



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN  
FACULTAD POLITÉCNICA

*INGENIERÍA EN INFORMÁTICA*

---

**Metodología automática para estimar  
pérdida de carbono a través de  
procesamiento de imágenes satelitales.  
Caso de uso Chaco Paraguay**

---

*PROYECTO FINAL DE GRADO*

*Autor:*

Santiago Smael Vera Aquino

*Tutor:*

Dr. Horacio Legal Ayala

SAN LORENZO - PARAGUAY

OCTUBRE - 2015

## *Dedicatoria*

*A mis familiares, profesores, compañeros y amigos por su apoyo,  
aliento y comprensión incondicional.*

# *Agradecimiento*

xxx

## *Resumen*

XXXX

# *Abstract*

XXXXXX

# Índice general

Agradecimiento	II
Resumen	III
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	VIII
Abreviaciones	IX
<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
1.1. Justificación y Motivación . . . . .	4
1.2. Antecedentes . . . . .	4
1.3. Planteamiento del problema . . . . .	5
1.4. Objetivos . . . . .	6
1.4.1. Objetivos Generales . . . . .	6
1.4.2. Objetivos Específicos . . . . .	7
1.5. Organización de la Tesis . . . . .	7
<b>2. Cambio Climático</b>	<b>9</b>
2.1. Ciclo de carbono . . . . .	9
2.1.1. Secuestro de carbono . . . . .	10
2.1.2. Pérdida de Carbono . . . . .	11
2.2. Biomasa . . . . .	11
2.2.1. Biomasa Forestal . . . . .	11
2.3. Estimación y carbono . . . . .	12
2.3.1. Diabetes en Paraguay . . . . .	12
2.3.2. Aumento de la prevalencia de la diabetes . . . . .	12
2.4. Enfermedades del Ojo . . . . .	13
2.5. Reseña sobre retinopatía diabética . . . . .	14
2.5.1. Causas . . . . .	14
2.5.2. Factores de riesgo . . . . .	14
2.5.3. Síntomas . . . . .	15
2.5.4. Etapas de la retinopatía diabética . . . . .	15

---

2.5.5. Tratamiento . . . . .	16
2.6. Detección de retinopatía diabética . . . . .	17
2.7. Estructuras anatómicas y patologías . . . . .	20
2.7.1. Microaneurismas . . . . .	20
2.7.2. Exudados duros . . . . .	21
2.7.3. Vasos sanguíneos . . . . .	22
2.8. Resumen . . . . .	23

# Índice de figuras

2.1. Ciclo de carbono. . . . .	10
2.2. Daño causado por la retinopatía diabética. . . . .	20
2.3. Microaneurismas. . . . .	21
2.4. Exudados duros. . . . .	22
2.5. Vasos sanguíneos. . . . .	22



# Índice de tablas

2.1. Estimación del aumento de los casos de Diabetes al año 2030 para países de Latinoamérica, de acuerdo a la Federación Internacional de Diabetes. .	13
2.2. Estudio del fondo de ojo. . . . .	19

# Abreviaciones

<b>GEI</b>	<i>Gases de Efecto Invernadero.</i>
<b>CO<sub>2</sub></b>	<i>Dióxido de carbono.</i>
<b>C</b>	<i>Carbono.</i>
<b>SIG</b>	<i>Sistemas de Información Geográficas.</i>
<b>REDD+</b>	<i>Reducción de GEI por la Deforestación y Degradación de bosques.</i>
<b>RMSE</b>	<i>Error cuadrático medio.</i>
<b>ParLu</b>	<i>Paraguay Land Use.</i>
<b>WWF</b>	<i>World Wildlife Fund.</i>
<b>ENPAB</b>	<i>Estrategia nacional y plan de acción para la conservación de la Biodiversidad.</i>
<b>VD</b>	<i>Valor Digital.</i>



# Capítulo 1

## Introducción

De entre los servicios ambientales que proporcionan los bosques, la captura de carbono será determinante para disminuir el calentamiento global y estabilizar el cambio climático producidos por el incremento en la atmósfera de los llamados Gases de Efecto Invernadero (GEI). El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) es el gas mas abundante, contribuyendo con un 76 % al GEI [[ÁJB<sup>+</sup>01](#)] debido principalmente al cambio de paisajes de bosques tropicales maduros a paisajes agrícolas.

Los bosques tropicales en condiciones naturales contienen más carbono aéreo por unidad de superficie que cualquier otro tipo de cobertura terrestre. Por esto, cuando los bosques se convierten a otros usos del suelo, ocurre una gran liberación neta de carbono a la atmósfera. El cambio en el uso del suelo y la silvicultura son responsables del 15-20 % de las emisiones totales de gases de efecto invernadero[[Oje](#)].

El **ciclo de carbono** son las transformaciones químicas de compuestos que contienen carbono en los intercambios entre biosfera, atmósfera, hidrosfera y litosfera. La fotosíntesis de las plantas constituye un proceso fundamental en el ciclo ya que permite separar el  $\text{CO}_2$  en oxígeno que consumimos y carbono (C) en materia orgánica, actuando en forma de almacenes de C como biomasa en función a la composición florística, la edad y la densidad de cada estrato por comunidad vegetal por periodos prolongados [[AMVMEB<sup>+</sup>03](#)].

De manera general el término biomasa se refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía. En

nuestro caso utilizaremos la definición de biomasa forestal como la cantidad total de materia orgánica aérea presente en los árboles incluyendo hojas, ramas, tronco principal y corteza[GS03].

La teledetección o percepción remota sin estar en un contacto físico directo, nos permite adquirir imágenes de la superficie terrestre[LK94] empleando el uso de informaciones provenientes de sensores instalados en plataformas espaciales, complementados con sistemas de información geográficas (SIG) para un análisis mas continuo y dinámico. Estos sensores remotos captan la energía reflejada o radiada por la superficie, ya sea emitida por el sol (sensores pasivos) o por el mismo sensor (sensores activos), para ser transformadas a valores digitales (VD) como imágenes satelitales, de manera secuencial para cada espacio de la tierra, a intervalos regulares de tiempo.

Las coberturas vegetales poseen un comportamiento característico en su radiación, permitiendo a través de la imágenes proveídos por los sensores remotos calcular índices que varían dentro de márgenes conocidos indicando el vigor de la vegetación o la densidad de la biomasa forestal. A esto, junto con la comparación multitemporal sera posible identificar la evolución de coberturas vegetales en periodos de tiempos obteniendo resultados cualitativos y/o cuantitativos en espacio y tiempo[MG13].

Existen muchos métodos para la detección de cambios de vegetación pero en su mayoría requieren una supervisión y un trabajo de campo como también la utilización de complejos sistemas de información geográfica bajo licencia que elevan el costo de los estudios. En vista a esto, se propone diseñar e implementar una metodología automática que permita estimar la perdida de carbono a través de la biomasa de forma dinámica, empleando procesamiento de imágenes satelitales disponibles de forma libre.

Dentro de todo esto, la falta de una mayor información nos lleva a varios cuestionamientos de como estamos manejando nuestro medio ambiente y de que efectos acarrearán esos usos, por lo que el empleo de la teledetección y las imágenes satelitales multitemporales nos permitirán realizar un análisis a lo largo del tiempo de los cambios que el ambiente está experimentando, mas aun en zonas como el Chaco Paraguayo donde la información referentes al ambiente son escasos a causa de los altos costos y las dificultades de acceso a la hora de realizar muestreos en el terreno.

## 1.1. Justificación y Motivación

REDD+ es una iniciativa que tiene como objetivo reducir la pérdida de bosques, las actividades REDD+ evitan pérdidas como emisiones de gases de efecto invernadero (conservación, no deforestación, no degradación), mantienen el depósito o stock de carbono (conservación, gestión sostenible), o incrementan el depósito por su efecto de retención o sumidero de carbono (conservación, restauración, gestión sostenible)[Oje].

El Paraguay se ha embarcado en el proceso de preparación para Reducir la Deforestación y Degradación forestal (REDD+) a fin de disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub>, conservar los bosques y su biodiversidad, por tanto se busca elaborar una estrategia nacional, con políticas socios ambientales y económicos viables, así como el desarrollo de capacidades.

Así para medir los beneficios de carbono de un proyecto REDD+, es necesario calcular la cantidad de carbono almacenado en el bosque en cuestión y luego predecir la cantidad de carbono que se podría conservar si se detiene o reduce la deforestación y la degradación forestal[Nel].

La mayoría de las investigaciones para estimar y mapear la biomasa en bosques se centran en las técnicas de Sensores Remotos; debido a las grandes extensiones de las áreas de estudio, la dificultad de acceder a las mismas, el alto costo del establecimiento de las parcelas de inventario y su limitada utilidad debido a la variabilidad natural espacial de la biomasa forestal. Por ello la necesidad de crear metodologías que ayuden al monitoreo de forma dinámica y barata nos lleva al desarrollo de herramientas libres que permitan estimar focos de alerta para la toma de acciones y controles más rigurosos a tiempo.

## 1.2. Antecedentes

Sassan Saatchi[SHB<sup>+</sup>11] ha mapeado el stock de carbono vivo en la biomasa para años próximos después de los 2000 utilizando una combinación de datos de 4079 en parcelas de inventario in situ y detección de luz vía satélite que van generando muestras de las estructuras de bosques de manera a estimar el almacenamiento de carbono, además de

imágenes ópticas y de microondas para extrapolar toda la superficie terrestre. De las parcelas de inventario in situ 493 fueron utilizados para verificar la consistencia de la estimación, donde 298 parcelas son de Latino América presentando un error cuadrático medio (RMSE) del 15 % en la predicción.

Existen trabajos realizados por estudiantes de la Facultad de Ciencias Agrarias - UNA como proyecto de grado en zonas específicas como la reserva de la biosfera del Chaco, Parque Nacional San Rafael y el Parque Nacional Defensores del chaco, todos ellos en la región Occidental del Paraguay. Implementan una metodología base hecha en el marco denominado *Desarrollo del estudio de linea de base para el sitio piloto Bosque atlántico de Alto Paraná. (BAAPA)* realizado por el Paraguay Land Use (ParLu), el cual es una iniciativa de World Wildlife Fund (WWF) Paraguay y WWF Alemania que apoya las iniciativas REDD+ en Paraguay, generando mapas de stock de carbono y los correspondientes mapas de cobertura y de Deforestación 2000–2005 y 2005–2011 a partir de muestreos de parcelas in situ y clasificaciones supervisadas con la ayuda de aplicaciones con licencias de carácter propietario, todo esto conjuntamente con la Carrera de Ingeniería Forestal de la Facultad de Ciencias Agrarias perteneciente a la Universidad Nacional de Asunción .

Un estudio realizado por por University of Maryland Institute for Advanced Computer Studies denominado Forest Cover Change in Paraguay, nos muestra el cambio de vegetación estimado en todo el país utilizando un método iterativo de etiquetado de cambio por clusterización supervisada. El trabajo detecta cambios de los años 1992 al 2000, donde aparte de proveer un etiquetado de cambios de vegetación fue realizada con imágenes de acceso libre, generando información más precisa. Las validaciones fueron hechas con varias imágenes satelitales de alta precisión, no libres, con una precisión global en todas, mayor al 90 % para cambio/no cambio de áreas forestales/no forestales[HKS<sup>+</sup>09].

### 1.3. Planteamiento del problema

Paraguay es un país que basa su economía en la agricultura y la ganadería extensiva, actividades que han afectado al recurso forestal dando como resultado extensas áreas deforestadas y degradadas.

En el informe realizado por la ENPAB [BdFM03] se menciona que existe una fuerte presión política y social, proveniente de diversos grupos que buscan transformar las tierras del Chaco paraguayo en unidades económicas de producción, cuyo enfoque gira en torno al crecimiento económico antes que al desarrollo sostenible. En muchas zonas del chaco paraguayo, el modelo de desarrollo y uso de la tierra ha producido grandes extensiones de tierras altamente degradadas, arenales, desertificación y salinización.

A pesar que existen leyes de protección para evitar la deforestación y valorar los bosques como la Ley de Deforestación Cero en la Región Oriental del Paraguay promulgada en el año 2004, y que será extendida hasta el 2018 y, la Ley de servicios ambientales 3001/06, entre otros instrumentos, los mismos necesitan apoyo para su monitoreo y aplicación efectiva, debido a que los costos en tiempo y dinero son elevados por la necesidad de realizar muestreos en el terreno y de adquirir licencias para las herramientas de monitoreo.

Con el objetivo de implementar Políticas de mitigación del Cambio Climático relativas a reducir las emisiones provenientes de la degradación y la deforestación (REDD+), los países en desarrollo deben contar con estimaciones robustas sólidas en cuanto a las reservas de carbono forestal[Par].

## 1.4. Objetivos

Atendiendo a la necesidad de metodologías alternativas para el monitoreo de pérdida de carbono en el campo ambiental, los objetivos delineados son los siguientes.

### 1.4.1. Objetivos Generales

- Desarrollar una metodología automática de análisis de imágenes satelitales multi-temporales para la generación de indicadores respecto a la pérdida del contenido de carbono en zonas del Chaco Paraguayo.



### 1.4.2. Objetivos Específicos

Para el logro de los objetivos generales los siguientes objetivos específicos son propuestos:

- Realizar detecciones de cambio automatizada dentro del área de estudio a través de la Teledetección y un SIG.
- Desarrollar ecuaciones que determinen la relación entre la biomasa y el carbono.
- Implementación de la metodología como complemento de una herramienta SIG de código abierto.

## 1.5. Organización de la Tesis

La distribución de capítulos del presente trabajo final de grado se encuentra organizado en 6 capítulos.

- En el capítulo 2 .
- En el capítulo 3 .
- En el capítulo 4 .
- En el capítulo 5 .
- En el capítulo 6 se presentan las conclusiones finales tras los experimentos y análisis de resultados del proyecto, por último los trabajos futuros que podrían dar continuidad al trabajo final de grado.



## Capítulo 2

# Cambio Climático

Es definido como cualquier cambio del clima a lo largo del tiempo, ya sea por variabilidad natural o como resultado de las actividades humanas que altera la composición de la atmósfera y que se suma a la variabilidad climática natural observada en periodos de tiempos comparables [[Rob02](#)].

La tierra esta cubierta por una capa de gases que deja penetrar energía solar que calienta la superficie terrestre. Algunos de los gases en la atmósfera, llamados los gases de Efecto Invernadero (GEI), impiden el escape de este calor hacia el espacio . Este es un escape que mantiene a la tierra a una temperatura promedio arriba del punto de congelación del agua y permite la vida. Sin embargo, las actividades humanas están produciendo un exceso de gases que están potencialmente calentando el clima de la tierra[[Dur](#)].

### 2.1. Ciclo de carbono

Mediante la fotosíntesis, las plantas absorben el dióxido de carbono existente en el aire o el agua, y lo acumulan en los tejidos vegetales en forma de materia orgánica. Posteriormente, los animales herbívoros se alimentan de estos vegetales, de los que obtienen energía, para transferir esa energía a los demás niveles (carnívoros que se alimentan de los herbívoros). Esa energía sigue varios caminos: por un lado es devuelto a la atmósfera como dióxido de carbono mediante la respiración; por otro lado se deriva hacia el medio acuático, donde puede quedar como sedimentos orgánicos, o combinarse con las aguas

para producir carbonatos y bicarbonatos (suponen el 71 % de los recursos de carbono de la Tierra). En su acumulación en las zonas húmedas genera turba, resultado de una descomposición incompleta, lo que da lugar a la formación de depósitos de combustibles fósiles como petróleo, carbón y gas natural.

El ciclo del carbono queda completado gracias a los organismos descomponedores, los cuales llevan a cabo el proceso de mineralizar y descomponer los restos orgánicos, cadáveres, excrementos, etc. Además de la actividad que llevan a cabo los reino vegetal y animal en el ciclo del carbono, también entra dentro de éste el carbono liberado mediante la putrefacción y la combustión[nat]

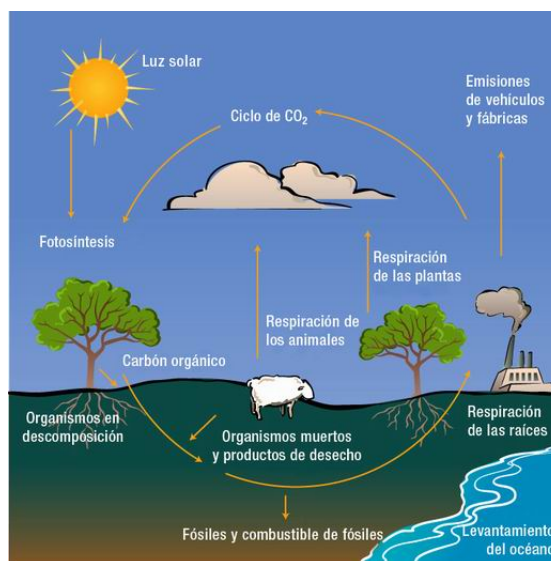


FIGURA 2.1: Ciclo de carbono.

### 2.1.1. Secuestro de carbono

El CO<sub>2</sub> y otros gases invernaderos actúan atrapando la energía calórica (radiación solar de onda corta) reflejada de la superficie de la tierra y las nubes. Este calor retenido puede conducir al calentamiento global en el planeta. A través del secuestro de carbono, los niveles del dióxido de carbono atmosférico pueden reducirse en la misma medida que los niveles de carbono orgánico del suelo aumentan. Si el carbono orgánico del suelo no es alterado, puede permanecer en el suelo por muchos años como materia orgánica estable. Este carbono es entonces secuestrado o removido de la atmósfera para ser reciclado. De

esta forma se pueden reducir los niveles de CO<sub>2</sub>, disminuyendo las probabilidades de calentamiento global[eeS].

### 2.1.2. Pérdida de Carbono

Nos referimos a pérdida de carbono a aquella porción que no pudo ser almacenada o capturada en el intercambio normal que ocurre entre la superficie terrestre y la atmósfera en el ciclo de carbono, contribuyendo al calentamiento global mediante la emisión de dióxido de carbono que compone el grupo de gases de efectos invernaderos.

## 2.2. Biomasa

Es aquel material orgánico biodegradable y no fosilizado originado de plantas, animales y microorganismos; incluye productos, subproductos, residuos y desechos de la agricultura, forestería e industrias afines, así como las fracciones orgánicas y no fosilizadas de los desechos industriales y municipales. La biomasa también incluye los gases y líquidos recuperados de la descomposición de materiales orgánicos biodegradables y no fosilizados[SH08]. La biomasa es considerada como la masa total de organismos vivos en una zona o volumen determinado; a menudo se incluyen los restos de plantas que han muerto recientemente (biomasa muerta). La cantidad de biomasa se expresa mediante su peso en seco o su contenido de energía de carbono o de nitrógeno [GMKM<sup>+</sup>87].

### 2.2.1. Biomasa Forestal

La biomasa forestal se define como el peso (o estimación equivalente) de materia orgánica que se encuentra en un determinado ecosistema forestal por encima y por debajo del suelo. Normalmente es cuantificada en toneladas por hectárea de peso verde o seco. Es frecuente separada en componentes, donde los más típicos corresponden a la masa del fuste, ramas, hojas, corteza, raíces, hojarasca y madera muerta[SGG00]. En términos de pérdida y secuestro, representa la cantidad potencial de C que puede ser liberada a la atmósfera debida a la deforestación o la conservada en la superficie terrestre cuando los bosques son correctamente gestionados[LB05].

## 2.3. Estimación de carbono

Existen dos métodos para calcular la biomasa aérea en los ecosistemas en base a la disponibilidad de datos para su estimación[PS]:

- Método directo: este método utiliza datos colectados a partir de mediciones destructivas de la vegetación en una unidad de superficie determinada, es poco utilizado por sus altos costos.
- Método indirecto: en caso de no contar con datos de biomasa colectados destructivamente y tener sólo información secundaria como altura y diámetro, es posible estimar el carbono contenido utilizando una serie de ecuaciones de regresión.

La estimación del C almacenado en la biomasa, en general, se calcula aceptando que el contenido de C total corresponde al 50 % del peso de la biomasa seca [Sh01]. Sin embargo, diferentes estudios denotan la variabilidad del contenido de según especie y tejido del árbol[F<sup>+</sup>00].

### 2.3.1. Diabetes en Paraguay

En marzo de 2014 el Programa Nacional de Diabetes estimó que existen unas 700.000 personas (11 % de la población) en riesgo de desarrollar la afección y 400.000 en tratamiento [20m14].

### 2.3.2. Aumento de la prevalencia de la diabetes

La cantidad de personas con diabetes ha ido en aumento, esperándose que de las 171 millones de personas con esta enfermedad desde el año 2000, aumente a 336 millones para el 2030, con un incremento de un 86 %. En Latinoamérica aumentará de 13,3 millones a 33 millones para el año 2030 con incremento de 146 % [WRG<sup>+</sup>04]. Una estimación del aumento de los casos de diabetes hacia el año 2030, realizada por la Federación Internacional de Diabetes [idf14] se muestra en la TABLA 2.1.

TABLA 2.1: Estimación del aumento de los casos de Diabetes al año 2030 para países de Latinoamérica, de acuerdo a la Federación Internacional de Diabetes.

País	Año 2000	Año 2030	Aumento de los casos
Argentina	1.426.000	2.457.000	72,30 %
Bahamas	12.000	26.000	116,6 %
Bolivia	207.000	562.000	171,49 %
Brasil	4.553.000	11.305.000	148, 29 %
Chile	495.000	1.047.000	111,51 %
Colombia	883.000	2.425.000	174,63 %
Costa Rica	76.000	237.000	211,84 %
Cuba	480.000	855.000	178,12 %
República Dominicana	245.000	594.000	142,4 %
Ecuador	341.000	921.000	170 %
El Salvador	103.000	320.000	210,6 %
Guatemala	139.000	447.000	221,58 %
Haití	161.000	401.000	149 %
Honduras	81.000	269.000	232 %
Jamaica	81.000	189.000	133,33 %
México	2.179.000	6.130.000	181,32 %
Nicaragua	68.000	246.000	261,76 %
Panamá	59.000	155.000	162,71 %
<b>Paraguay</b>	<b>102.000</b>	<b>324.000</b>	<b>217,64 %</b>
Perú	754.000	1.961.000	160,07 %
Trinidad y Tobago	60.000	125.000	108,3 %
Uruguay	154.000	224.000	45,45 %

## 2.4. Enfermedades del Ojo

La enfermedad diabética del ojo se refiere a un grupo de problemas de los ojos que pueden desarrollarse en las personas con diabetes. Todos estos problemas pueden causar una pérdida de visión severa o incluso la ceguera. La enfermedad diabética del ojo puede incluir:

- Retinopatía diabética: daño en los vasos sanguíneos de la retina.
- Cataratas: se produce cuando el cristalino (el “lente” del ojo) se nubla.
- Glaucoma: ocurre cuando el líquido dentro del ojo drena muy lentamente. Cuando se acumula este líquido, la presión dentro del ojo aumenta y puede dañar el nervio óptico y causar la pérdida de su visión.

## 2.5. Reseña sobre retinopatía diabética

Se entiende por retinopatía diabética como una complicación de los ojos provocada por la diabetes que está causada por el deterioro de los vasos sanguíneos, glaucoma y cataratas. Como consecuencia del avance de la enfermedad la visión se deteriora debido a que la imagen enviada al cerebro se hace borrosa.

### 2.5.1. Causas

Cuando los niveles de azúcar en la sangre son muy altos durante largos períodos de tiempo, los capilares (pequeños vasos sanguíneos) que suministran sangre a la retina pueden deteriorarse. Con el tiempo, estos vasos sanguíneos comienzan a filtrar líquidos y grasas, produciendo un edema (hinchazón). Eventualmente, puede ocurrir una condición llamada isquemia, durante el cual los vasos sanguíneos pueden taparse. Estos problemas son asociados a la presencia de la retinopatía diabética [[AAO13a](#)].

### 2.5.2. Factores de riesgo

El tiempo de duración de la diabetes es el principal factor de riesgo, después de 15 años de diabetes, el 97,5 % de los pacientes con diabetes tipo I y el 77,8 % de los pacientes con diabetes tipo II, padecen algún grado de retinopatía diabética. En este sentido, el control metabólico es de crucial importancia para prevenir la aparición o disminuir la progresión de la retinopatía diabética. Según el ensayo sobre el control y complicaciones de la diabetes, el control intensivo de la glucemia reduce el riesgo de desarrollar retinopatía diabética en un 76 %, y retarda su progresión en un 54 %. Otros factores como la hipertensión arterial están asociadas a mayor riesgo de progresión del edema macular y de la retinopatía diabética en general, cuando no está controlada en forma crónica. Los diabéticos tipo I con micro albuminuria tienen tres veces más probabilidades de tener retinopatía diabética. El embarazo acelera la progresión de la retinopatía diabética, por lo que las mujeres diabéticas embarazadas requieren controles de retina más frecuentes [[ohhs](#), [AAO13b](#)].



### 2.5.3. Síntomas

A medida que la enfermedad progresa, los síntomas de la retinopatía diabética pueden incluir [AAO13c]:

- Manchas, puntos o algo similar a hilos de telarañas oscuras flotando en la visión (llamados miodesopsias, manchas flotantes o “moscas” volantes);
- Visión borrosa;
- Visión que cambia periódicamente de borrosa a clara;
- Áreas oscuras (completa o parcialmente) en el campo de visión;
- Mala visión nocturna;
- Colores que aparecen descoloridos o diferentes;
- Pérdida de la visión. Los síntomas de la retinopatía diabética afectan, por lo general, a ambos ojos.

### 2.5.4. Etapas de la retinopatía diabética

La retinopatía diabética tiene cuatro fases [Dia06]:

**Retinopatía no proliferativa leve:** en esta fase inicial se producen microaneurismas, que son pequeñas áreas de inflamación en forma de globo en los diminutos vasos sanguíneos de la retina.

**Retinopatía no proliferativa moderada:** a medida que la enfermedad avanza, se produce el bloqueo de algunos de los vasos sanguíneos que alimentan la retina.

**Retinopatía no proliferativa grave:** se produce el bloqueo de muchos más vasos sanguíneos, lo cual impide el aporte sanguíneo a diversas áreas de la retina. Estas áreas de la retina envían señales al cuerpo para que cree nuevos vasos sanguíneos para poder alimentarse.

**Retinopatía proliferativa:** en esta fase avanzada, las señales enviadas por la retina para su alimentación desencadenan el crecimiento de nuevos vasos sanguíneos. Estos nuevos vasos sanguíneos son anormales y frágiles. Crecen a lo largo de la retina y de

la superficie del gel vítreo transparente que llena el interior del ojo. Por sí solos, estos vasos sanguíneos no causan síntomas ni pérdida de visión. Sin embargo, sus paredes son delgadas y frágiles. Si presentan filtraciones de sangre, puede producirse una pérdida grave de visión e incluso la ceguera [[opt14](#)].

### **2.5.5. Tratamiento**

Durante las tres primeras etapas de la retinopatía diabética no se necesita un tratamiento, a menos que tenga edema macular. Para prevenir el progreso de la retinopatía diabética, las personas con diabetes deben controlar los niveles de azúcar en la sangre, la presión arterial y el colesterol [[ohhs](#)].

#### **2.5.5.1. Fotocoagulación con Láser**

La fotocoagulación es un proceso no quirúrgico que consiste en realizar aplicaciones de láser térmico sobre la superficie retinal. Estas quemaduras destruyen la retina en el lugar en que son aplicadas, creando una cicatriz.

Antes de la existencia de la fotocoagulación, la retinopatía diabética conducía con frecuencia a la pérdida total de visión [[KJ04](#)].

#### **2.5.5.2. Terapia médica intravítrea**

Los medicamentos intravítreos tienen un efecto temporal, por lo cual no sustituyen al tratamiento con láser. Dentro de estos se encuentran los esteroides (Triamcinolona o dexametasona de acción prolongada), usados en el edema macular, pero aumentan el riesgo de hipertensión ocular y de catarata, y los antiangiogénicos que mejoran el edema macular y reducen la neovascularización de la retina [[BvBMC11](#)].

#### **2.5.5.3. Tratamiento quirúrgico**

El tratamiento quirúrgico de la retinopatía diabética sólo es necesario en casos muy avanzados, fundamentalmente cuando se produce una hemorragia vítrea. La intervención se denomina vitrectomía y consiste en [[Man12](#)]:

- Aspirar la sangre de la hemorragia.
- Fijar el desprendimiento de la retina.
- Completar el proceso con una fotocoagulación en la misma operación para evitar que se vuelva a repetir.

## 2.6. Detección de retinopatía diabética

Para entender mejor la detección de retinopatía diabética es necesario definir que es un diagnóstico. Básicamente consiste en determinar la presencia o ausencia de una enfermedad, para este caso particular es la presencia ó ausencia de la retinopatía diabética. Un diagnóstico positivo determina la presencia de retinopatía diabética y un diagnóstico negativo determina la ausencia de retinopatía diabética. Cuando se habla de diagnóstico masivo se introduce el concepto de *screening*, que no es más que la evaluación de sujetos asintomáticos respecto a una patología específica, antes de que ellos consulten espontáneamente. Desde el punto de vista teórico, esta acción médica se justifica, cuando la enfermedad repercute en la vida de quienes la padecen, tenga una prevalencia importante, presente un tratamiento efectivo y cuente con un método de diagnóstico eficiente de alta sensibilidad [C<sup>+</sup>03, BBK94].

El tamizaje ofrece una prueba a una población, en este caso a todos los pacientes con diabetes y aquellos positivos son referidos para mayor investigación o tratamiento. El mayor cuidado que se debe tener en un programa de *screening*, es tratar de disminuir los falsos negativos, estos son casos de personas con la enfermedad que fueron diagnosticadas como sanas [vBC].

La Organización Mundial de la Salud [oms] estableció los 10 principios para establecer un programa de *screening* de cualquier enfermedad [Zav69, WJ68]:

- La condición buscada debe ser un problema de salud importante.
- Debe existir un tratamiento adecuado para los pacientes con la enfermedad detectada.
- Deben estar disponibles las instalaciones para el diagnóstico y tratamiento.

- Debe haber una etapa latente o sintomática temprana reconocible.
- Debe haber una prueba o un examen adecuado.
- La prueba debe ser aceptable para la población.
- La historia natural de la enfermedad, incluyendo el desarrollo latente de la enfermedad, debe entenderse adecuadamente.
- Debe haber una política de acuerdo sobre a quiénes tratar como pacientes.
- El costo de la detección de casos (incluyendo el diagnóstico y el tratamiento de los pacientes diagnosticados) debe ser económicamente equilibrada en relación con posibles gastos en atención médica en su conjunto.
- La detección de casos debe ser un proceso continuo.

Un programa de *screening* de la retinopatía diabética con cámara fotográfica digital se ajusta perfectamente a estos principios [vis14] ya que la ceguera por retinopatía diabética es un problema de salud pública. Se conoce claramente su historia natural y su epidemiología, posee un periodo de latencia de varios años, se cuenta con un tratamiento adecuado como es el láser, se sabe a quién tratar, el costo de tratar a una persona en riesgo es mucho menor que el costo que genera un tratamiento en estados avanzados.

La retinopatía diabética es evitable con medidas preventivas, de ahí que el *screening* sistemático de los diabéticos es de suma importancia. Esta metodología epidemiológica, consiste en la evaluación de individuos asintomáticos para detectar la enfermedad temprana. La oftalmoscopia o estudio del fondo de ojo es una técnica de diagnóstico que consiste en visualizar el polo posterior del globo ocular, que incluye retina, disco óptico, coroides y vasos sanguíneos [exa14]. Existen varias maneras de realizar un estudio de fondo de ojo.

- Oftalmoscopia directa: técnica sencilla en la cual la exploración ocular se realiza mediante el uso de un oftalmoscopio monocular.
- Oftalmoscopia indirecta: técnica en la cual la exploración ocular se realiza mediante el uso de un oftalmoscopio binocular y de una fuente de luz externa.

- Biomicroscopia: o también conocida como oftalmoscopia indirecta con lámpara de hendidura técnica compleja en la cual la exploración ocular se realiza mediante el empleo de una lámpara de hendidura.
- Cámara digital: a diferencia del oftalmoscopio, los retinógrafos o cámaras digitales permiten obtener fotografías de la retina.

En la TABLA 2.2 se observan las diferencias entre los métodos de estudio del fondo de ojo, donde dilatación se refiere a agrandar las pupilas, para permitir al oftalmólogo observar detalladamente el interior del ojo.

TABLA 2.2: Estudio del fondo de ojo.

	Costo	Manejo	Disponibilidad	Sensitividad	Dilatación	Archivo
Oft. directo	Bajo	Facil	Si	Baja	Si	No
Oft. indirecto	Medio	Especial	No siempre	Buena	Si	No
Biomicroscopia	Medio	Especial	Casi Siempre	Optima Gold Standard	Si	No
Cámara digital	Ato	Fácil	A veces	Muy Buena	Si	Si

Cualquier persona con diabetes debería someterse a una exploración ocular completa al menos una vez al año. Si tiene retinopatía diabética, puede que deba someterse a una exploración ocular más a menudo. Las personas con retinopatía proliferativa pueden reducir el riesgo de sufrir ceguera en un 95 % si reciben tratamiento a tiempo y se someten a un seguimiento adecuado.

La FIGURA 2.2 muestra la comparación de la percepción visual entre una persona con una retina sana y otra que sufre de retinopatía diabética, ya en una etapa avanzada de la enfermedad.



(a) Visión de una persona sana.

(b) Visión de una persona con retinopatía diabética en etapa avanzada.

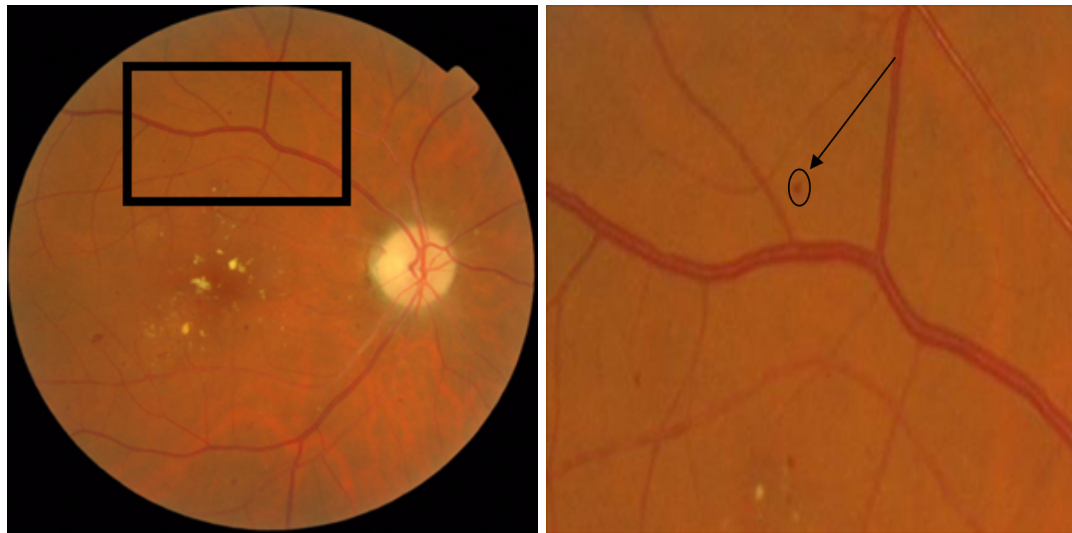
FIGURA 2.2: Daño causado por la retinopatía diabética.

## 2.7. Estructuras anatómicas y patologías

A continuación se expone en mayor detalle las estructuras anatómicas y patologías relacionadas con la retinopatía diabética, las cuales fueron consideradas en la etapa de detección del método propuesto.

### 2.7.1. Microaneurismas

Los microaneurismas son dilataciones que afectan a capilares de diversas áreas vasculares como el corazón, el riñón y el ojo. Los oftalmólogos saben que, si bien se presentan en varios procesos patológicos como hipertensión, oclusión venosa y alteraciones hemorreológicas, son característicos de la retinopatía diabética. En la FIGURA 2.3 se puede ver los microaneurismas en una imagen de retina.



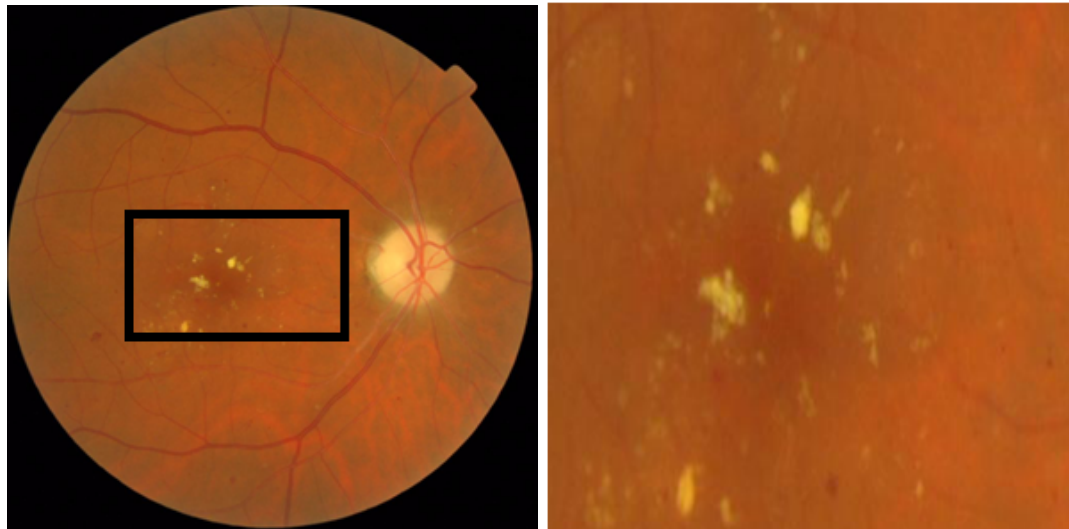
(a) Imagen de Retina.

(b) Microaneurisma.

FIGURA 2.3: Microaneurismas.

### 2.7.2. Exudados duros

Los exudados duros son lípidos o depósitos lipoproteínicos usualmente localizados en la capa externa de la retina, ellos tienen una apariencia serosa como manchas blanquecinas de bordes bien definidos y son el resultado del escape de fluidos sanguíneos de los microaneurismas que son permeables, y también de los capilares pequeños que circundan la zona macular y que normalmente son impermeables. En algunas ocasiones tienen una forma de anillo redondeado que se denomina retinopatía circinada y son frecuentemente asociados con edema retinal. Elevados niveles de colesterol se correlacionan con más severas y extensas áreas de exudados duros. Sin embargo, un incremento en la severidad de los exudados duros no es asociado a un aumento de riesgo de progresión de la retinopatía. Bajos niveles de lípidos en sangre pueden ayudar a reducir la severidad de los exudados duros en la retina [Sá00]. En la FIGURA 2.4 se observa la diferencia entre una retina sana y una retina con exudados duros, los cuales se presentan como manchas amarillas con formas irregulares.



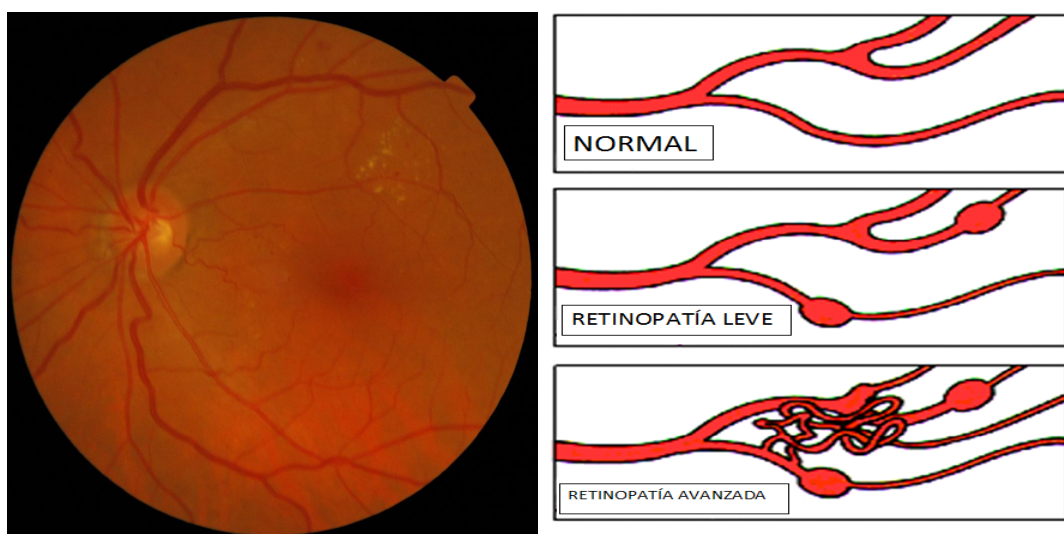
(a) Imagen de Retina.

(b) Exudados duros.

FIGURA 2.4: Exudados duros.

### 2.7.3. Vasos sanguíneos

Son estructuras huecas y tubulares que conducen la sangre por el ojo. La diabetes daña estos vasos encargados de irrigar la retina. Cuando la enfermedad avanza se produce la creación de nuevos vasos sanguíneos y prolifera el tejido fibroso en la retina. En la FIGURA 2.5 se puede apreciar los vasos sanguíneos en las distintas etapas de la retinopatía diabética.



(a) Imagen de Retina.

(b) Vasos sanguíneos.

FIGURA 2.5: Vasos sanguíneos.



## 2.8. Resumen

Como se ha comentado en este capítulo, las personas con retinopatía diabética necesariamente deben padecer diabetes, es por eso que se menciona sobre los tipos de diabetes, haciendo énfasis en que los de tipo I son más propensos a desarrollar la enfermedad. Con respecto a las estimaciones estadísticas sobre la diabetes en nuestro país, predicen un aumento de la prevalencia de personas con diabetes y que la misma avanza de manera acelerada, por lo que es de vital importancia que se pueda cubrir esta demanda de pacientes con diabetes. Es importante conocer las causas y los factores de riesgos de la retinopatía diabética de manera a tomar las precauciones pertinentes, destacando el hecho de que recién en el estado más avanzado de la enfermedad las personas detectan los síntomas, por lo que es vital que los pacientes con diabetes se hagan el examen de fondo de ojo regularmente de tal manera a que se pueda detectar la retinopatía de forma temprana y el tratamiento pueda ser eficaz. Básicamente la detección de esta enfermedad radica en la exploración del fondo de ojo en busca de patologías como exudados duros y microaneurismas y así también irregularidades en las estructuras anatómicas del ojo como la neovascularización. Es esencial conocer las propiedades de coloración, formas y distribución de estas patologías y estructuras anatómicas de tal manera que se logre la implementación automática de estos y así poder asistir en el diagnóstico de esta enfermedad. En el siguiente capítulo se presenta el marco teórico de las técnicas de visión por computadora que se utilizan en los diferentes módulos de la metodología propuesta.



# Bibliografía

- [20m14] Diabetes, qué es? Causas y tratamiento. <http://http://20medios.com/2014/03/la-diabetes-que-es-causas-y-tratamiento/>, 2014.
- [AAO13a] Causas de la retinopatía diabética. <http://www.geteyesmart.org/eyesmart/diseases-es/retinopatia-diabetica/causas.cfm>, 2013.
- [AAO13b] Factores de Riesgo de la retinopatía diabética. <http://www.geteyesmart.org/eyesmart/diseases-es/retinopatia-diabetica/riesgo.cfm>, 2013.
- [AAO13c] Síntomas de la retinopatía diabética. <http://www.geteyesmart.org/eyesmart/diseases-es/retinopatia-diabetica/sintomas.cfm>, 2013.
- [ÁJB<sup>+</sup>01] G Ávila, F Jiménez, J Beer, M Gómez, and M Ibrahim. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en costa rica. carbon storage and fixation, and evaluation of environmental services in agroforestry systems in costa rica. *Agroforestería en las Américas (CATIE)*, 8(30):32–35, 2001.
- [AMVMEB<sup>+</sup>03] Miguel Acosta Mireles, Alejandro Velázquez Martínez, Jorge D Etchevers Barra, J Jesús Vargas Hernández, Hugo Ramírez Maldonado, Fabián Islas Gutiérrez, and ; Instituto de Recursos Naturales Programa Forestal. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. *Diseño y aplicación de un método para medir los almacenes de carbono en sistemas con vegetación forestal y agrícolas de ladera en México*. PhD thesis, Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México, 2003.

- [BBK94] Robert Beaglehole, Ruth Bonita, and Tord Kjellström. *Epidemiología básica*. OPS, 1994.
- [BdFM03] Isabel Basualdo, Isabel Gamarra de Fox, and Miguel Angel Morales. *Estrategia nacional y plan de acción para la conservación de la biodiversidad del Paraguay: ENPAB, Estrategia Nacional y Plan de Acción de Biodiversidad, 2004-2009*. Presidencia de la República, Secretaría del Ambiente, 2003.
- [BvBMC11] F Barriá-von Bischhoffshausen and F Martínez-Castro. Guía practica clínica de retinopatía diabética para latinoamérica. *Arlington, TX: Asociación Panamericana de Oftalmología*, page 27, 2011.
- [C<sup>+</sup>03] UK National Screening Committee et al. Criteria for appraising the viability, effectiveness and appropriateness of a screening programme, 2003.
- [Dia06] Álvarez R Retinopatía Diabética. Pontificia universidad católica de chile. *Boletín de la escuela de medicina*, 31(3), 2006.
- [Dur] Kris Vanessa Almando Dure. Estimación de carbono almacenado en el parque nacional defensores del chaco según formación vegetal mediante imágenes satelitales, año 2014.
- [eeS] Secuestro de Carbono en el Suelo. Captura de carbono.
- [exa14] Pruebas oftalmológicas. <http://www.mapfre.es/salud/es/cinformativo/fundoscopia-oftalmoscopia.shtml>, July 2014.
- [F<sup>+</sup>00] JOHN K Francis et al. Estimating biomass and carbon content of saplings in puerto rican secondary forests. *Caribbean Journal of Science*, 36(3/4):346–349, 2000.
- [GMKM<sup>+</sup>87] Apolo Rolando Garcidueñas Martínez, R Keyes, Martínez Menez Michael, R Mario, Zarate Lara, P Guillermo, and ; Programa Forestal. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. *Producción de biomasa y acumulación de nutrientes en un rodal de Pinus montezumae Lamb*. PhD thesis, Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillos, México, 1987.

- [GS03] M Garzuglia and M Saket. Wood volume and woody biomass. *Food and Agricultural Organization of the United Nations. Roma*, page 30, 2003.
- [HKS<sup>+</sup>09] Chengquan Huang, Sunghee Kim, Kuan Song, John RG Townshend, Paul Davis, Alice Altstatt, Oscar Rodas, Alberto Yanosky, Rob Clay, Compton J Tucker, et al. Assessment of paraguay’s forest cover change using landsat observations. *Global and Planetary Change*, 67(1):1–12, 2009.
- [idf14] International Diabetes Federation. <http://www.idf.org/>, July 2014.
- [KJ04] J Kanski Jack. Oftalmología clínica, 2004.
- [LB05] Dengsheng Lu and Mateus Batistella. Exploring tm image texture and its relationships with biomass estimation in rondônia, brazilian amazon. *Acta Amazonica*, 35(2):249–257, 2005.
- [LK94] Thomas M Lillesand and Ralph W Kiefer. Remote sensing and image interpretation. john willey & sons. Inc, *United States of America*, 1994.
- [Man12] Jordi Mesa Manteca. Tratamiento de la retinopatía diabética. *Diabéticos: Presente y futuro*, (82):1, 2012.
- [MG13] Raul Martínez Garrido. Normalización radiométrica iterativa en detección de cambios: seguimiento del tipo de cambios asociados al ecosistema mediterráneo. 2013.
- [nat] natureduca. El ciclo del carbono.
- [Nel] Corcoran E. Duarte C. M. Valdés L. De Young C. Fonseca L. Grimsditch G Nellemann, C. Carbono azul. evaluación de una respuesta rápida.
- [ohhs] U.S. Department of health and National Eye Institute human services, National Institutes of health. La retinopatía diabética. lo que usted debe saber.
- [Oje] Fabian Miguel Peralta Ojeda. Analisis del cambio de cobertura de la tierra y estimacion de carbono en el area para parque nacional san rafael, año 2008/2013.

- [oms] Organización Mundial de la Salud, month = jun, year = 2014, howpublished = "<http://www.who.int/es/>".
- [opt14] Retinopatía Diabética. <https://www.optos.com/ca/Pacientes/Patologias-oculares/Retinopatia-diabetica/>, 2014.
- [Par] WWF Paraguay y la Facultad de Ciencias Agrarias ParLu. Desarrollo del estudio de línea de base para el sitio piloto bosque atlántico alto parana (baapa).
- [PS] Biol Rocio Becerril Piña and Enrique González Sosa. Estimación del contenido y captura de carbono en zonas semiáridas microcuenca "el carmen", gto.
- [Rob02] Michel Robert. *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra*, volume 96. Food & Agriculture Org., 2002.
- [SGG00] Bastienne Schlegel, Jorge Gayoso, and Javier Guerra. Manual de procedimientos para muestreos de biomasa forestal. *Universidad Austral de Chile*, 2000.
- [SH08] Zenia Salinas and Paulo Hernández. Guía para el diseño de proyectos mdl forestales y de bioenergía. 2008.
- [SHB<sup>+</sup>11] Sassan S Saatchi, Nancy L Harris, Sandra Brown, Michael Lefsky, Edward TA Mitchard, William Salas, Brian R Zutta, Wolfgang Buermann, Simon L Lewis, Stephen Hagen, et al. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(24):9899–9904, 2011.
- [Sli01] A Slijepcevic. Loss of carbon during controlled regeneration burns in eucalyptus obliqua forest. *TASFORESTS-HOBART*-, 13(2):281–290, 2001.
- [Sá00] Dr. Pedro E. Sáenz. Retinopatía diabética. <http://www.fihu-diagnostico.org.pe/revista/numeros/2000/enefeb00/19-30.html>, 2000.

- [vBC] Fernando Barría von Bischhoffshausen and Francisco Martínez Castro. Guía práctica clínica de retinopatía diabética para latinoamérica. *Revista Médico Oftalmólogo*, 2011.
- [vis14] Foto-screening de Retinopatía Diabética en Paraguay. <http://vision2020la.wordpress.com/2012/09/16/foto-screening-de-retinopatia-diabetica-en-paraguay/>, July 2014.
- [WJ68] JMG Wilson and G Jungner. Principles and practice of screening. *WHO: Geneva*, 1968.
- [WRG<sup>+</sup>04] Sarah H Wild, Gojka Roglic, Anders Green, Richard Sicree, and Hilary King. Global prevalence of diabetes: estimates for the year 2000 and projections for 2030 response to rathman and giani. *Diabetes care*, 27(10):2569–2569, 2004.
- [Zav69] Mitchell R Zavon. Principles and practice of screening for disease. *Archives of Internal Medicine*, 123(3):349–349, 1969.