el período t :

$$d_{ECOSYSTEM}^{OIL} = \sum_i \sum_t p_{i,t}^{OIL} D_{OIL}^{ECOTOX} + \sum_i \sum_t p_{i,t}^{OIL} D_{OIL}^{ACID} + \sum_i \sum_t p_{i,t}^{OIL} D_{OIL}^{LAND} \quad (6.49)$$

El daño a los recursos por la producción de aceite de aguacate debe considerar todos los factores multiplicados por la producción de aceite en cada distrito i durante el período t :

$$d_{RESOURCES}^{OIL} = \sum_i \sum_t p_{i,t}^{OIL} D_{OIL}^{FUEL} + \sum_i \sum_t p_{i,t}^{OIL} D_{OIL}^{MINERAL} \quad (6.50)$$

7. RESULTADOS

En los últimos años se ha notado un crecimiento acelerado del área de cultivo, esto a su vez, representa un problema ambiental dado que un incremento en el área de cultivo implica el cambio de uso de suelo, así como el uso de agroquímicos en esa área nueva, entre otros problemas que afectan la flora y fauna de la entidad. El enfoque del proyecto se basa en como varían los beneficios, costos, impactos ambientales y consumos de agua en función del lugar donde se instalan. Para poder analizar de la misma manera todos los escenarios se consideran los costos, precios de venta, áreas bajo cada régimen por distrito, distancias y las zonas de producción y empaque de aguacate mencionadas en el Capítulo 1.

7.1. Escenario 1. Análisis sin restricciones de área

Como primer escenario se analiza la instalación de nuevos huertos sin que exista una restricción de área. Bajo este escenario se analiza cómo se comporta el beneficio, el consumo de agua, el área nueva instalada y el impacto ambiental generado. Bajo este escenario, el resultado obtenido para la nueva área instalada es de 43019.43 instaladas en el distrito 40 (Tocumbo) dado que presenta las mejores condiciones climatológicas y de logística en el estado.

El resultado como tal nos arroja el detalle de que si no existieran restricciones de área y el punto óptimo para la producción de aguacate sería Tocumbo y los huertos deberían instalarse bajo la modalidad de riego (Figura 7.1)

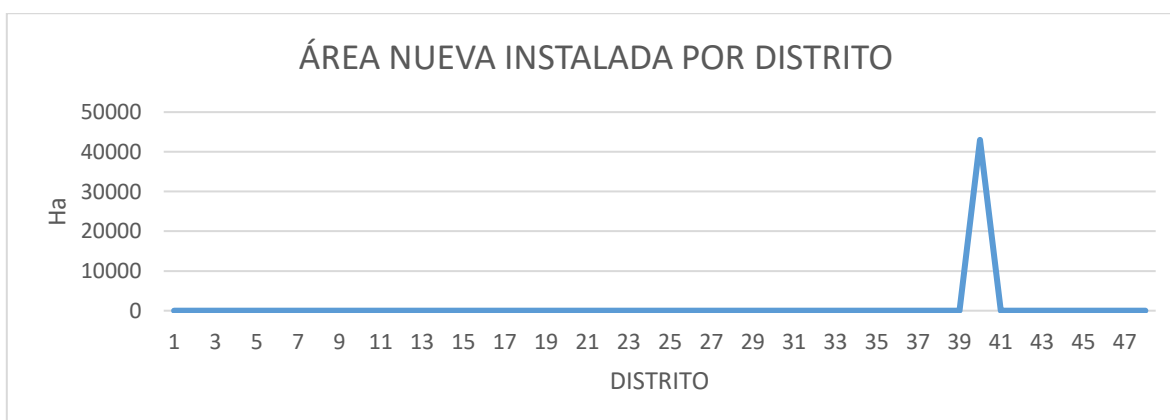


Figura 7.1. Área nueva instalada sin restricciones de área

Por otro lado, la producción anual si no existieran restricciones de área y contemplando las 43019 Ha nuevas instaladas va en aumento año con año como lo muestra la Figura 7.2, en la cual se observa que a partir del año 4 se tiene un incremento en la producción debido a que los huertos jóvenes comienzan a producir y en el año 5, los huertos nuevos también comienzan a producir aguacate comenzando con una baja producción y creciendo poco a poco siguiendo una curva de producción típica en la cual incrementa hasta llegar a la madurez y posterior a esto comienza disminuir debido a efectos de la edad y enfermedades del huerto (Figura 7.2).

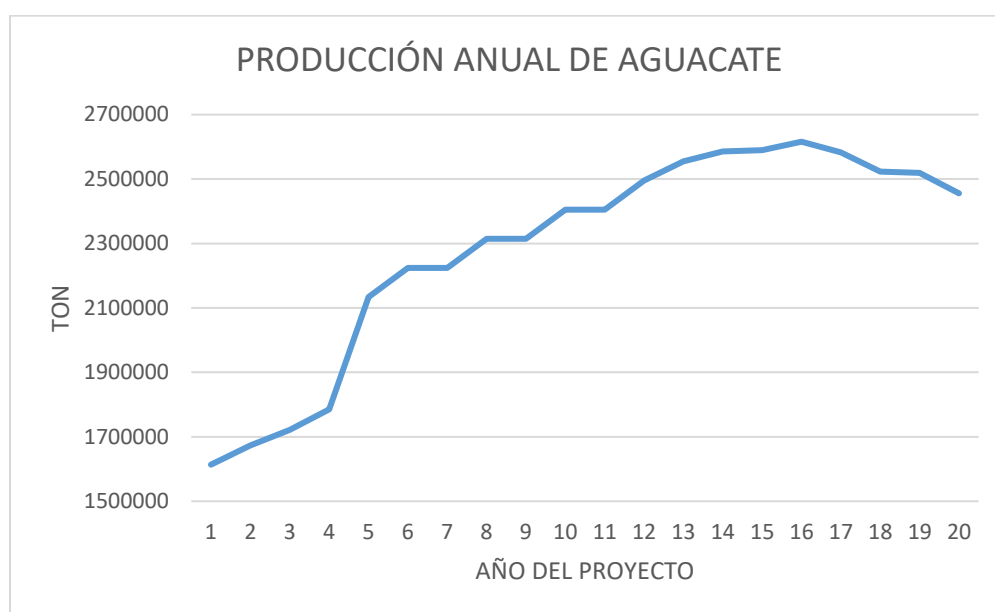


Figura 7.2. Producción anual sin restricciones de área

El negocio del aguacate genera a su vez un impacto ambiental que considera el cultivo, almacén transporte y procesamiento del mismo. Si la instalación de nuevos huertos se hiciera sin restricciones se obtendría un impacto ambiental (en puntos del ECO-99) de 49660407. Al realizar el análisis se observa que el impacto ambiental individual que más contribuye al impacto ambiental total al final de los 20 años del proyecto es el impacto generado por el transporte del empaque al mercado, seguido por la producción de aguacate, aceite y guacamole correspondientemente, y por último lugar el transporte del huerto al empaque. La Figura 6.3 muestra la contribución de cada impacto individual al impacto ambiental total.

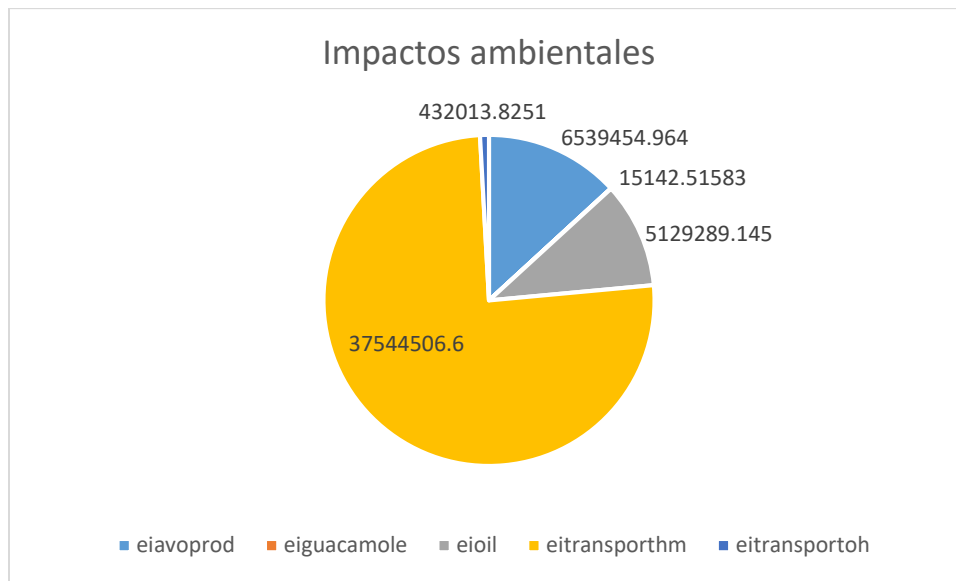


Figura 7.3 Impacto ambiental generado por el negocio del aguacate si no existieran restricciones para el crecimiento del área

Finalmente debemos analizar los resultados finales obtenidos y que pueden servir como ayuda para la toma de decisiones, estos resultados son los beneficios totales, los consumos hídricos el impacto ambiental total generado y el área nueva que deberá instalarse en el estado. La Tabla 4.1 muestra los resultados finales obtenidos bajo este escenario.

Tabla 7.1 Resultados generales del escenario 1.

Ganancia (\$1000 Dólares)	23597300
Agua total consumida (m3)	1364589542
Impacto ambiental total	49660407.1
Área nueva (Ha)	43019.4342

Analizando los resultados generales observamos que la derrama económica en el estado asciende a los \$23597300 (Miles de dólares), lo cual genera un impacto económico positivo, pero genera a su vez un impacto ambiental de 49660407 (Puntos ECO-99) y un consumo de agua al final de los 20 años de 1364589542 metros cúbicos. También, se observa que el área instalada de 43019 centraliza la producción de aguacate en un solo distrito, lo cual maximiza el beneficio económico, pero si observamos el territorio disponible del distrito

45 se observa que la centralización de la producción genera que exista cambio de uso de suelos que puede manifestarse como tala de bosques y quemas forestales en el distrito.

7.2 Escenario 2- Comparativa entre el uso de suelo boscoso y pastizal

Para el escenario 2 se contemplan dos alternativas y se compara el beneficio y los impactos generados en cada alternativa. Las dos alternativas que se analizan en este escenario son las siguientes:

a) El área potencial para instalar los nuevos huertos de aguacate se considera el 100% del territorio de cada distrito con vocación forestal y junglas. Para esta alternativa se muestran las áreas potenciales en la Tabla 7.2:

Tabla 7.2 Área potencial considerando el 100% del territorio de cada distrito con vocación forestal y junglas

Distrito	Área potencial (Bosques)	Distrito	Área potencial (Bosques)
1	8914	25	9461
2	111908	26	20349
3	101068	27	16146
4	32993	28	10422
5	10896	29	16093
6	20233	30	14815
7	17262	31	36666
8	229574	32	29927
9	2637	33	12907
10	30680	34	16129
11	12126	35	9630
12	87885	36	5907
13	3242	37	10318
14	2735	38	6127
15	9879	39	9763
16	16166	40	33626
17	6549	41	92850
18	23668	42	13660
19	90903	43	6748
20	14748	44	90497
21	51887	45	60474
22	13681	46	24684
23	8338	47	8050
24	8527	48	25519

b) Como segunda alternativa se considera que el área potencial para cada distrito es el 100% del territorio dedicado a los pastizales. Las áreas potenciales pueden ser observadas en la Tabla 7.3

Tabla 7.3 Área potencial considerando el 100% del territorio de cada distrito dedicado a pastizales

Distrito	Área potencial (Pastizales)	Distrito	Área potencial (Pastizales)
1	371	25	2403
2	10858	26	767
3	3771	27	114
4	3632	28	674
5	378	29	136
6	5144	30	2575
7	1224	31	7760
8	49782	32	478
9	992	33	4237
10	5169	34	4049
11	246	35	381
12	8005	36	4213
13	1313	37	105
14	1584	38	1162
15	3901	39	4515
16	4222	40	8207
17	1219	41	29848
18	1741	42	1151
19	4472	43	755
20	16469	44	1327
21	15644	45	4057
22	0	46	7503
23	94	47	0
24	5111	48	1374

Como primer punto de análisis se observarán las áreas nuevas instaladas bajo cada una de las alternativas. Cuando el área potencial es aquella destinada a zonas forestales se tiene un área nueva de 34678. Ha mientras que cuando se instalan en zonas con pastizales el área nueva es de 35553. Estos resultados pueden verse gráficamente en la Figura 7.4.

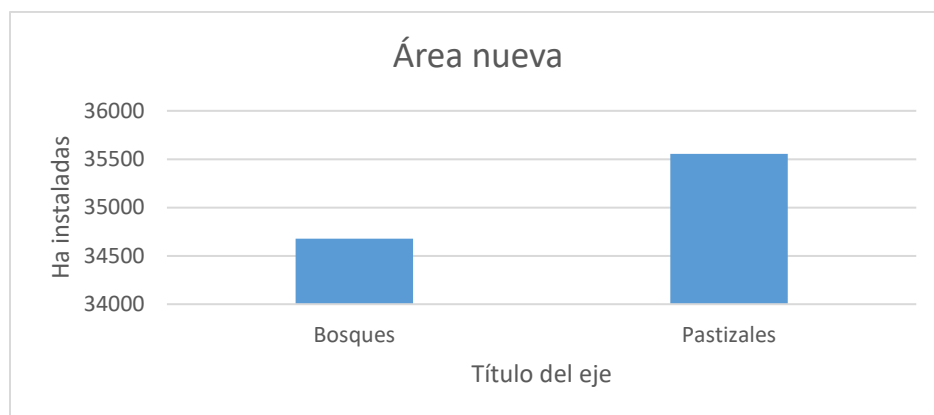


Figura 7.4 Hectáreas instaladas considerando la alternativa de instalar en bosques y pastizales

Otro punto relevante observado es que cuando la instalación se hace en zonas boscosas la producción queda centralizada en los distritos 40 y 26 y se instalan bajo modalidad de riego, razón por la cual los consumos hídricos se ven modificados. Cuando la instalación se hace en zonas con pastizales el área instalada es menor y la distribución también lo es, la instalación se hace en los distritos 4, 24, 28, 29, 31, 32, 33, 38, 40 y 45, incluso algunos de los huertos son instalados en zonas que no requieren sistema de riego ya que por su ubicación y rendimiento proporcionan lugares óptimos de producción y distribución del aguacate. Esto también generará un menor consumo hídrico, y por ende también el impacto ambiental será menor. La distribución del área en cada alternativa puede observarse en la Figura 7.5.

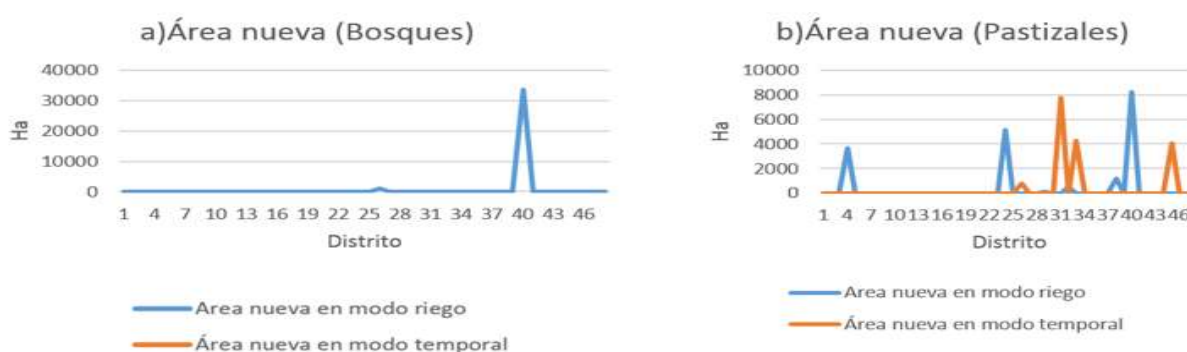


Figura 7.5. Distribución de áreas nuevas.

Así como se ha visto una disminución en el área cuando se siembra en pastizales el impacto económico debe verse repercutido dado que la producción y los costos de producción varían en funciones de la zona en la cual se instale. Al analizar el beneficio total, se observa

que el hecho de restringir el área a zonas donde el suelo es pastizal reduce la ganancia en un valor en \$703602 miles de dólares. Lo anterior se puede observar en la Figura 7.6, en la cual se observa la relación directa entre la ganancia y el uso del suelo, obteniendo que si queremos tener un mayor impacto económico será a costa de la reducción de la zonas forestales, lo cual no es una alternativa viable.

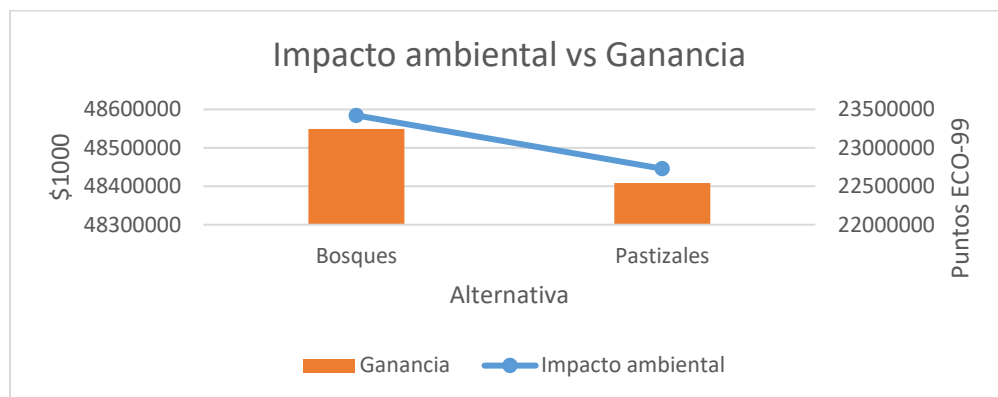


Figura 7.6 Relación entre la ganancia y el uso del suelo

El consumo hídrico afecta la ganancia de la misma manera en la que el uso de suelo influye en la ganancia. El instalar en zonas de pastizales genera mayores requerimientos hídricos dado que las zonas boscosas son zonas más húmedas que los pastizales y como ya se mencionó el consumo de agua es indispensable para la producción de aguacate, por lo cual si se quiere obtener un margen de ganancia mayor tendremos que usar más recursos hídricos (Figura 7.7).

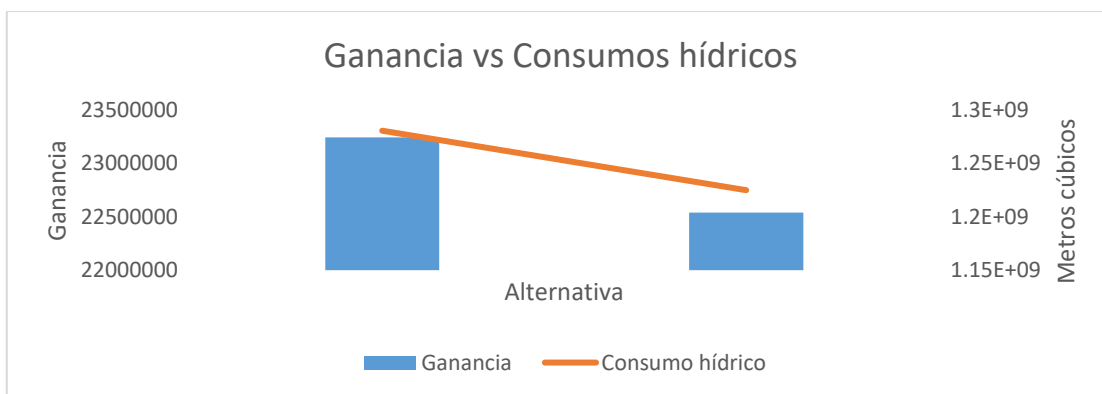


Figura 7.7.- Relación entre los consumos hídricos y la ganancia

7.3 Escenario 3.- Sensibilidad a la disponibilidad de pastizales en cada distrito

Como tercer escenario se analiza sensibilidad del proceso modificando la disponibilidad de territorio considerando que solo se podrá instalar en zonas con pastizales. Por otro lado, es bien sabido que el hecho de usar todo el territorio con pastizales disponible en cada distrito provocaría un cambio en flora y fauna considerable. Este escenario contempla la necesidad de determinar un porcentaje óptimo de esta área que ayude a maximizar las ganancias y a su vez reduzca el impacto ambiental y los consumos hídricos. Al analizar los escenarios previos se observa que una mayor ganancia implica el uso más área de cultivo, un impacto ambiental mayor y un consumo hídrico mayor. Este escenario, como se contempla la ganancia, el área nueva, el impacto ambiental y los consumos hídricos si se usara un porcentaje de 20%, 450%, 60% o 100% del territorio total. Las áreas potenciales de instalación para cada alternativa se muestran en la **Tabla 7.4**.

Tabla 7.4 Áreas Disponibles para varios porcentajes de área potencial de pastizal

Distrito	100%	80%	60%	40%	20%	Distrito	100%	80%	60%	40%	20%
1	371	297	223	148	74	25	2403	1922	1442	961	480
2	10858	8686	6514	4343	2171	26	767	613	460	306	153
3	3771	3017	2263	1508	754	27	114	91	68	45	22
4	3632	2906	2179	1453	726	28	674	539	404	269	134
5	378	302	227	151	75	29	136	109	81	54	27
6	5144	4115	3086	2057	1028	30	2575	2060	1545	1030	515
7	1224	979	734	489	244	31	7760	6208	4656	3104	1552
8	49782	39825	29869	19912	9956	32	478	382	287	191	95
9	992	794	595	397	198	33	4237	3389	2542	1694	847
10	5169	4135	3101	2067	1033	34	4049	3239	2429	1619	809
11	246	197	147	98	49	35	381	305	228	152	76
12	8005	6404	4803	3202	1601	36	4213	3371	2528	1685	842
13	1313	1050	788	525	262	37	105	84	63	42	21
14	1584	1267	950	633	316	38	1162	930	697	465	232
15	3901	3121	2341	1560	780	39	4515	3612	2709	1806	903
16	4222	3377	2533	1688	844	40	8207	6566	4924	3283	1641
17	1219	975	731	487	243	41	29848	23879	17909	11939	5969
18	1741	1392	1044	696	348	42	1151	921	691	460	230
19	4472	3577	2683	1788	894	43	755	604	453	302	151
20	16469	13175	9881	6587	3293	44	1327	1061	796	530	265
21	15644	12515	9386	6257	3128	45	4057	3245	2434	1622	811
22	0	0	0	0	0	46	7503	6002	4502	3001	1500
23	94	75	56	37	18	47	0	0	0	0	0
24	5111	4089	3067	2044	1022	48	1374	1099	824	549	274

Al hacer el análisis de la instalación bajo diferentes porcentajes de área disponible para instalación se obtuvieron resultados contundentes acerca del proceso. Como primer análisis, podemos observar en la **Figura 7.8** que la ganancia incrementa con la disponibilidad del territorio dado que al tener más áreas óptimas para la producción de aguacate se instala una mayor cantidad de terreno. Como se observa, el comportamiento no es lineal y se observa que a medida que el terreno aumenta, el margen de ganancia por hectárea es ligeramente menor dado que aunque el territorio posee lugares óptimos para el cultivo los costos se ven incrementados dado que para alcanzar los rendimientos necesarios se debe cultivar con sistemas de riego, lo cual implica un costo ligeramente mayor aunque sigue siendo un proceso rentable.

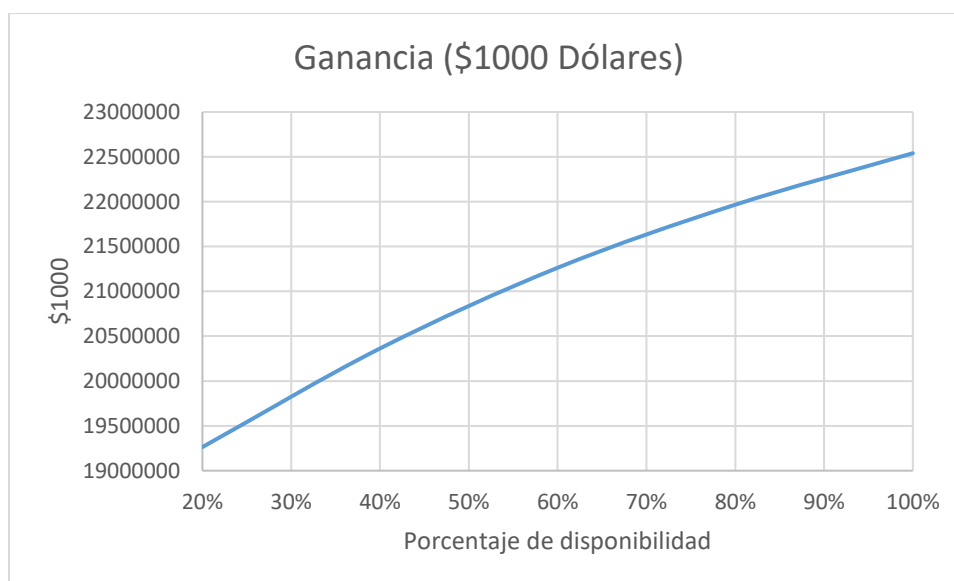


Figura 7.8.- Ganancia en función del porcentaje de territorio disponible

Como segunda parte se analiza la como varían las hectáreas instaladas en función de la disponibilidad del territorio. Aquí se observa que mientras el área disponible crece el área instalada también lo hace (**Figura 7.9**), pero analizando cada régimen de producción se nota que la tendencia de la instalación en cada régimen es diferente. Cuando la disponibilidad del territorio es reducida a un 80% se prefiere instalar más hectáreas en huertos con sistema de riego y esto se mantiene en todas las alternativas pero la tendencia comienza a cambiar a partir de 80% de disponibilidad, partir de aquí el modelo instala las mismas hectáreas en modalidad de riego aunque posee más área potencial de instalación, cosa que no sucede con

las hectáreas instaladas en forma temporal. Lo anterior sucede a que el área potencial donde los distritos poseen mayor margen de ganancia en rendimiento cuando se le suministra riego se agota y queda área donde el incremento de rendimiento es mínimo y no así el costo de producción que es más alto con sistemas de riego, razón por la cual llega un punto en el cual para maximizar las ganancias se prefiere instalar en modalidad temporal ya que el beneficio por el uso de sistemas de riego es casi nulo.

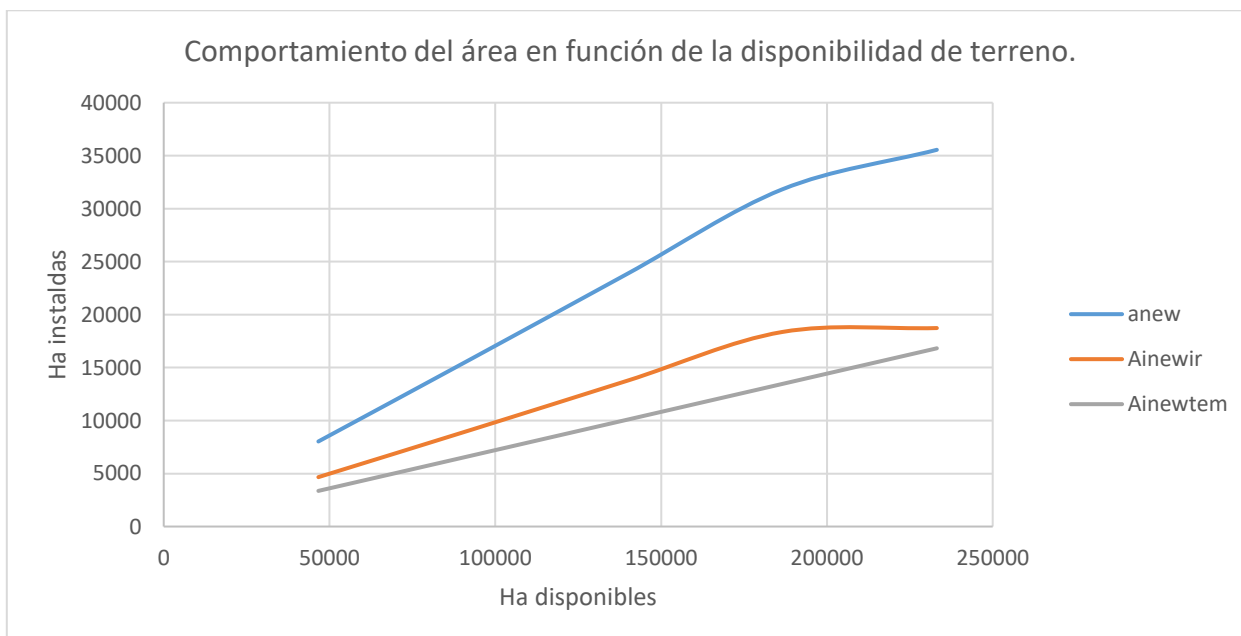


Figura 7.9. Comportamiento del área con la disponibilidad del terreno

El siguiente análisis que se hace es el observar cómo se comporta la ganancia con el impacto ambiental. Lo anterior se puede observar en la **Figura 7.10**, en la cual se observa que la ganancia aumenta. El punto No. 1 indica una disponibilidad del 20% de territorio y el No. 5 indica el 100% de disponibilidad del territorio dedicado a pastizales, y se observan dos comportamientos peculiares. El primer comportamiento analizado es el comportamiento del impacto ambiental con la ganancia en la cual se observa que el impacto ambiental incrementa al incrementar la ganancia, es decir, si se quiere obtener un beneficio máximo el impacto ambiental también lo hará dado que la relación entre ellos es casi lineal (**Figura 7.10**).

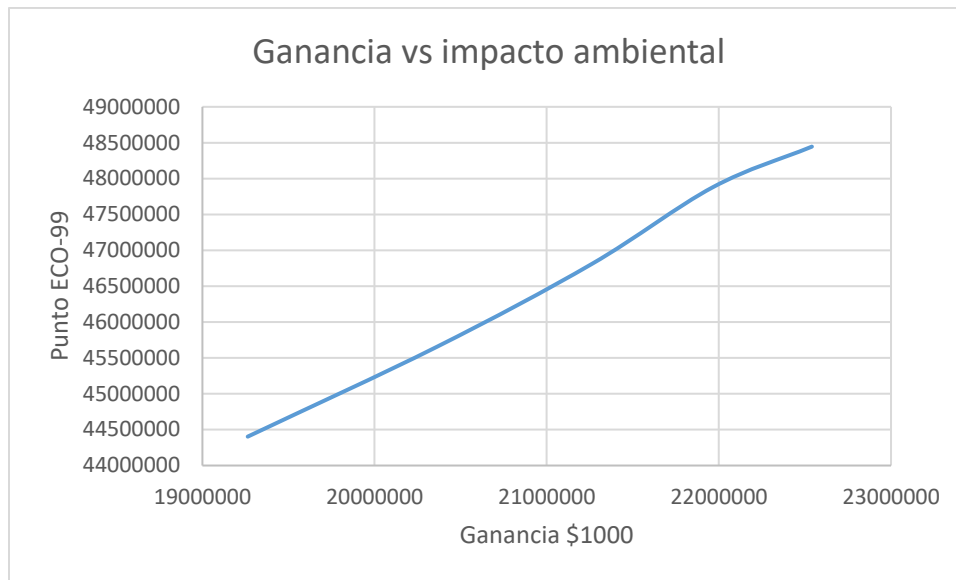


Figura 7.10.- Comparativa de las ganancias contra el impacto ambiental

Por otro lado, también debe de analizarse el comportamiento de la ganancia en función del consumo de agua. Para esto se analiza la **Figura 7.11**, en la cual se puede observar claramente que el consumo de agua varía completamente en función de la ganancia. En el análisis del comportamiento de la ganancia con la disponibilidad del terreno se observa que el beneficio aumenta con la disponibilidad del territorio dado que posee más área con territorios óptimos para el cultivo del aguacate pero esto implica hacerlo a un costo mayor dado que para alcanzar los rendimientos óptimos es necesario agregar agua, es decir, implementar un sistema de riego pero esto a su vez también genera un mayor consumo de agua. En la **Figura 4. 11** se observa el comportamiento de la ganancia en función del recurso hídrico y puede observarse que a partir del 60% de disponibilidad la ganancia sigue aumentado pero el recurso hídrico aumenta en una proporción mucho mayor. Del gráfico podemos deducir que la producción es viable económicamente al incrementar el área potencial pero es a costa del recurso hídrico. Del gráfico también se puede deducir que un punto óptimo para la producción de aguacate sería tomar como área potencial el 60% del territorio total debido a partir de este punto el beneficio generado producirá un impacto al recurso hídrico considerable, dado que se necesitará más agua para la producción de aguacate.



Figura 7.11.- Ganancia en función del consumo de agua.

Finalmente en la **Tabla 7.5** se muestran los resultados obtenidos al realizar este análisis de sensibilidad. Estos mismos resultados pueden verse en la **Figura 7.12**, en la cual se observa que una mayor ganancia implica un mayor impacto al ambiente y un mayor consumo de agua, siendo un efecto mayor sobre este último al superar un 60% la disponibilidad del territorio.

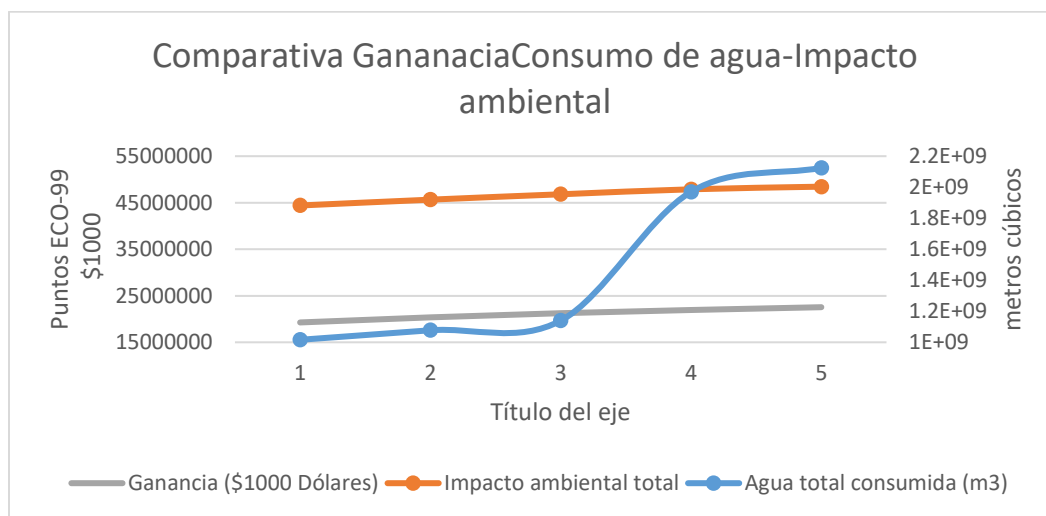


Figura 7.12.- Resultados del análisis del escenario 3

Tabla 7.5.- Resultados del análisis del escenario 3

	Area nueva (Ha)	Producción	Agua total consumida (m3)	Impacto ambiental total	Ganancia (\$1000 Dólares)
20%	8029.4951	39653256.96	1016200000	44403000	19263117
40%	15910.20144	40836388.03	1077483274	45656021.1	20362980
60%	23865.30216	42026411.24	1139425373	46810408.23	21262572.09
80%	31820.40288	43216434.44	1970136742	47880213.64	21965766.39
100%	35553.3806	43923433.26	2124918651	48445504.89	22540398

Finalmente se observa que el área instalada se hace en distintos distrito y bajo ciertas condiciones (Figura 7.13), lo cual realza que no todo los lugares son óptimos para el cultivo del aguacate, además, también deja ver que hay zonas que son óptimas pero en diferentes modalidades de cultivo, cultivos que se ven favorecidos altamente con el agua y algunos que no necesitan sistemas de riego dado que se encuentran en zonas demasiadas húmedas, por lo cual la ubicación de los nuevos huertos afectan económica y ambientalmente el negocio del aguacate.

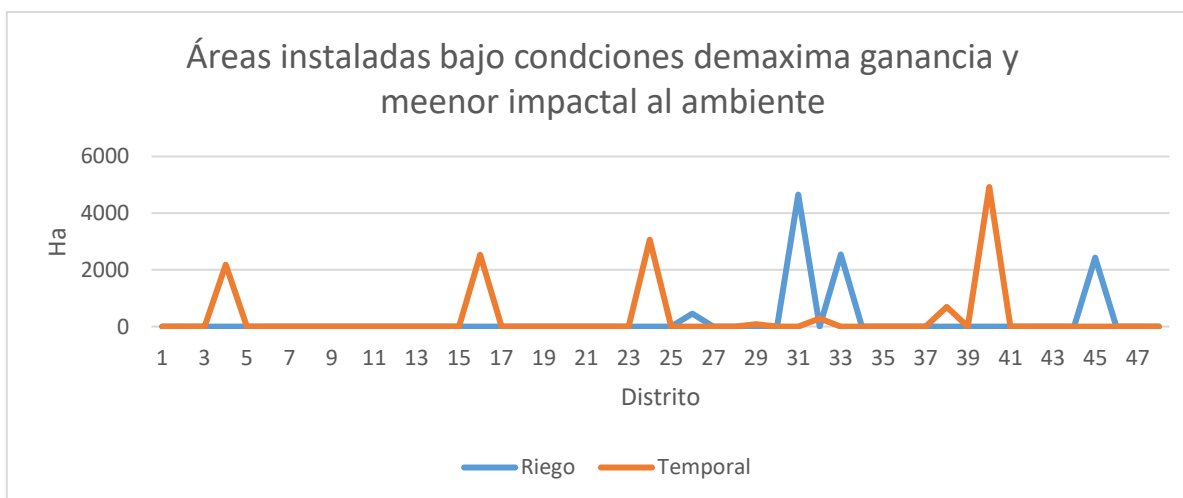


Figura 7.13. Áreas óptimas instaladas.

8.- CONCLUSIONES

Al hacer el análisis se pueden concluir algunos aspectos contundentes acerca del negocio del aguacate. El análisis se realizó por partes, dentro de las cuales primero se analizó el comportamiento y el impacto de instalar los huertos sin restricciones de área lo cual dio como resultado un impacto económico mayor pero el impacto ambiental, los consumos hídricos, las áreas nuevas instaladas también lo fueron, además de que el programa centralizo la producción en un distrito y tomó área con zona forestal para el cultivo del mismo, razón por la cual no es un resultado prometedor si se quiere producir aguacate generando el mínimo de los impactos.

Como segunda parte, el análisis se enfocó en comparar como se ve afectado el negocio y los impactos ya mencionados si se pudiera instalar solo sobre zonas forestales o zonas con pastizales. Al analizar los resultados podemos concluir que la mayor ganancia se obtiene cuando se instala en zonas forestales debido a que los terrenos cuentan con mejores condiciones climatológicas para la producción del aguacate, lo cual genera también una mayor área nueva de cultivo y por ende, un mayor impacto ambiental y mayores consumos de agua, por lo cual la opción de instalaren zonas con pastizales se analiza por separado dado que genera menores impactos en la producción de aguacate.

Finalmente, se analizó el comportamiento del negocio del aguacate en territorios dedicados al pastizal. En este escenario se hizo un análisis con el porcentaje de terreno potencial dedicado a la siembra del aguacate. Al observar los resultados podemos concluir varias cosas:

- a) El negocio del aguacate maximiza sus ganancias al incrementar el área potencial de cultivo dado que los territorios con mejores condiciones y rendimientos tienen mayor disponibilidad., aunque esto a su vez genera un impacto ambiental mayor como se ve en el apartado de los resultados.
- b) El impacto ambiental del negocio del aguacate también se ve afectado al modificar las áreas potenciales de cultivo dado que al disponer de mayor cantidad

de área con buenas condiciones y rendimientos se instalan más hectáreas en zonas con condiciones óptimas.

- c) El consumo de agua se ve modificado drásticamente con la disponibilidad del territorio. En los resultados se observa que es factible el uso de sistemas riego hasta una disponibilidad del territorio del 60 %, dado que a partir de este punto, el beneficio generado con el uso de agua en los cultivos comienza a perder eficiencia generando un impacto menor en el rendimiento y consumiendo a su vez mayores caudales de agua, por lo cual este escenario resultaría la condición óptima de producción de aguacate en el estado de Michoacán, en la cual se obtiene una máxima ganancia con minimizando el recurso hídrico y los impactos ambientales. Las áreas óptimas y a partir de las cuales debería de comenzarse a limitar la instalación de nuevos huertos de aguacate y comenzar a buscar otros lugares donde cultivar el aguacate se muestran en la figura 7.13 y se observa que que una apta ubicación de los huertos puede mejorar el beneficio, y también resalta que no todos los distritos presentan las condiciones óptimas para el cultivo de aguacate, por lo cual la ubicación de los huertos debe hacerse estratégicamente.

9. REFERENCIAS

1. Aguacate, 2014. Base de datos del aguacate mexicano (www.aguacate.gob)
2. Aguacate, 2016. Anuario estadístico de la producción de aguacate en México. <http://www.aguacate.gob.mx/index.php?portal=aguacate>.
3. Allen, R. G., & Pruitt, W. O. (1986). Rational use of the FAO Blaney-Criddle formula. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 112(2), 139-155.
4. Amir, I., Fisher, F. M. "Analyzing agricultural demand for water with an optimizing model". *Agricultural Systems*, 61, (1999) pp. 45-66
5. Amórtegui Ferro, I., Capera Ducuara, E., & Godoy Acosta, J. V. (2001). El cultivo de aguacate. Módulo educativo para el desarrollo tecnológico de la comunidad rural.
6. Anuario estadístico y geográfico por entidad federativa 2015 / Instituto Nacional de Estadística y Geografía.- México: INEGI, c2015.
7. Arredondo-Ramírez, K., Rubio-Castro, E., Nápoles-Rivera, F., Ponce-Ortega, J. M., Serna-González, M., & El-Halwagi, M. M. (2015). Optimal design of agricultural water systems with multiperiod collection, storage, and distribution. *Agricultural Water Management*, 152, 161-172.
8. Arroyo, P., "Mercado del aguacate mexicano 1975-2010", 2012.
9. Asian Development Bank. (2003). *Asian water supplies, reaching the urban poor*.
10. Bergh, B. 1992. The origin, nature and genetic improvement of the avocado. *California Avocado society yearbook* 76: 61-75.
11. Blaney, H. F.; Criddle, W. D. 1950 Determining Water needs From Climatological Data. U. S. D. A. Soil Conservation Service. SOS –TP. pp. 8-9.
12. Bravo-Espinoza, M. E. Mendoza, T. Carlon Allende, L. Medina, J. T. Saenz -Reyes, R. Paéz. "Effects of converting forest to avocado orchards on topsoil properties in the trans-mexican volcanics system, México". *Land Degradation & Development* (2012).
13. Carr, M. K. V. "The water relations and irrigation requirements of avocado (*Persea americana* Mill.): A review. *Expl. Agricultural* (2013), volume 49 (2), pp. 256-278. Cambridge University Press 2013.

14. Cheong, L. C. (1991). Unaccounted-for water and the economics of leak detection. *Proceedings of the International Water Supply Congress and Exhibition, Copenhagen, Water supply*, 9.
15. CIGA, 2014. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Proyecto FOMIX Michoacán “Monitoreo de la cubierta del suelo y la deforestación en el estado de Michoacán: Un análisis de cambios mediante sensores remotos a escala regional”. <http://www.ciga.unam.mx/wrappers/proyectoActual/monitoreo/index.html>
16. CONAPO. Consejo Nacional de la Población. Proyección de datos 2010-2050. http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones_Datos
17. De la Tejera-Hernández, B., Santos O., Santamaria Q., Gómez M., Olivares V., “El oro verde en Michoacán: ¿Un crecimiento sin fronteras? Acercamiento a la problemática y retos del sector aguacatero para el estado y la sociedad”. *Economía y sociedad*, Vol., XVII, núm. 29, 2013, pp. 15-40. UMSNH.
18. Dirección de Consultoría en Agronegocios. (Octubre de 2007). AGUACATE. *FIRA*.
19. ECOINVENT, 2016. <https://v32.ecoquery.ecoinvent.org>
20. FAO. (2002). *El agua y la agricultura*. <http://www.fao.org/faostat/en/?#data/QC>
21. FAOSTAT, 2014. Food and agriculture organization of the united nations (faostat.fao.org)
22. FAOSTAT, 2016. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
23. FFAEM. Fondo de Fomento Agropecuario del Estado de Michoacán. “El sistema productivo en Michoacán: Bases y estrategias para mejorar su competitividad”. 2008
24. García-Montoya, M., Bocanegra-Martínez, A., Nápoles-Rivera, F., Serna-González, M., Ponce-Ortega, J. M., & El-Halwagi, M. M. (2015). Simultaneous design of water reusing and rainwater harvesting systems in a residential complex. *Computers & Chemical Engineering*, 76, 104-116.
25. Glasnovik, Z., & Margeta, J. (2006). A model for optimal sizing of photovoltaic irrigation water pumping systems. *EL SEVIER*.
26. Hernández-Calderón, O. M., Ponce-Ortega, J. M., Ortiz-del-Castillo, J. R., Cervantes-Gaxiola, M. E., Milán-Carrillo, J., Serna-González, M., & Rubio-Castro,

- E. (2016). Optimal design of distributed algae-based biorefineries using CO₂ emissions from multiple industrial plants. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55(8), 2345-2358.
27. INEGI, 2014. (www.inegi.gob)
 28. Infohass. Informativo al servicio del aguacatero. <http://www.infohass.net/OtrosMercados>
 29. INIFAP, 2012, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Impacto al cambio de uso de suelo forestal a huertos de aguacate. Agosto de 2012. Libro Técnico Num. 13, ISBN:978-607-425-825-7
 30. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México).
 31. Kohli, A., Frenken, K., & Spottorno, C. (2010). Disambiguation of water use statistics. *AQUASTAT*, 5.
 32. Lira-Barragán, L. F., Ponce-Ortega, J. M., Serna-González, M., & El-Halwagi, M. M. (2011). Synthesis of water networks considering the sustainability of the surrounding watershed. *Computers & Chemical Engineering*, 35(12), 2837-2852..
 33. Medina, N., 2005. Evaluación financiera y operativa de una empacadora en Michoacán.
 34. Nápoles-Rivera, F., Serna-González, M., El-Halwagi, M. M., & Ponce-Ortega, J. M. (2013). Sustainable water management for macroscopic systems. *Journal of cleaner production*, 47, 102-117.
 35. Olaeta, J. A., “Industrialización del Aguacate: Estado actual y perspectivas futuras” Actas V Congreso Mundial del Aguacate. 2003, pp. 749-754.
 36. Paez-Arguello, M. M., “Factibilidad para el montaje de una empresa procesadora y comercializadora de guacamole en el municipio de San Vicente de Chucuri, departamento de Santander” Tesis de Licenciatura. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2010.
 37. PRNSPA, 2012. Plan Rector Nacional del Sistema Producto Aguacate. SAGARPA-INCA.
 38. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, 2009.

39. Rubio-Castro, E., Ponce-Ortega, J. M., Cervantes-Gaxiola, M. E., Hernández-Calderón, O. M., Ortiz-del-Castillo, J. R., Milán-Carrillo, J., ... & Meza-Contreras, J. A. (2016). Optimal design of integrated agricultural water networks. *Computers & Chemical Engineering*, 84, 63-82.
40. SAGARPA. (Enero de 2012). *USO EFICIENTE DEL AGUA*.
41. Sánchez-Tienda, J. "Uso consuntivo del cultivo de aguacate: Metodología Blaney y Criddle modificada relacionando fenología y precipitación" *Revista de Chapingo serie horticultura* 5: 201-207, 1999.
42. SARGAPA. (2012). *Estimación de las demandas de consumo de agua*.
43. Secretaría de Economía. (2012). *Monografía del sector del aguacate en México: Situación actual y oportunidades de mercado*.
44. SIAP, 2016. Servicio de información agroalimentaria y pesquera. http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap/icultivo/index.jsp
45. Silber, A., Y. Israeli, Levi, M., Keinan, A., & Shapira, O. (2011). Response of 'Hass' avocado trees to irrigation management and root constraint. *EL SEVIER*
46. Smith, C.E. Jr. 1966. Archeological evidence for selection in avocado. *Economic Botany* 20: 169-175.