



# **UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**TESIS**

### **ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD DE PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE AGAVE TEQUILERO**

**QUE PRESENTA:**

**BLANCA ANGÉLICA GARCÍA GARCÍA**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**ASESOR: DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA.**

**AGUSTÍN JAIME CASTRO MONTOYA**

**Morelia Michoacán Febrero del 2014**



## AGRADECIMIENTOS

La presente Tesis es producto de un esfuerzo en el cual, directa o indirectamente participaron varias personas, leyendo, opinando, corrigiendo, teniéndome paciencia, dando ánimo, desvelándose, motivando, acompañando en los momentos de crisis y en los momentos de felicidad.

Agradezco a Dios, por hacer siempre de mi camino el más sencillo, por ser la fuente de motivación en los momentos de angustia y desesperación. Gracias por permitirme lograr un sueño que veía muy lejos, y sobre todo gracias por mi familia ya que sin su apoyo, comprensión, sacrificios, regaños y desvelos no sería lo que soy.

A mi papá *Armando García Martínez* porque siempre has creído en mí al igual que mi mamá, por siempre apoyarme a pesar de las circunstancias e impulsarme a construir mis sueños. Por todas esas palabras de aliento en los momentos difíciles y por tu indudable amor.

A mi mami *Yolanda García López* que no tengo palabras para agradecerle por todo su inmenso amor y entrega, por todas esas noches de desvelo acompañándome, los regaños que sé, siempre han sido para hacer de mí una mejor persona. Gracias por estar siempre a mi lado, ser mi ejemplo y el pilar de mi vida.

A mi hermano *Armando García García* gracias por preocuparte siempre de mi bienestar, por estar en mi vida tanto en los buenos como en los malos momentos, por creer y confiar en mí.

A mi otro papá, *Lucas López Ávalos* que te extraño mucho pero sé que estás presente en cada instante de mi vida, gracias por tu amor y el ejemplo que nos dejaste el cual día a día me inspira para ser mejor.

*Mariano Guillén Palomares* gracias por estar presente en mi vida, por tu cariño, tus consejos, tu apoyo incondicional, por creer en mí, así como la paciencia y comprensión que me has brindado no sólo durante esta etapa.

A mi madrina *Evelia Godínez Aguilar* que ha sido mi maestra y parte de mi familia, gracias porque personas como usted motivan a que un estudiante persevere en alcanzar sus metas.

A aquellos amigos que recorrieron esta aventura conmigo, los que la iniciaron junto a mí y a los que nos encontramos en el camino, todos aquellos que físicamente no se encontraban

pero que siempre estuvieron presentes de una u otra forma *Sergio Castro Aranda*, gracias por tu apoyo y consejos por alentarme día a día, *Eduardo Hernández Huerta* gracias por compartir conmigo momentos de frustración y alegrías.

A mí grupo de trabajo gracias ya que sin su apoyo, ayuda y consejos esto no lo hubiera logrado. *Tania Méndez Romero, Noe S. Castillo Bucio y Manuel Rincón Villegas*

Sin lugar a dudas este trabajo no lo podría haber realizado sin la formación que recibí a lo largo de mi vida académica. Gracias a todos los profesores que contribuyeron en mi formación, gracias por alentarme a superarme en especial al Prof. *Marco Antonio Valencia Vidrio*, M. C. *Armando López Zamudio*, Q.F.B. *Salvador Escobar Argote* quiénes fueron un gran apoyo en la decisión de mí carrera así como un ejemplo a seguir. A los doctores *Medardo Serna González* y *Agustín J. Castro Montoya* por sus consejos, excelentes clases, paciencia y disponibilidad para resolver dudas, quienes además su enseñanza no se limitó a un aspecto académico sino que además me transmitieron enseñanzas de vida. Al Dr. Agustín además por la orientación y ayuda brindada como asesor de tesis, por su apoyo que me permitió aprender mucho más de lo estudiado en el proyecto.

A mis sinodales Dr. *Jaime Saucedo Luna* y la Dra. *Aurora Teresita Martínez Hernández* por sus valiosas sugerencias, disponibilidad y el tiempo invertido en la revisión de esta tesis.

A la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) por el apoyo económico brindado para la realización de éste proyecto.

## ÍNDICE

|                                                                                        |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ÍNDICE DE FIGURAS .....                                                                | v         |
| ÍNDICE DE TABLAS .....                                                                 | vii       |
| RESUMEN .....                                                                          | viii      |
| ABSTRACT .....                                                                         | ix        |
| <b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>                                                            | <b>1</b>  |
| 1.1 JUSTIFICACIÓN.....                                                                 | 2         |
| 1.2 HIPÓTESIS.....                                                                     | 3         |
| 1.3 OBJETIVO GENERAL .....                                                             | 3         |
| • OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                                          | 3         |
| <b>2. BIOCOMBUSTIBLES .....</b>                                                        | <b>4</b>  |
| 2.1 ANTECEDENTES.....                                                                  | 4         |
| 2.2 BIOCOMBUSTIBLES.....                                                               | 5         |
| • BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS.....                                                         | 5         |
| • BIOCOMBUSTIBLES GASEOSOS .....                                                       | 6         |
| • BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS .....                                                       | 6         |
| • BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS DE PRIMERA GENERACIÓN .....                                 | 6         |
| • BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS DE SEGUNDA GENERACIÓN .....                                 | 8         |
| • BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS DE TERCERA GENERACIÓN .....                                 | 8         |
| 2.3 BIOETANOL COMO COMBUSTIBLE.....                                                    | 9         |
| 2.4 BIOCARBURANTES QUE EMPLEAN ETANOL.....                                             | 15        |
| <b>3. MATERIA PRIMA PARA LA OBTENCIÓN DE BIOETANOL .....</b>                           | <b>16</b> |
| 3.1 INTRODUCCIÓN .....                                                                 | 16        |
| 3.2 MATERIAL LIGNOCELULÓSICO COMO MATERIA PRIMA PARA LA<br>OBTENCIÓN DE BIOETANOL..... | 18        |
| 3.3 COMPOSICIÓN DEL MATERIAL LIGNOCELULÓSICO.....                                      | 21        |
| 3.4 COMPONENTES ESTRUCTURALES .....                                                    | 22        |
| 3.4.1 CELULOSA.....                                                                    | 22        |

|           |                                                              |           |
|-----------|--------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.4.2     | HEMICELULOSA.....                                            | 24        |
| 3.4.3     | TIPOS DE HEMICELULOSA .....                                  | 26        |
| •         | XILANOS .....                                                | 27        |
| •         | MANANOS.....                                                 | 27        |
| •         | GALACTANOS.....                                              | 27        |
| •         | GALACTOGLUCOMANANOS.....                                     | 27        |
| •         | GLUCOMANANOS .....                                           | 28        |
| •         | GLUCOROXILANOS .....                                         | 28        |
| •         | XILOGLUCANOS.....                                            | 28        |
| •         | GLUCANOS .....                                               | 29        |
| •         | SUSTANCIAS PÉCTICAS .....                                    | 29        |
| 3.4.4     | LIGNINA .....                                                | 30        |
| •         | TIPOS DE ENLACE:.....                                        | 31        |
| •         | ENLACE TIPO ETER .....                                       | 31        |
| •         | ENLACE CARBONO-CARBONO.....                                  | 32        |
| •         | ENLACE TIPO ÉSTER .....                                      | 32        |
|           | TIPOS DE LIGNINA:.....                                       | 32        |
| •         | GIMNOESPERMAS (Ligninas G) .....                             | 32        |
| •         | ANGIOESPERMAS LEÑOSAS (Ligninas G/S).....                    | 32        |
| •         | ANGIOESPERMAS HERBÁCEAS (Ligninas HGS).....                  | 33        |
| <b>4.</b> | <b>AGAVE TEQUILANA WEBER COMO MATERIA PRIMA .....</b>        | <b>34</b> |
| 4.1       | INTRODUCCIÓN .....                                           | 34        |
| 4.2       | USOS E IMPORTANCIA DEL AGAVE EN MÉXICO.....                  | 35        |
| 4.3       | TAXONOMÍA DEL AGAVE .....                                    | 37        |
| 4.4       | DISTRIBUCIÓN DEL AGAVE .....                                 | 39        |
| 4.5       | CULTIVO DE AGAVE TEQUILANA WEBER VARIEDAD AZUL.....          | 40        |
| 4.6       | TERRITORIO DE DENOMINACIÓN DE ORIGEN .....                   | 41        |
| 4.7       | ESTADÍSTICOS DEL AGAVE TEQUILERO.....                        | 44        |
| 4.8       | TIERRAS FUERA DEL DOT PARA CULTIVO DEL AGAVE TEQUILANA WEBER | 50        |

|           |                                                                                            |           |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.9       | DISTRIBUCIÓN Y ADAPTACIÓN CLIMÁTICA.....                                                   | 51        |
| 4.9.1     | REGIÓN SEMIÁRIDA.....                                                                      | 51        |
| •         | DISTRIBUCIÓN DE LAS ZONAS SEMIÁRIDAS .....                                                 | 52        |
| •         | TIPO DE SUELOS EN LAS REGIONES SEMIÁRIDAS.....                                             | 53        |
| •         | RECURSOS HÍDRICOS .....                                                                    | 55        |
| 4.9.2     | REGIÓN SUBHÚMEDA .....                                                                     | 58        |
| •         | DISTRIBUCIÓN REGIÓN SUBHÚMEDA .....                                                        | 59        |
| •         | TIPOS DE SUELOS EN LA REGIÓN SUBHÚMEDA .....                                               | 60        |
| •         | RECURSOS HÍDRICOS .....                                                                    | 61        |
| 4.10      | ALTITUD .....                                                                              | 64        |
| 4.11      | PRECIPITACIÓN, HUMEDAD AMBIENTAL Y DEL SUELO.....                                          | 65        |
| 4.12      | TEMPERATURA .....                                                                          | 66        |
| 4.13      | LUZ .....                                                                                  | 67        |
| 4.14      | SUELO.....                                                                                 | 68        |
| 4.15      | DETERMINACIÓN DE ÁREAS CON POTENCIAL PARA CULTIVAR AGAVE<br>TEQUILANA WEBER.....           | 69        |
| 4.16      | AGAVE TEQUILANA WEBER COMO MATERIA PRIMA PARA LA OBTENCION<br>DE BIOETANOL.....            | 70        |
| <b>5.</b> | <b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>                                                           | <b>73</b> |
| 5.1       | MATERIA PRIMA .....                                                                        | 73        |
| 5.2       | REACTIVOS .....                                                                            | 73        |
| 5.3       | EQUIPO .....                                                                               | 74        |
| 5.4       | MÉTODOS .....                                                                              | 74        |
| <b>6.</b> | <b>CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL AGAVE TEQUILANA WEBER .....</b>                              | <b>77</b> |
| 6.1       | DESCRIPCIÓN FÍSICA.....                                                                    | 77        |
| 6.2       | DETERMINACIÓN DE DIMENSIONES Y PESOS DE LA PLANTA COMPLETA... 77                           |           |
| 6.3       | DETERMINACIÓN DE LAS DIMENSIONES Y PESO DE LA HOJA. ....                                   | 78        |
| <b>7.</b> | <b>CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL JUGO DEL AGAVE TEQUILANA<br/>WEBER.....</b>                 | <b>79</b> |
| 7.1       | ACONDICIONAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA EXTRACCIÓN DEL JUGO DE<br>AGAVE TEQUILANA WEBER..... | 79        |

---

|            |                                                                                                          |            |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.2        | DETERMINACIÓN DE AZÚCARES TOTALES REDUCTORES .....                                                       | 82         |
| 7.3        | DETERMINACION INDIVIDUAL DE AZÚCARES.....                                                                | 86         |
| 7.4        | CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LAS FIBRAS DE LAS HOJAS Y PIÑA DEL AGAVE TEQUILANA WEBER.....                 | 87         |
| 7.4.1      | DETERMINACION DE HUMEDAD.....                                                                            | 88         |
| 7.4.2      | HIDRÓLISIS ÁCIDA CUANTITATIVA .....                                                                      | 90         |
| 7.4.3      | DETERMINACIÓN DE LAS REGIONES ÓPTIMAS PARA EL CULTIVO Y ESTIMACIÓN DE PRODUCCIÓN DE BIOETANOL.....       | 93         |
| <b>8.</b>  | <b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>                                                                       | <b>95</b>  |
| 8.1        | CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL AGAVE TEQUILANA WEBER.....                                                    | 95         |
| 8.2        | DETERMINACIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LA PLANTA .....                                                      | 96         |
| 8.3        | DETERMINACIÓN DE DIMENSIONES Y PESO DE LAS HOJAS .....                                                   | 98         |
| 8.4        | PORCENTAJE DE HUMEDAD .....                                                                              | 99         |
| 8.5        | CUANTIFICACIÓN DE AZÚCARES TOTALES REDUCTORES.....                                                       | 99         |
| 8.6        | DETERMINACIÓN INDIVIDUAL DE AZÚCARES.....                                                                | 100        |
| 8.7        | DETERMINACIÓN DE COMPONENTES ESTRUCTURALES EN LA FIBRA DEL AGAVE (CELULOSA, HEMICELULOSA Y LIGNINA)..... | 103        |
| 8.8        | DETERMINACIÓN DE ZONAS CON POTENCIAL PARA LA PLANTACIÓN DE AGAVE TEQUILANA WEBER.....                    | 105        |
| 8.9        | PROYECCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL.....                                                            | 107        |
| 8.10       | BALANCES DE MASA.....                                                                                    | 108        |
| <b>9.</b>  | <b>CONCLUSIONES.....</b>                                                                                 | <b>112</b> |
| <b>10.</b> | <b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>                                                                                 | <b>115</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Figura 1</b> Biocombustibles desde la materia hasta el uso final .....                                                                                        | <b>5</b>  |
| <b>Figura 2</b> Ciclo sustentable que se forma al producir etanol de biomasa vegetal y utilizarlo<br>como combustible .....                                      | <b>11</b> |
| <b>Figura 3</b> Materias primas para la elaboración de bioetanol .....                                                                                           | <b>16</b> |
| <b>Figura 4</b> Evolución de la producción mundial de etanol por materia prima utilizada .....                                                                   | <b>17</b> |
| <b>Figura 5</b> Clasificación de la biomasa .....                                                                                                                | <b>20</b> |
| <b>Figura 6</b> Estructura de los materiales lignocelulósicos .....                                                                                              | <b>22</b> |
| <b>Figura 7</b> Representación simplificada de la estructura de la celulosa .....                                                                                | <b>23</b> |
| <b>Figura 8</b> Representaciones de Haworth de las principales hexosas presentes en las<br>hemicelulosas.....                                                    | <b>24</b> |
| <b>Figura 9</b> Representaciones de Haworth de las principales pentosas presentes en las<br>hemicelulosas.....                                                   | <b>24</b> |
| <b>Figura 10</b> Ácidos Urónicos frecuentes presentes en la pared celular de los vegetales .....                                                                 | <b>25</b> |
| <b>Figura 11</b> Posibles monosacáridos presentes en las cadenas de hemicelulosas .....                                                                          | <b>26</b> |
| <b>Figura 12</b> Alcoholes cinamílicos precursores de la lignina.....                                                                                            | <b>31</b> |
| <b>Figura 13</b> Estructura de la Lignina .....                                                                                                                  | <b>33</b> |
| <b>Figura 14</b> Estructura de la inulina .....                                                                                                                  | <b>41</b> |
| <b>Figura 15</b> Municipios que conforman el territorio de denominación de origen del tequila, el<br>territorio comprende todo el estado de Jalisco.....         | <b>43</b> |
| <b>Figura 16</b> Superficie sembrada [Ha.] vs Período [Años] de los estados que comprenden la<br>DOT frente a la superficie sembrada a nivel nacional .....      | <b>44</b> |
| <b>Figura 17</b> Superficie cosechada [Ha.] vs Período [Años] de los estados que comprenden la<br>DOT frente a la superficie cosechada a nivel nacional .....    | <b>45</b> |
| <b>Figura 18</b> Volumen de producción [Ton] vs Período [Años] de los estados que comprenden la<br>DOT frente al volumen de producción a nivel nacional .....    | <b>46</b> |
| <b>Figura 19</b> Valor de producción [Millones \$] vs Período [Años] de los estados que comprenden<br>la DOT frente al valor de producción a nivel nacional..... | <b>47</b> |
| <b>Figura 20</b> Rendimientos [Ton/Ha.] vs Período [Años] de los estados que comprenden la DOT<br>frente al valor de producción a nivel nacional .....           | <b>47</b> |
| <b>Figura 21</b> Porcentaje de agave sembrado en la República Mexicana.....                                                                                      | <b>48</b> |
| <b>Figura 22</b> Porcentaje de agave cosechado en la República Mexicana .....                                                                                    | <b>49</b> |
| <b>Figura 23</b> Porcentaje de volumen de producción de agave en la República Mexicana .....                                                                     | <b>49</b> |
| <b>Figura 24</b> Regiones áridas y semiáridas de la República Mexicana.....                                                                                      | <b>52</b> |
| <b>Figura 25</b> Regiones hidrológicas de la República Mexicana (Tomada de la FAO).....                                                                          | <b>58</b> |
| <b>Figura 26</b> Aguas superficiales de la República Mexicana .....                                                                                              | <b>61</b> |
| <b>Figura 27</b> Tipos de suelos de la República Mexicana .....                                                                                                  | <b>68</b> |
| <b>Figura 28</b> Jima Agave Tequilana Weber .....                                                                                                                | <b>71</b> |
| <b>Figura 29</b> Diagrama de bloques general del proceso de producción de etanol .....                                                                           | <b>75</b> |
| <b>Figura 30</b> Mapa esquemático de la metodología realizada para la caracterización .....                                                                      | <b>76</b> |
| <b>Figura 31</b> Anatomía del agave <i>Tequilana Weber</i> .....                                                                                                 | <b>77</b> |

|                  |                                                                                                                |            |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Figura 32</b> | Equipo empleado para la extracción de los jugos .....                                                          | <b>79</b>  |
| <b>Figura 33</b> | Obtención de los jugos.....                                                                                    | <b>80</b>  |
| <b>Figura 34</b> | Diagrama general del proceso de extracción de los jugos del agave <i>Tequilana Weber</i> .....                 | <b>80</b>  |
| <b>Figura 35</b> | Reacción que se lleva a cabo entre el azúcar reductor y el DNS .....                                           | <b>82</b>  |
| <b>Figura 36</b> | Preparación del reactivo DNS.....                                                                              | <b>84</b>  |
| <b>Figura 37</b> | Preparación de las soluciones de glucosa para la curva patrón .....                                            | <b>84</b>  |
| <b>Figura 38</b> | Aplicación del Método DNS a las soluciones bajo estudio.....                                                   | <b>85</b>  |
| <b>Figura 39</b> | Equipo empleado para las lecturas.....                                                                         | <b>85</b>  |
| <b>Figura 40</b> | Soluciones obtenidas de la aplicación del método DNS.....                                                      | <b>85</b>  |
| <b>Figura 41</b> | Secciones de las hojas para determinar el porcentaje de humedad .....                                          | <b>88</b>  |
| <b>Figura 42</b> | Toma de muestras de la piña de Agave Tequilana.....                                                            | <b>89</b>  |
| <b>Figura 43</b> | Prueba de humedad .....                                                                                        | <b>89</b>  |
| <b>Figura 44</b> | Diagrama de flujo del proceso de la hidrólisis ácida cuantitativa .....                                        | <b>91</b>  |
| <b>Figura 45</b> | Piña de Agave Tequilana Weber.....                                                                             | <b>95</b>  |
| <b>Figura 46</b> | Hoja de a. Tequilana.....                                                                                      | <b>96</b>  |
| <b>Figura 47</b> | Conformación de la Planta.....                                                                                 | <b>97</b>  |
| <b>Figura 48</b> | Penca de Agave Tequilana .....                                                                                 | <b>97</b>  |
| <b>Figura 49</b> | Dimensiones de la Planta de Agave Tequilana Weber .....                                                        | <b>97</b>  |
| <b>Figura 50</b> | Cromatograma extracto de la Piña Cruda de A. Tequilana Weber .....                                             | <b>101</b> |
| <b>Figura 51</b> | Cromatograma extracto de las hojas de A. <i>Tequilana Weber</i> .....                                          | <b>102</b> |
| <b>Figura 52</b> | Cromatograma del extracto de Piña de A. <i>Tequilana Weber</i> Cocida .....                                    | <b>103</b> |
| <b>Figura 53</b> | Potencial de cultivo de los Estados de la República Mexicana fuera de la región de denominación de origen..... | <b>105</b> |
| <b>Figura 54</b> | Climas y disponibilidad de tierras de la República Mexicana .....                                              | <b>106</b> |
| <b>Figura 55</b> | Porcentaje de áreas disponibles por estado.....                                                                | <b>107</b> |
| <b>Figura 56</b> | Diagrama con los resultados del proceso de extracción de los jugos de la piña de agave Tequilana Weber .....   | <b>109</b> |
| <b>Figura 57</b> | Diagrama con los resultados del proceso de extracción de los jugos de las pencas de agave Tequilana Weber..... | <b>109</b> |
| <b>Figura 58</b> | Contribución de la producción de bioetanol de las áreas óptimas y subóptimas.....                              | <b>110</b> |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                                                |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Tabla I</b> Producción de biocombustibles por países en el 2012 .....                                                                       | <b>7</b>   |
| <b>Tabla II</b> Clasificación de biocombustibles líquidos .....                                                                                | <b>9</b>   |
| <b>Tabla III</b> Características del etanol frente a la gasolina .....                                                                         | <b>14</b>  |
| <b>Tabla IV</b> Rendimientos de materia prima para la producción de bioetanol .....                                                            | <b>18</b>  |
| <b>Tabla V</b> Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina en diferentes fuentes de biomasa residual (% p/p seco) .....                      | <b>19</b>  |
| <b>Tabla VI</b> Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina en cultivos destinados a la producción de energía (% p/p peso seco) .....        | <b>19</b>  |
| <b>Tabla VII</b> Principales constituyentes de las hemicelulosas en materiales alternativos .....                                              | <b>30</b>  |
| <b>Tabla VIII</b> Principales usos de importancia socio-económica del agave .....                                                              | <b>36</b>  |
| <b>Tabla IX</b> Usos actuales del agave .....                                                                                                  | <b>36</b>  |
| <b>Tabla X</b> Propuestas taxonómicas del género agave .....                                                                                   | <b>37</b>  |
| <b>Tabla XI</b> Clasificación taxonómica del agave <i>Tequilana Weber</i> .....                                                                | <b>40</b>  |
| <b>Tabla XII</b> Porcentaje de superficie sembrada de a. Tequilero .....                                                                       | <b>48</b>  |
| <b>Tabla XIII</b> Porcentaje de superficie cosechada de Agave Tequilero .....                                                                  | <b>49</b>  |
| <b>Tabla XIV</b> Porcentaje de volumen de producción de Agave Tequilero .....                                                                  | <b>49</b>  |
| <b>Tabla XV</b> Inventario de plantas de agave dentro de la DOT y registradas en el CRT Diciembre 2010. Fuente análisis estadísticos CRT ..... | <b>50</b>  |
| <b>Tabla XVI</b> Características climáticas por entidad federativa .....                                                                       | <b>62</b>  |
| <b>Tabla XVII</b> Potencial agroecológico para el cultivo de <i>Agave Tequilana Weber</i> .....                                                | <b>70</b>  |
| <b>Tabla XVIII</b> Condiciones de uso del filtro prensa .....                                                                                  | <b>81</b>  |
| <b>Tabla XIX</b> Concentración de las soluciones para la curva patrón .....                                                                    | <b>83</b>  |
| <b>Tabla XX</b> Tiempos de retención de los estándares de azúcar .....                                                                         | <b>87</b>  |
| <b>Tabla XXI</b> Correspondiente a las dimensiones de la Figura 51 .....                                                                       | <b>98</b>  |
| <b>Tabla XXII</b> Correspondiente a las dimensiones de la Figura 49 .....                                                                      | <b>98</b>  |
| <b>Tabla XXIII</b> Porcentaje de humedad en la planta de a. <i>Tequilana Weber</i> .....                                                       | <b>99</b>  |
| <b>Tabla XXIV</b> Contenido de ART en el agave <i>Tequilana Weber</i> .....                                                                    | <b>99</b>  |
| <b>Tabla XXV</b> Identificación y cuantificación de azúcares presentes en la piña cruda del agave <i>Tequilana Weber</i> .....                 | <b>101</b> |
| <b>Tabla XXVI</b> Identificación y cuantificación de azúcares presentes en las hojas del agave <i>Tequilana Weber</i> .....                    | <b>102</b> |
| <b>Tabla XXVII</b> Identificación y cuantificación de azúcares presentes en la piña cocida del agave <i>Tequilana Weber</i> .....              | <b>103</b> |
| <b>Tabla XXVIII</b> Caracterización de la fibra del agave <i>Tequilana Weber</i> .....                                                         | <b>104</b> |
| <b>Tabla XXIX</b> Comparativo porcentaje de componentes de a. <i>Tequilana Weber</i> procedentes de diferentes regiones .....                  | <b>104</b> |
| <b>Tabla XXX</b> Potencial de producción teórico de bioetanol a partir de diversas fuentes de biomasa lignocelulósica .....                    | <b>108</b> |

---

## RESUMEN

La producción y utilización de biocombustibles ha generado un renovado interés a nivel mundial en los últimos años, destacándose su contribución en la diversificación de la oferta energética, en un intento por reducir la dependencia hacia los combustibles derivados del petróleo y con ello reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, promover el desarrollo de la agricultura y generar mayores niveles de empleo.

El uso de materiales que son base de la alimentación no resulta aceptable para la aplicación de la producción de biocombustibles, adicionalmente éstos materiales tienen fuertes limitaciones para ser producidos masivamente a nivel nacional debido a sus requerimientos de agua, nutrimentos y susceptibilidad fitosanitaria. Considerando lo anterior, es necesario buscar alternativas bioenergéticas de especies que tengan resistencia a factores adversos, bajos requerimientos en insumos y tecnología y gran productividad. El agave *Tequilana Weber* como material lignocelulósico para su aplicación como materia prima en la producción de bioetanol, podría representar un potencial energético sustentable debido a su elevada eficiencia productiva de biomasa en condiciones marginales de agua y suelo. Lo anterior permitiría hacer uso de gran parte del territorio nacional que presenta un carácter de semiárido y árido, brindando la posibilidad de promover el desarrollo agrícola.

Los estudios realizados demostraron que el agave *Tequilana Weber* es un material que resulta adecuado para la producción de bioetanol debido a su contenido de holocelulosa. A partir del uso integral de una tonelada de plantas es posible obtener 345.6743L. Y de acuerdo a los resultados el país tiene un potencial de producción de 51746804 mil plantas que representan 1.74551535 billones de litros de bioetanol a partir de las regiones óptimas. Sin embargo, esta cifra aumenta considerando aquellas regiones que tienen características subóptimas a 7.952531951 billones de litros, lo que muestra un futuro prometedor para el desarrollo de los biocombustibles en el país a partir de esta materia prima.

**Palabras clave:** Bioetanol, Agave Tequilana Weber, Bioenergía, Uso potencial.

## ABSTRACT

The production and use of biofuels has generated a renewed interest globally in recent years, highlighting its contribution to the diversification of energy supply, in an attempt to reduce dependence on petroleum fuels and thereby reduce emissions of greenhouse gases, promote the development of agriculture and generate higher levels of employment.

The use of materials that are basic food is not acceptable for the application of biofuel production additionally these materials have strong limitations to be massively produced domestically due to their requirements of water, nutrients and plant susceptibility. Considering this, it is necessary to find alternative bioenergy species with resistance to adverse factors, low commodity requirements and technology and high productivity. The *Tequilana Weber* agave as lignocellulosic material for use as feedstock in the production of bioethanol, could represent a sustainable energy potential due to its high production efficiency of biomass on marginal soil and water conditions. This would allow use of much of the country which has a semi-arid and arid character, offering the possibility to promote agricultural development.

The studies showed that *Tequilana Weber* agave is a material that is suitable for the production of bioethanol, due to its content of holocellulose. From the integrated use of a ton of plants is possible to obtain 345.6743 L. And according to the results the country has a potential of production of 51746804 plants that represent 1.74551535 billion liters of bioethanol from optimal regions. However, this number increases considering those regions with suboptimal characteristics to 7.952531951 billion liters. This shows a promising future for the development of biofuels in the country from this raw material.

**Key Words:** Bioethanol, Agave *Tequilana Weber*, Bioenergy, Potencial use.

## 1. INTRODUCCIÓN

La creciente necesidad de disminuir la dependencia hacia el petróleo, ha promovido la búsqueda de fuentes alternas de energía renovable para la generación de combustibles en gran cantidad y que generen menos contaminación atmosférica como es el caso del etanol. En años recientes se han elaborado mezclas de etanol/gasolina en proporciones de 8/92% respectivamente, con el propósito de aminorar la contaminación.

Actualmente este etanol es producido a precios muy competitivos, a partir de sustratos renovables como la caña de azúcar en Brasil y el maíz en Estados Unidos. Independientemente de la efectividad del maíz y de la caña de azúcar como materia prima, el maíz es empleado como alimento con lo que utilizarlo para este fin incrementa no sólo su valor si no el de sus derivados. Debido a lo anterior y a que la producción mundial actual no es suficiente para satisfacer la demanda energética, se han desarrollado otros procesos biotecnológicos que utilizan residuos agrícolas y forestales ricos en celulosa y lignina, como sustratos para la obtención de etanol. Estos procesos tienen la desventaja de requerir como paso adicional la sacarificación previa de los materiales lignocelulósicos. Sin embargo, la principal ventaja que presenta el emplear residuos para la elaboración de biocombustibles es el carácter sustentable que esto le da a los procesos.

## 1.1 JUSTIFICACIÓN

Hoy en día uno de los retos más importantes consiste en satisfacer la demanda energética a nivel mundial. En las últimas décadas esta ha sido cubierta con combustibles de origen fósil. Sin embargo, la emisión de gases generados de la extracción, producción y uso de éstos combustibles ha provocado grandes daños en el medio ambiente. De allí surge la necesidad de crear nuevos y diferentes tipos de bioenergía, con ello se podrían diversificar las fuentes de suministro, reducir la dependencia hacia el petróleo y con ello reducir las emisiones de gases contaminantes.

Existen diversas formas de bioenergía una de ellas son los biocombustibles de segunda generación, en este momento éstos representan la principal fuente alternativa para abastecer el sector transporte, sin necesidad de realizar grandes cambios en las tecnologías actuales y políticas de transporte. Otro factor importante dentro de este ámbito es la creciente preocupación acerca del cambio climático, resultado de la acción del hombre, el bioetanol como combustible eleva el contenido de oxígeno, lo que permite una mejor oxidación de hidrocarburos y la reducción de las cantidades de gas de efecto invernadero a la atmósfera (Hill et al., 2006).

En México, la demanda de energía no excede la capacidad de producción aún, los biocombustibles son una alternativa viable de energía ya que estos podrían satisfacer un porcentaje considerable de la demanda nacional de energéticos. Por otro lado el uso de materiales lignocelulósicos como lo es el agave *Tequilana Weber*, resulta atractivo debido a su bajo costo y adaptabilidad a climas extremos con lo cual se aprovecharía gran parte del territorio mexicano que en su mayoría son terrenos de agostadero, marginales o semidesérticos aunado a esto se impulsaría el desarrollo del sector agropecuario y se le daría un uso a los residuos generados en la industria del tequila sin poner en riesgo su producción.

## 1.2 HIPÓTESIS

***“El aprovechamiento integral del Agave Tequilana Weber, presenta un alto potencial para la producción de bioetanol.”***

## 1.3 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el potencial de producción de bioetanol a partir del aprovechamiento integral del agave *Tequilana Weber*.

### • OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Realizar la caracterización físico y/o química del agave *Tequilana Weber* para su empleo como materia prima en la obtención de bioetanol.
  - Determinar el peso y dimensiones tanto de la piña como de las hojas del agave *Tequilana Weber*.
  - Determinar el contenido de humedad de las hojas y la piña de *Agave Tequilana Weber*.
  - Obtener los jugos tanto de las hojas como de la piña y determinar los azúcares reductores totales (ART) presentes en ellas.
  - Identificar y cuantificar el tipo de azúcares presentes tanto en la piña como en las hojas de la planta.
  - Determinar el contenido de hemicelulosa, celulosa y lignina presente en las fibras de las fracciones de agave *Tequilana Weber*.
  -
- ii. Identificar las zonas fuera de denominación con potencial para realizar plantaciones de agave *Tequilana Weber*.
- iii. Realizar la proyección, de la producción de biocombustible considerando las zonas potenciales para la plantación del agave *Tequilana Weber*.

## **2. BIOCOMBUSTIBLES**

### **2.1 ANTECEDENTES**

La materia orgánica que se deriva ya sea de animales o vegetales como resultado de un proceso de conversión fotosintético es llamada biomasa, como lo son cultivos, residuos forestales y desechos orgánicos y, la energía que se produce a través de ésta es denominada de acuerdo a la FAO como bioenergía.

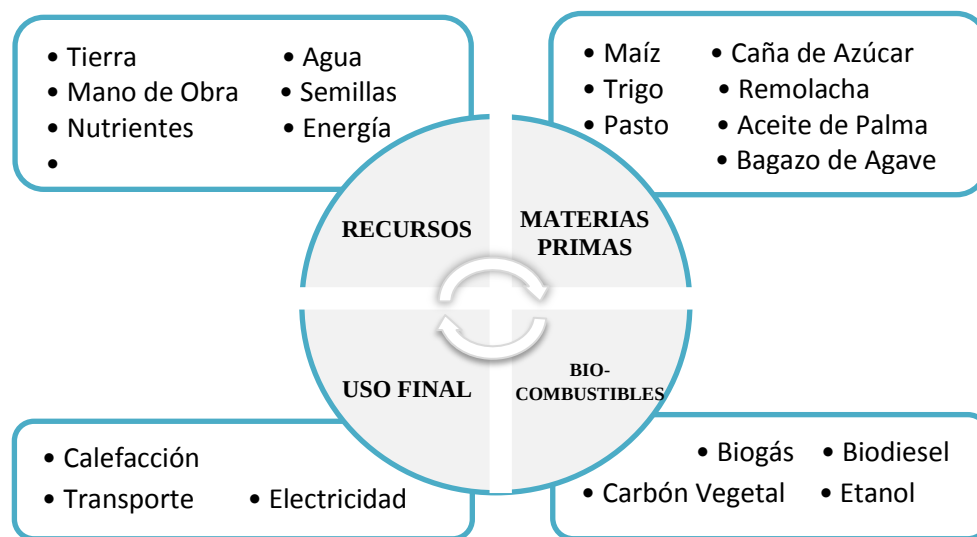
Por lo que si esta materia prima se produce de manera sostenible, se puede considerar una fuente de energía renovable. Actualmente la biomasa se ha utilizado para producir biocombustibles líquidos, para aprovecharse en su totalidad en el sector transporte. Lo cual representa una oportunidad para reducir o eliminar la dependencia a combustibles tradicionales.

Lo anterior lleva a que la demanda de biocombustibles puede beneficiar al sector agrícola permitiendo a los países en desarrollo, que dependen en su mayoría de la agricultura, la oportunidad de utilizar el crecimiento agrícola para aumentar el desarrollo rural y reducir la pobreza.

En los países de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico, entre ellos México, los biocombustibles han sido promovidos mediante políticas impulsadas por los objetivos de seguridad energética, mitigación del cambio climático mediante la reducción de las emisiones de gases efecto invernadero, apoyo a la agricultura y desarrollo rural. Mundialmente los biocombustibles producidos a mayor escala son el bioetanol y el biodiesel, siendo Brasil y Norteamérica las únicas regiones del mundo que producen grandes cantidades de etanol como combustible. Mientras que el principal productor de biodiesel es Europa, utilizando como materia prima el aceite de diversos tipos de semillas.

## 2.2 BIOCOMBUSTIBLES

Existe una gran variedad de biocombustibles, de materias primas para su producción y de tecnologías de proceso con diversos grados de alcance al mercado como se observa en la Figura 1. Es por ello que los biocombustibles han sido clasificados en función de su estado de agregación y de acuerdo a la fuente de la cual se derivan.



**Figura 1** Biocombustibles desde la materia hasta el uso final

De acuerdo a su estado de agregación se tiene la siguiente clasificación:

- **BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS**

Son aquellos combustibles compuestos por materia orgánica, producidos a partir de procesos físicos. Sus características varían de acuerdo a su composición y humedad, por lo que la energía que pueden generar por unidad de masa depende de éstos parámetros. Dentro de los más comunes se encuentran los pellets o briquetas, residuos agroindustriales como huesos de aceituna, cáscaras, astillas y leña.

- **BIOCOMBUSTIBLES GASEOSOS**

Son aquellos combustibles de origen no fósil, obtenidos a partir de la descomposición de materia orgánica en condiciones de ausencia de oxígeno. El más conocido es el biogás, el cual es generado en dispositivos específicos como los digestores o en medios naturales a partir de las diferentes reacciones de biodegradación que sufre la materia orgánica, gracias a la acción de microorganismos así como de otros factores en ausencia de aire.

- **BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS**

Son combustibles de origen orgánico, también conocidos como biocarburantes y se obtienen por medio de procesos químicos a partir de aceites vegetales, grasas animales o cultivos con alto contenido en azúcares. Este tipo de biocombustibles son utilizados principalmente en el sector transporte, aunque su producción sólo cubre una parte de la demanda mundial, se estima que en un futuro cercano su uso y producción aumenten. Los más importantes, debido al crecimiento de su producción son el biodiesel y el bioetanol.

Por su origen, se podría decir que los biocombustibles son una fuente de energía renovable y han sido clasificados de la siguiente manera de acuerdo a una amplia gama de fuentes de materia prima de la cual se derivan:

- **BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS DE PRIMERA GENERACIÓN**

Los biocombustibles de primera generación, son aquellos cuya producción se basa en su mayoría en materias primas empleadas para la alimentación humana o animal. Es decir, cultivos básicos tales como azúcares, almidones o aceites vegetales provenientes de semillas o granos de cultivos como el maíz, la caña de azúcar, el trigo, semillas de soja o girasol así como aceites vegetales y grasa animal.

La producción comercial de éstos se lleva a cabo por medio de tecnologías convencionales, actualmente aproximadamente el 85% de la producción mundial de biocombustibles líquidos está representada por el etanol como se muestra en la Tabla I. Siendo sus principales productores, Brasil y Estados Unidos aportando casi el 90% de la producción mundial, mientras que el 10% restante es producido en países como Canadá, China, la Unión Europea y la India.

Su proceso productivo se basa en la fermentación del azúcar con enzimas provenientes de levaduras, en los casos donde la materia prima contiene almidón, el proceso es de mayor complejidad puesto que el almidón es convertido en azúcares a partir de procesos enzimáticos para dar lugar a la fermentación.

**Tabla I** Producción de biocombustibles por países en el 2012

| PAÍS/PAÍSES    | ETANOL               |              |
|----------------|----------------------|--------------|
|                | (Millones de litros) | (Mtoe)       |
| Brasil         | 25 755.84            | 14.15        |
| Canadá         | 1 752.04             | 0.96         |
| China          | 9 361.44             | 5.14         |
| India          | 2 580.77             | 1.42         |
| Indonesia      | 279.64               | 0.15         |
| Malasia        | 63.28                | 0.03         |
| Estados Unidos | 56 552.46            | 31.07        |
| Unión Europea  | 8 229.87             | 4.52         |
| México         | 222.63               | 0.12         |
| Otros          | 8739.1               | 4.80         |
| <b>Mundo</b>   | <b>113 537.07</b>    | <b>62.39</b> |

- **BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS DE SEGUNDA GENERACIÓN**

Éstos son los que se obtienen a partir de una variedad de materias primas no alimentarias que incluyen biomasa de deshecho como los tallos de trigo, rastrojo de maíz, madera, pastos perennes, plantas celulósicas, cultivos energéticos o biomasa de cultivos especiales, así como residuos municipales orgánicos. Para este tipo se emplean tecnologías llamadas de biomasa a líquidos (BaL), ya sea por conversión termoquímica para producir biodiesel, o por fermentación para la producción de etanol celulósico. Los procesos de producción son más complejos que en los anteriores e incluso algunos se encuentran en etapa de desarrollo, ya que para cada materia prima identificada se requieren una variedad de tecnologías específicas involucradas. En el caso del bioetanol el primer paso de pre-tratamiento y descomposición de materiales involucra una combinación de procesos físicos y químicos (hidrólisis ácida o enzimática).

- **BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS DE TERCERA GENERACIÓN**

Los llamados biocombustibles de tercera generación, son aquellos que parten de algas cultivadas las cuáles llevan a cabo la fotosíntesis oxigénica y acumulan glucógeno como la principal forma de carbono almacenado. En la actualidad existen algas modificadas genéticamente para la producción de etanol. (Biofields, 2010).

La Tabla II, presenta la clasificación de los biocombustibles líquidos de acuerdo a la materia prima principal así como las tecnologías básicas para su producción y los co-productos generados del proceso.

**Tabla II** Clasificación de biocombustibles líquidos

| <b>BIOCOMBUSTIBLE</b>                                                       | <b>TECNOLOGÍA BÁSICA</b>                                                                               | <b>MATERIA PRIMA PRINCIPAL</b>                                                                                                    | <b>CO-PRODUCTOS</b>                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Biocombustibles de Primera Generación</b>                                |                                                                                                        |                                                                                                                                   |                                                                                                                           |
| Bioetanol                                                                   | Fermentación (azúcar), hidrólisis y fermentación (almidón)                                             | E.U.A: Maíz, Brasil: Caña de azúcar, Sud. Amer.: Caña de azúcar, Europa: Cereales, remolacha azucarera, Canadá: Maíz, cereales.   | Alimentos para animales (maíz y cereales), bagazo de caña para energía.                                                   |
| Biodiesel                                                                   | Transesterificación de aceites y grasas                                                                | Aceite de oleaginosas E.U.A.: Soja, girasol, Europa: Colza, Canadá: Soja, colza. América del sur: Soja                            | Glicerina                                                                                                                 |
| <b>Biocombustibles de Segunda Generación</b>                                |                                                                                                        |                                                                                                                                   |                                                                                                                           |
| Bioetanol                                                                   | Separación de biomasa celulósica en varias etapas, hidrólisis y fermentación final.                    | Biomasa lignocelulósica (tallos de trigo, rastrojo de maíz, otros); cultivos o biomasa especial; bagazo de caña de azúcar, otros. |                                                                                                                           |
| Biodiesel y biocombustibles de diseño como biohidrógeno, biometanos, otros. | Gasificación de biomasa de baja humedad de la que se derivan combustibles líquidos y químicos básicos. | Biomasa lignocelulósica tales como madera, paja y materias primas secundarias como desechos de plástico.                          | Mediante la síntesis de Fisher-Tropsch puede usarse como materia prima para la industria química (combustibles plásticos) |
| <b>Biocombustibles de Tercera Generación</b>                                |                                                                                                        |                                                                                                                                   |                                                                                                                           |
| Biodiesel, combustibles para aviación, bioetanol, biobutanol.               | Bioreactores para etanol, transesterificación para biodiesel, otras técnicas en desarrollo.            | Micro-algas marinas, micro-algas de estanque, bio-reactores.                                                                      | Alimentos para animales de alta proteína, biopolímeros, fertilizantes agrícolas                                           |

## 2.3 BIOETANOL COMO COMBUSTIBLE

El etanol es un alcohol líquido en condiciones ambientales, incoloro, volátil, inflamable y soluble en agua. Que independientemente de su origen ya sea de biomasa, procesos

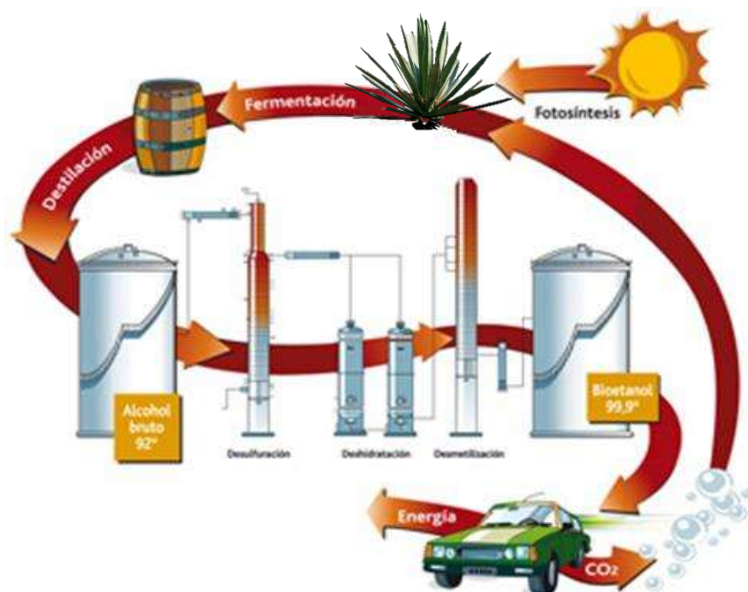
petroquímicos o carboquímicos, es un buen combustible. Sin embargo, el etanol presenta algunas diferencias importantes con relación a los combustibles convencionales derivados de petróleo; siendo su principal ventaja el elevado porcentaje de oxígeno que contiene.

El alcohol etílico  $C_2H_6O$ , como combustible puede utilizarse en motores de combustión interna con ignición a chispa (ciclo de Otto) de dos formas ya sea como:

- Mezclas de gasolina y etanol anhidro
- Etanol puro hidratado.

Estados Unidos y Brasil utilizan una mezcla entre el 10 y 22% de etanol en gasolina, esta mezcla da como resultado un combustible que contiene 35% en masa de oxígeno lo que reduce las emisiones de dióxido de carbono  $CO_2$  y óxido de nitrógeno  $N_xO_y$  en la combustión (Wheals et al., 1999). De tal forma que las características del etanol posibilitan una combustión más limpia y un mejor desempeño de los motores aún al ser mezclado con la gasolina. En estos casos, actúa como un verdadero aditivo para el combustible normal, mejorando sus propiedades.

Emplear el etanol directamente (95% etanol y 5% agua) como combustible, podría proveer grandes beneficios ambientales debido a su baja presión y la reducción de emisiones de dióxido de carbono  $CO_2$ , monóxido de carbono  $CO$ , y ozono  $O_3$  en la atmósfera, si aunado a ello se emplean materiales lignocelulósicos para su producción como se muestra en la Figura 2 se obtiene una combustión más limpia (Lyn et al. 1991 citado en Prasad et al. 2007).



**Figura 2** Ciclo sustentable que se forma al producir etanol de biomasa vegetal y utilizarlo como combustible

Además de que en comparación con la gasolina, el etanol contiene sólo una cantidad mínima de azufre; por tanto, su combustión ya sea pura o en una mezcla produce menos emisiones de óxido de azufre  $\text{SO}_2$ , que es un componente carcinogénico de la lluvia ácida (FAO, 2008a).

De acuerdo a la legislación, considerando concentraciones en masa, el etanol anhidro debe contener menos del 0.6% de agua debido a que existen datos que demuestran que el agua puede ocasionar la separación de las fases gasolina-alcohol, que originan fallas mecánicas de vehículos por gasificación en la bomba de gasolina, mientras que para el etanol hidratado esta concentración debe estar entre el 6.2% y 7.4%. Expresados como proporción en volumen a 20°C estos valores corresponden respectivamente a una concentración máxima del 0.48% para el etanol anhidro y una franja del 4.02% a 4.87% para etanol hidratado.

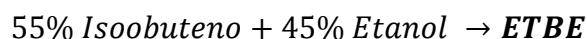
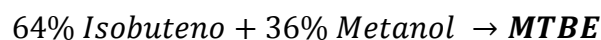
Mientras que el etanol hidratado puro debe emplearse en motores fabricados o adaptados específicamente para este fin, adoptando particularmente índices de compresión más elevados, buscando utilizar adecuadamente el octanaje más alto del etanol frente a la

gasolina y obtener con ello ganancias de eficiencia del 10%. Es decir, el mayor octanaje del etanol permite que los motores obtengan más energía útil del calor del combustible comparativamente a la gasolina, de acuerdo a estudios realizados por Pimentel, el etanol puede entregar 20% más energía que la gasolina aumentando el cociente de compresión de 8:1 para la gasolina a 12:1 para el etanol (Pimentel y col., 1980). Así mismo, se deben realizar cambios tanto en la alimentación de combustible como en la ignición, para compensar las diferencias en la relación aire-combustible y otras propiedades. Además, deben realizarse algunos cambios en los materiales de contacto con el combustible, como tratamiento anticorrosivo de las superficies metálicas de los tanques, filtros y bombas de combustible y sustitución de tuberías o adopción de materiales más compatibles con el etanol. En la actualidad, la tecnología automotriz ha evolucionado permitiendo que los vehículos que utilizan etanol puro hidratado tengan un desempeño, maniobrabilidad, condiciones de arranque en frío y durabilidad similares a los de motores a gasolina.

Con el intenso uso de la electrónica aplicada a sistemas avanzados de control de mezcla y de ignición, a partir del 2003 se lanzaron comercialmente en Brasil vehículos con motores flexibles FFV (Flex-Fuel), capaces de utilizar, sin cualquier interferencia del conductor, gasolina (con 20% a 25% de etanol), etanol hidratado puro o mezclas de esos dos combustibles en cualquier proporción, según exigencias de eficiencia y maniobrabilidad y atendiendo a los límites legales de emisiones de gases de escape (Joseph Jr. 2007). Los vehículos equipados con estos motores ya representan la mayoría de los vehículos nuevos vendidos en Brasil a partir del 2005 y, desde entonces, están perfeccionándose en términos de desempeño y funcionalidad de los sistemas de arranque en frío. Actualmente, existen más de 60 modelos diferentes, fabricados por diez montadoras de origen estadounidense, europeo y japonés, instaladas en el país. La concepción de vehículo flexible, permite que el usuario elija, según su conveniencia, el combustible que usará, desde 100% de etanol hidratado hasta una gasolina con 20% a 25% de etanol. Por otro lado en Estados Unidos, en Canadá y en Suecia también se comercializan vehículos con motores flexibles, pero bajo otro concepto, operando en franjas de concentraciones de etanol que

van desde la gasolina pura, sin etanol, hasta una mezcla con el 85% de etanol anhidro y el 15% de gasolina, producto que está disponible en cantidad creciente, pero todavía limitada.

Por otra parte, en algunos países se prefiere emplear mezclas de etanol con gasolina después de transformar el etanol en etil terbutil éter (ETBE), que es el producto principal que resulta de la reacción en la que interviene una molécula de etanol y otra de isobuteno. El ETBE es una alternativa al metil terbutil éter (MTBE) que se utiliza en la actualidad como producto oxigenado sustitutivo del tetraetilo de plomo para mejorar el índice de octano. El cual tiene un índice de octano y un poder calorífico ligeramente superior al MTBE, y su rendimiento de fabricación, a partir del isobuteno es más elevado.



En los países de la Unión Europea se acepta la incorporación del ETBE como un aditivo que mejora hasta un porcentaje del 10% sin que se tenga que realizar un marcado especial, siendo su empleo totalmente aceptado por los fabricantes de automóviles. Su desventaja frente al MTBE es el mayor costo de la producción del etanol, obtenido por fermentación, frente al metanol de origen petroquímico, lo que hace que en la actualidad el ETBE sea más caro de producir (Ballesteros, 2001)

La Tabla III sintetiza algunas de las características más importantes que presenta el etanol como combustible frente a la gasolina.

La densidad relativa, es la relación que existe entre el peso de un cuerpo y el de igual volumen de agua a una temperatura normalmente medida a 20°C (Potter, 2006). Esta propiedad resulta importante debido a que a mayor densidad mayor es la pérdida de potencia en el motor, ya que parte del combustible al vaporizar tiende a quedarse en los cambios de dirección del sistema de admisión, afectando el llenado de los cilindros.

La volatilidad es una medida de la facilidad con que una sustancia se evapora, dicha propiedad tiene impacto en el comportamiento del motor durante la puesta en marcha y la aceleración, ya que sin ella es imposible la inflamación.

La temperatura de autoignición es la temperatura mínima a la que un gas inflamable o mezcla que se encuentra en contacto con el aire, arde espontáneamente sin necesidad de una fuente de ignición, para alcanzar la reacción de combustión.

Calor latente de vaporización, es el calor absorbido por el combustible al cambiar de líquido a vapor sin sufrir cambio alguno en la temperatura.

El poder calorífico de un combustible es la cantidad de energía desprendida en la reacción de combustión, referida a la unidad empleada de combustible. Y de acuerdo a como se expresa el estado del agua en los productos de reacción se puede dividir en:

- **Poder Calorífico Superior:**

Expresa la cantidad de calor que se desprende en la reacción completa de la unidad de combustible con el agua de los humos en forma líquida a 0°C y 1 atm.

- **Poder Calorífico Inferior:**

Expresa la cantidad de calor que se desprende en la reacción completa de la unidad de combustible con el agua de los humos en estado de vapor.

**Tabla III** Características del etanol frente a la gasolina

| Característica                          | Gasolina | Etanol hidratado | Etanol anhidro | ETBE |
|-----------------------------------------|----------|------------------|----------------|------|
| Densidad (kg/l)                         | 0.75     | 0.81             | 0.79           | 0.74 |
| Volatilidad (kg/cm <sup>2</sup> )       | 0.75     | 1.18             | 1.52           | 0.34 |
| Auto ignición (°C)                      | 367      | 560              | 550            | 570  |
| Calor latente de vaporización (kJ/kg)   | 376      | 1141             | 903            | -    |
| Poder calorífico inferior (PCI) (Kj/kg) | 42.9     | 24.9             | 26.8           | 36   |
| Índice de octano (IOR)                  | 95       | 110              | 106            | 118  |

## 2.4 BIOCARBURANTES QUE EMPLEAN ETANOL

**E100:** Para poder utilizar el 100% de etanol se necesitan motores especiales, esta forma de emplear el bioetanol es solo frecuente en Brasil. El E95 lleva un 5% de gasolina (arranque en frío).

**E85:** Es una mezcla de 85% etanol y 15% gasolina. Se necesitan modificaciones en el motor, las utilizan los vehículos Flex-Fuel que son capaces de funcionar con distintas proporciones, se emplean en EE. UU., Brasil y Suecia.

**E5 y E10:** Hasta proporciones de 10% de etanol, no se requiere modificaciones en los motores, así se emplea en EE.UU. pero en Europa la mezcla máxima para ser vendida como gasolina normal, además de no anular la garantía del motor es del 5%.

**ETBE:** Como se ha comentado no es un combustible sino un aditivo de la gasolina que mejora su octanaje.

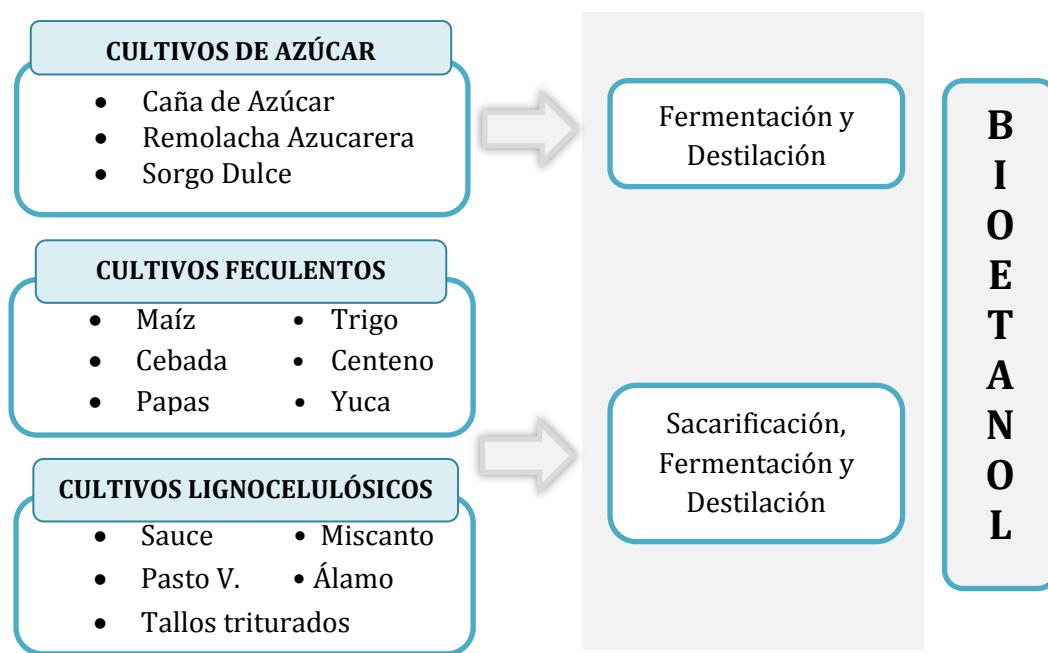
**E-DIESEL:** Es la mezcla del bioetanol con gasoil usado como aditivo. Aunque aún no se comercializa en Europa ya se encuentra en EE.UU y Brasil.

Para mejorar la competitividad del bioetanol frente a los combustibles derivados del petróleo, ya sea como combustible único, en mezclas con gasolina o como ETBE se debe reducir su costo de producción, para ello es necesario reducir el precio de las materias primas, ya que estas suponen alrededor del +60% del costo final del etanol. Por ello, es necesario desarrollar nuevos cultivos y considerar la biomasa secundaria como recursos complementarios para la producción de biocombustibles. La utilización de biomasa lignocelulósica es visualizada a medio plazo, y es la opción más prometedora para la obtención de bioetanol a bajo costo, posibilitando con ello que este producto pueda ser adoptado por la industria.

### 3. MATERIA PRIMA PARA LA OBTENCIÓN DE BIOETANOL

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

Las fuentes de materia prima para la producción de etanol son tan vastas que van desde desechos sólidos municipales, residuos agrícolas hasta cultivos alimenticios. Gracias a la expansión y crecimiento de la industria de los bioenergéticos y a que la tendencia de producción actual de los países muestra un creciente interés en las tecnologías de producción a partir de fuentes renovables, el sector agropecuario ha ido tomando un papel económico muy importante, pues es el principal proveedor de materia prima. La Figura 3 muestra los cultivos con los cuales se ha elaborado etanol a nivel mundial, donde los principales corresponden a la caña de azúcar y el maíz.



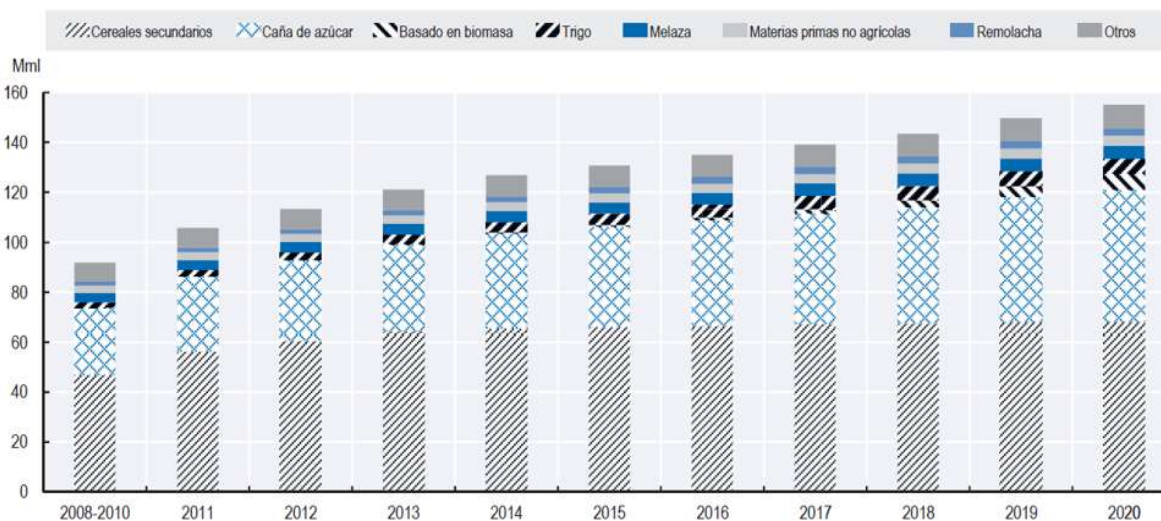
**Figura 3** Materias primas para la elaboración de bioetanol

Estas fuentes para la producción de bioetanol presentan diferentes rendimientos, debido al tipo de materia prima y sobre todo a los métodos de producción y los países en los cuales son cultivados. Hasta el momento, la materia que presenta mejores rendimientos corresponde a la caña de azúcar y la remolacha azucarera. Por otro lado los rendimientos

generados por el maíz son un poco más bajos que los anteriores. Sin embargo, el costo de producción sigue diversos patrones que se encuentran en función de la materia prima y el país en el cual se produce.

De acuerdo a un estudio realizado por la OCDE-FAO sobre las perspectivas agrícolas del 2011 con una proyección al 2020 las cuáles se indican en la Figura 4, se pronostica que el maíz y la caña de azúcar continuarán siendo las principales materias primas para la producción de etanol durante la próxima década. Mientras que, para el 2020 se anticipa que un 44% del etanol mundial se producirá a partir de cereales secundarios y 36% de la caña de azúcar. La producción de etanol celulósico deberá representar tan solo el 5% de la producción mundial. Ocurriendo una disminución en la proporción de etanol basado en maíz en los países desarrollados del 89% al 78%.

El etanol basado en trigo representará el 6% de la producción de etanol en los países desarrollados, en comparación con el 3% del año 2011. De tal manera que se prevé que la producción de etanol celulósico será cada vez más importante en los países desarrollados a partir del 2017 para representar alrededor del 8% de la producción total de etanol para el 2020, con lo cual las necesidades de tierra incrementarán un 4.2% de la tierra cultivable debido a rendimientos más altos de energía por hectárea y al uso de biomasa para la producción de combustibles



**Figura 4** Evolución de la producción mundial de etanol por materia prima utilizada

La Tabla IV indica los rendimientos por hectárea que se obtienen a partir de diferentes materias primas para la producción de etanol, y la estimación de los países que lo producen a nivel mundial.

**Tabla IV** Rendimientos de materia prima para la producción de bioetanol

| <b>CULTIVO</b>         | <b>ESTIMACIÓN</b> | <b>RENDIMIENTO<br/>DEL CULTIVO<br/>(Toneladas/ha)</b> | <b>EFICIENCIA DE<br/>LA<br/>CONVERSIÓN<br/>(Litros/tonelada)</b> | <b>RENDIMIENTO DE<br/>BIOCOMBUSTIBLE<br/>(Litros/ha)</b> |
|------------------------|-------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Remolacha<br>Azucarera | Mundial           | 46                                                    | 110                                                              | 5060                                                     |
| Caña de Azúcar         | Mundial           | 65                                                    | 70                                                               | 4550                                                     |
| Yuca                   | Mundial           | 12                                                    | 180                                                              | 2070                                                     |
| Maíz                   | Mundial           | 4.9                                                   | 400                                                              | 1960                                                     |
| Arroz                  | Mundial           | 4.2                                                   | 430                                                              | 1806                                                     |
| Trigo                  | Mundial           | 2.8                                                   | 340                                                              | 952                                                      |
| Sorgo                  | Mundial           | 1.3                                                   | 380                                                              | 494                                                      |
| Caña de Azúcar         | Brasil            | 73.5                                                  | 74.5                                                             | 5476                                                     |
| Caña de Azúcar         | India             | 60.7                                                  | 74.5                                                             | 4522                                                     |
| Maíz                   | Estados Unidos    | 9.4                                                   | 399                                                              | 3751                                                     |
| Maíz                   | China             | 5                                                     | 399                                                              | 1995                                                     |
| Yuca                   | Brasil            | 13.6                                                  | 137                                                              | 1863                                                     |
| Yuca                   | Nigeria           | 10.8                                                  | 137                                                              | 1480                                                     |

### 3.2 MATERIAL LIGNOCELULÓSICO COMO MATERIA PRIMA PARA LA OBTENCIÓN DE BIOETANOL

Bajo el término biomasa o material lignocelulósico se incluye a toda la materia orgánica que tiene su origen en un proceso biológico (Fernández, 1995). Y en base a ello se le ha clasificado de la siguiente manera Figura 5:

- **Biomasa Natural:** Producida en los ecosistemas naturales. Aunque es una de las principales fuentes energéticas en los países en vías de desarrollo, no es la más adecuada para un aprovechamiento energético masivo, ya que podría originar una rápida degradación de los ecosistemas.

- **Biomasa Residual:** Se genera como resultado de los procesos de la agroindustria, ya sea como residuo o subproducto algunos de ellos provenientes de los cultivos leñosos y herbáceos destacando los producidos en los cultivos de cereal. En países como México, estos materiales son abundantes y no tienen una aplicación directa en la industria de la manufactura, son materiales generados en grandes cantidades de fácil adquisición y bajo costo, la Tabla V indica el contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina de algunas fuentes de biomasa residual comunes.

**Tabla V** Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina en diferentes fuentes de biomasa residual (% p/p seco)

| Material            | Celulosa | Hemicelulosa | Lignina |
|---------------------|----------|--------------|---------|
| Paja de Cebada      | 36.80    | 17.20        | 12.30   |
| Restos de Maíz      | 36-39    | 21-22        | 19-20   |
| Paja de Arroz       | 32-47    | 19-27        | 5-24    |
| Paja de Trigo       | 15-40    | 25-35        | <8      |
| Bagazo C. de Azúcar | 40-45    | 30-35        | 20-30   |
| Fibras de Maíz      | 13-18    | 35-40        | 7-8     |
| Cáscara de Arroz    | 15-36    | 12-35        | 8-16    |
| Cáscara de Soya     | 20-51    | 10-20        | 1-4     |

- **Cultivos Energéticos:** Son aquellos dedicados exclusivamente a la producción de biomasa para su utilización energética. Se diferencian en dos tipos: los orientados a la producción de materiales leñosos con especies de crecimiento rápido, y los orientados a la producción de especies vegetales anuales, los cultivos energéticos más comunes y su composición se muestran en la Tabla VI.

**Tabla VI** Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina en cultivos destinados a la producción de energía (% p/p peso seco)

| Material | Celulosa | Hemicelulosa | Lignina |
|----------|----------|--------------|---------|
| Álamo    | 39-43    | 15-18        | 27-28   |
| Híbrido  |          |              |         |
| Sauce    | 32-43    | 19-22        | 16-27   |
| Heno     | 32-33    | 18-19        | 21-22   |

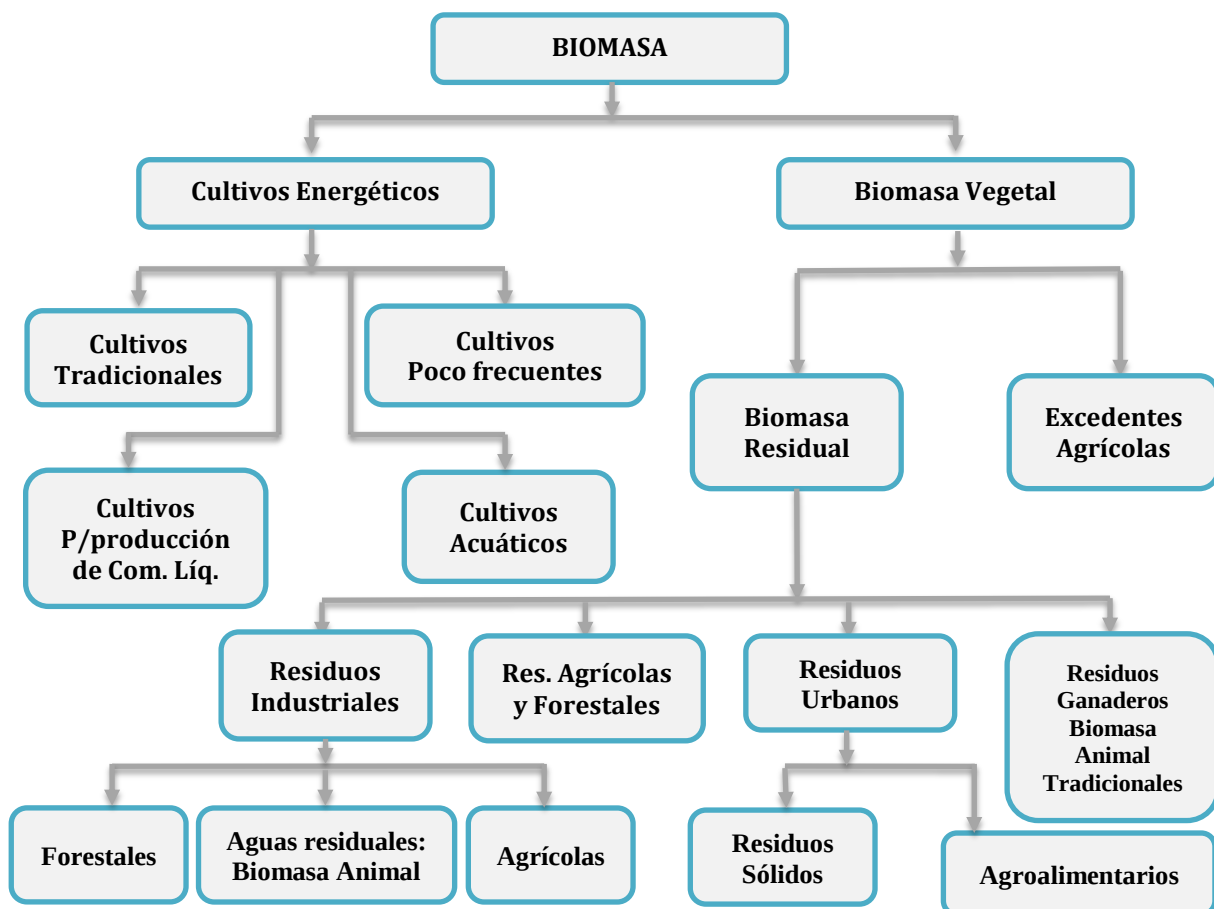


Figura 5 Clasificación de la biomasa

Dichos materiales resultan atractivos para emplearse como materia prima debido a su bajo costo y su alta disponibilidad en diversos climas y localidades. El valor energético de éstos proviene originalmente de la energía solar que adquieren a través del proceso de fotosíntesis, este proceso de captación y acumulación de energía da origen a una bioconversión de la misma, generando productos químicos primarios como la celulosa, por medio de la cual a través de la combustión o de los combustibles originados a partir de ella se recuperan 112 kcal de energía solar por cada átomo de carbono presente.

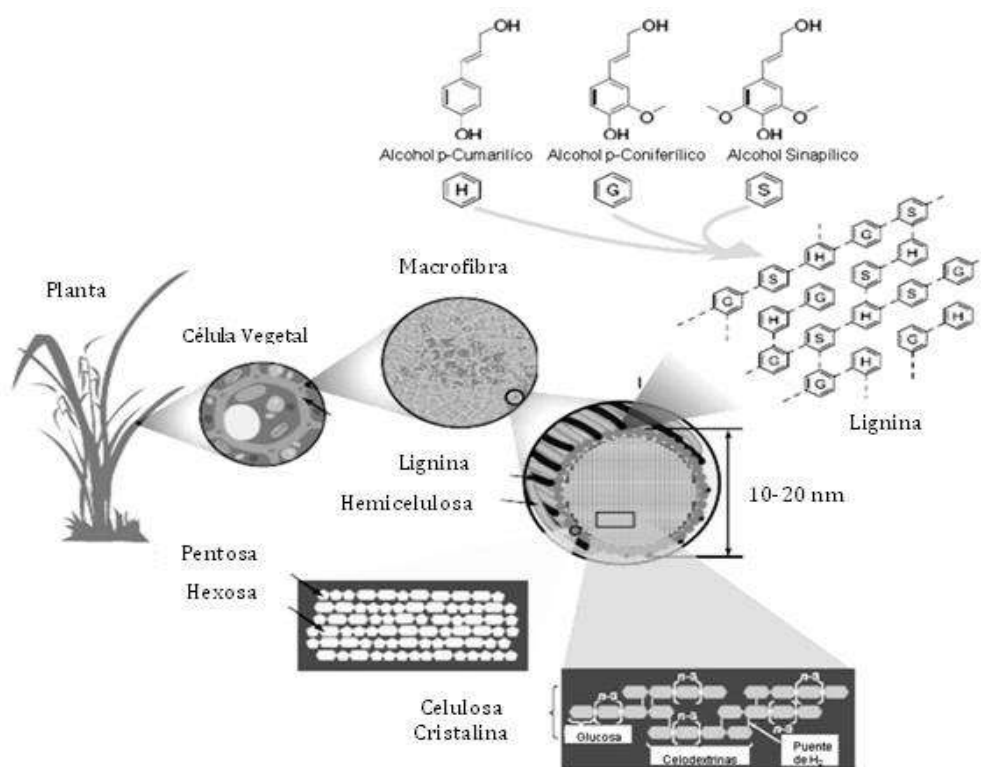
De tal forma que los materiales lignocelulósicos, se descomponen en sus moléculas elementales acompañados de una liberación de energía en forma de calor. Por lo tanto la energía obtenida de estos materiales es una forma de energía renovable y emplearlos como

materia prima para la obtención de biocombustibles no añade CO<sub>2</sub> al medio ambiente, en contraste con los combustibles fósiles. Aunado a ello la producción de biomasa a escala global en el planeta es muy alta, estimándose que la fotosíntesis fija anualmente  $2.2 \times 10^{11}$  toneladas de peso seco de biomasa, lo que supone unas diez veces la demanda energética mundial.

### **3.3 COMPOSICIÓN DEL MATERIAL LIGNOCELULÓSICO**

La lignocelulosa es el principal componente de la pared celular de las plantas, la cual se constituye de polisacáridos, compuestos fenólicos y compuestos minoritarios como lo son los minerales, lípidos, proteínas entre otros. Sin embargo, la composición y porcentajes de estos constituyentes en los materiales lignocelulósicos varían de acuerdo a la especie de la planta, dentro de la misma e incluso entre la edad y la etapa de crecimiento, así como el tejido anatómico y fisiológico del organismo vegetal.

Dichos componentes son clasificados como *estructurales* y *secundarios*, dentro de los primeros se encuentran tres polímeros, *la celulosa, la lignina y la hemicelulosa*. Donde la celulosa forma cerca de un 50% del tejido de los materiales lignocelulósicos formando estructuras más complejas que las que se encuentran en las paredes pectocelulósicas. Su pared celular es constituida por un entramado de microfibrillas de celulosa formando capas recubiertas de hemicelulosas y sobre las cuales se deposita lignina que representa un 30% del tejido. Esta distribución Figura 6, permite crear y sostener la estructura de las plantas. Así, los tejidos con células lignificadas dotan a sus órganos principalmente a los tallos de mayor resistencia mecánica, además de mejorar su regulación hídrica y su resistencia a patógenos. En este sentido el aprovechamiento global del material requiere métodos de pretratamiento o fraccionamiento. Mientras que los componentes secundarios se encuentran en menor proporción y son de dos tipos; Componentes de bajo peso molecular, hidrosolubles o extraíbles en solventes orgánicos que son denominados extractos y por otro lado materias minerales que en los análisis químicos se estiman como cenizas.



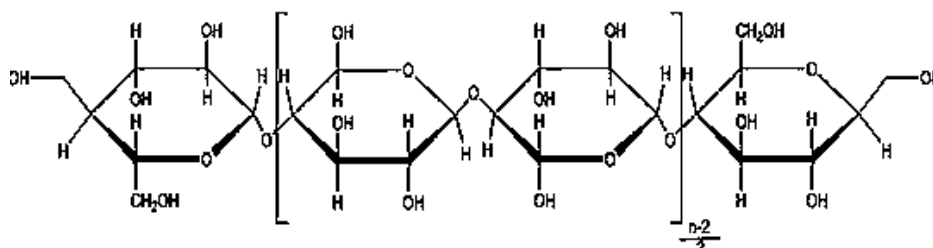
La celulosa, la hemicelulosa y la lignina forman estructuras llamadas microfibrillas, organizadas en macrofibras que regulan la estabilidad de la pared celular de las plantas

**Figura 6** Estructura de los materiales lignocelulósicos

## 3.4 COMPONENTES ESTRUCTURALES

### 3.4.1 CELULOSA

La celulosa es un homopolisacárido lineal de elevado peso molecular cuyo grado de polimerización va desde 200 hasta 10 000 unidades de D-glucopiranosido unidas por medio de enlaces glucosídicos ( $\beta$ -1,4), como se puede observar en la Figura 7. El enlace osídico o glucosídico, es formado por medio de la reacción del grupo  $-OH$  hemiacetalico del carbono anomérico ( $C_1$ ) de la  $\beta$ -D glucopiranososa con el grupo  $-OH$  del  $C_4$  de otra  $\beta$ -D glucopiranososa, en donde uno de los extremos de cada cadena presenta en el carbono anomérico un grupo aldehído de carácter reductor.



Estructura de la Celulosa

**Figura 7** Representación simplificada de la estructura de la celulosa

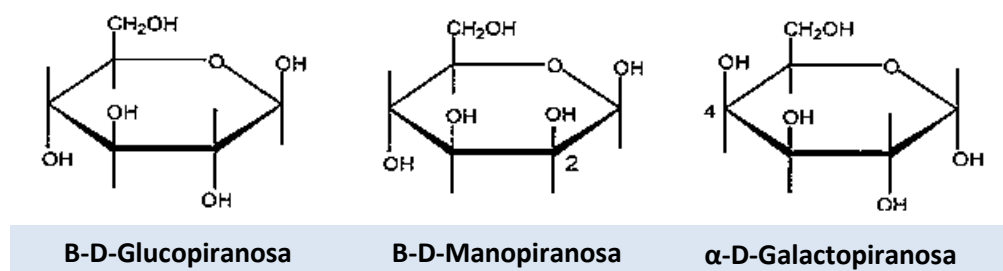
La conformación piranosa, donde los carbonos y oxígenos son tetraédricos y la forma más estable es la de silla, presenta los grupos  $-\text{CH}_2\text{OH}$ ,  $-\text{OH}$  y los enlaces glucosídicos en posición ecuatorial, mientras que los hidrógenos se encuentran en posición axial. Lo anterior ocasiona que los grupos  $-\text{OH}$  salgan lateralmente permitiendo con ellos a la celulosa formar uniones inter e intramoleculares por puentes de hidrógeno dando lugar a las fibrillas elementales, las cuales se encuentran formadas por entre 40 y 100 cadenas de celulosa en donde se presentan zonas con una estructura cristalina, que le confieren a la celulosa gran resistencia, mientras que otras regiones son amorfas y le otorgan elasticidad, la presencia de dichas regiones en la fibrilla elemental permite una mayor reactividad ya que gracias a ellas existe una mejor penetración de reactivos en el material con lo cual las enzimas del tipo de las celulasas pueden trabajar mejor si se aumenta la proporción en estas zonas.

Las microfibrillas dan lugar a las paredes celulares de los vegetales éstas pueden ser orientadas en diversas formas de acuerdo a la cantidad de capas de fibras elementales que posean. Este tipo de estructuras presentan los grupos  $-\text{OH}$  formando puentes de hidrógeno en un estructura similar a una cinta que se encuentra cubierta en su superficie por hidrógenos de lo cual resulta una molécula hidrofóbica.

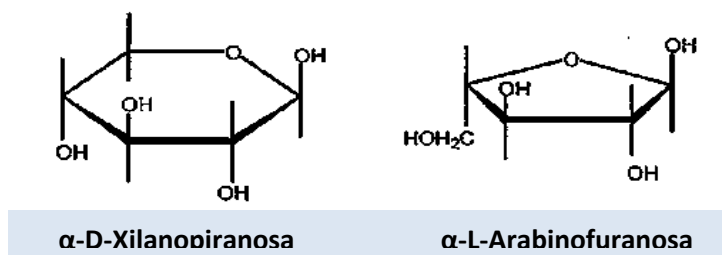
### 3.4.2 HEMICELULOSA

La hemicelulosa es un heteropolisácarido de bajo peso molecular que representa en general, del 15 al 25% de la biomasa presente en los materiales lignocelulósicos. Se asocia a la celulosa en el tejido vegetal pues su función es suministrar la unión entre la lignina y la celulosa, y puede formar o no parte de los componentes.

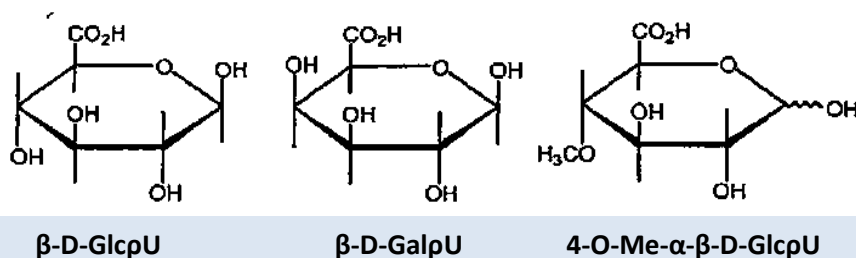
Las hemicelulosas también denominadas poliosas, se encuentran constituidas principalmente por cinco monosacáridos dos de ellos son pentosas Figura 9, la *D-xilosa* y la *L-arabinosa* y tres de ellas hexosas Figura 8, la *D-glucosa*, *D-manosa* y *D-galactosa*. También se les puede encontrar constituidas por algunas osas y derivados de éstas como ácidos urónicos Figura 10 (*αD-glucurónico*, *αD-4-O-methylgalacturónico* y ácidos galacturónicos *αD-*), y en muy raras ocasiones por la *L-ramnosa*, *L-fucosa* y algunos azúcares metilados neutros, por lo que la hidrólisis de ésta origina relativamente pocas unidades de azúcares.



**Figura 8** Representaciones de Haworth de las principales hexosas presentes en las hemicelulosas



**Figura 9** Representaciones de Haworth de las principales pentosas presentes en las hemicelulosas



**Figura 10** Ácidos Urónicos frecuentes presentes en la pared celular de los vegetales

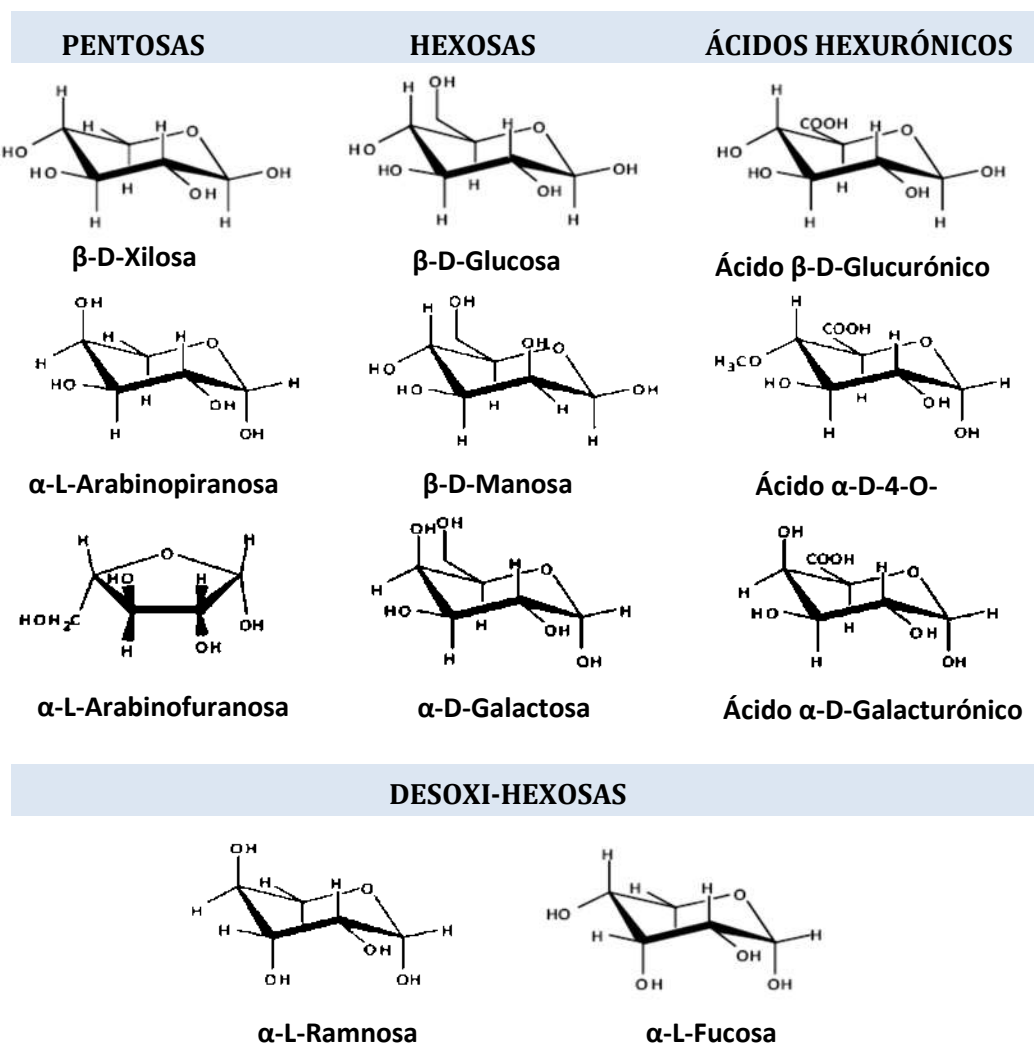
La estructura de este tipo de heteropolisacáridos es compleja dada su constitución, las unidades monosacáridas presentes en ella se encuentran enlazadas por diferentes tipos de enlaces acetálicos o glucosídicos tanto del tipo  $\alpha$  como  $\beta$ , forman cadenas ramificadas con menor grado de polimerización que la celulosa, lo que les da un carácter de sustancias amorfas con grados de cristalinidad de muy bajos a nulos. Además, los puentes de hidrógeno son menos eficaces, haciendo de las hemicelulosas polisacáridos más accesibles al ataque de reactivos químicos.

Las hemicelulosas se forman por una cadena base donde se repite la unidad estructural (hexosas y pentosas) y cadenas laterales que dan lugar a las ramificaciones. La unidad estructural varía para cada hemicelulosa y debido a que las diferentes posibilidades de combinación de los monosacáridos son numerosas, los contenidos y tipos de hemicelulosas varían de sobremanera en función del tipo de material lignocelulósico que se analiza, influyendo factores genéticos, localización dentro de la planta así como factores climáticos. Por otro lado, la reactividad química de la hemicelulosa se basa en la presencia de un grupo carbonilo terminal libre o potencialmente libre y varios grupos hidroxilos en cada una de las unidades de polisacáridos presentes en la cadena así como en las ramificaciones, por lo que pueden experimentar reacciones de oxidación, reducción, nitración, acetilación. En las hemicelulosas las reacciones de hidrólisis ocurren con mayor facilidad que en la celulosa debido a que son sustancias amorfas con un bajo grado de cristalinidad por lo que existe una mayor accesibilidad de los reactivos.

### 3.4.3 TIPOS DE HEMICELULOSA

Una clasificación que se otorga a los heteropolímeros que forman las hexosas es de acuerdo al monómero mayoritario presente en ellos, en la siguiente Figura 11 se muestran todos los posibles monosacáridos que se pueden encontrar en dichas cadenas (Fengel y Wegener, 1984).

Sin embargo las unidades constituyentes, la estructura y el contenido total de la hemicelulosa varían entre los tipos de especies, dentro de la misma e incluso según el tejido anatómico y fisiológico del organismo vegetal.



**Figura 11** Posibles monosacáridos presentes en las cadenas de hemicelulosas

- **XILANOS**

Son los polímeros más largos, y componente mayoritarios de las hemicelulosas, se encuentran constituidos por la unión de residuos de  $\beta$ -D-xilopiranosas mediante enlaces ( $\beta$ ,1-4) con alrededor de unas 190 unidades de D-xilosa. Con frecuencia contienen monosacáridos derivados que se unen a la xilosa mediante enlaces ( $1\alpha$ -2) ó ( $1\alpha$ -3), las cuales son características para cada material lignocelulósico, algunos con grados de polimerización que van desde 90 a 130 pero con más cantidad de arabinosa, con algunas excepciones como la paja de trigo donde el 7.7% de las unidades de xilosa presentan ramificaciones de arabinosa, el 65% en el salvado de trigo, mientras que en el maíz presenta enlace ( $\beta$ ,1-4) con sustituyentes de xilosa y galactosa.

- **MANANOS**

En los materiales alternativos la proporción de éste es muy baja, pero son heteropolímeros con un grado de polimerización entre 100 y 150 su estructura está formada por un esqueleto de glucosa y manosa con los carbonos 2 y 3 parcialmente acetilados y unidos por enlace ( $\beta$ ,1-4). Presentan ramificaciones de galactosa, en las cuales se distinguen dos fracciones una mayoritaria que es pobre en arabinosa y otra rica en ella.

- **GALACTANOS**

Los heteropolímeros como la galactosa son minoritarios en todos los materiales lignocelulósicos en comparación con los de xilosa o manosa. Son muy solubles en agua y presentan una estructura muy ramificada con presencia de arabinosa, xilosa y ácidos urónicos.

- **GALACTOGLUCOMANANOS**

Es una estructura formada por unidades de glucosa y manosa que se encuentran unidas por enlaces ( $\beta$ -1,4) en una proporción de 3:1. Las unidades de galactosa se unen a la

posición 6 de las unidades de manosa, mientras que en las posiciones 2 y 3, tanto de manosa como de glucosa, se pueden encontrar grupos acetilo. Cuando el contenido de unidades de galactosa es reducido, se da lugar a los glucomananos.

- **GLUCOMANANOS**

Los glucomananos son polímeros lineales de glucosa y manosa unidos por enlaces ( $\beta$ -1,4), con predominio de las manosas y que no representan ramificaciones ni grupos sustituyentes laterales.

- **GLUCOROXILANOS**

Los glucuronoxilanos (O-acetil-4-O-metilglucuronoxilano) son el tipo de hemicelulosa principal de maderas duras representan el 15-30% de su masa seca, y también puede contener pequeñas cantidades de glucomananos.

Los glucoroxilanos se componen de una cadena principal lineal de unidades  $\beta$ -D-xilopiranosil unidos por enlaces ( $\beta$ ,1-4) glicosídicos. Algunas unidades de xilosa son acetiladas en los C<sub>2</sub> y C<sub>3</sub> y una de diez moléculas tiene un grupo ácido urónico (4-Op ácido-metilglucurónico unido por enlace -(1,2). El porcentaje de grupos acetilo oscila entre el 8% y el 17% de xilano total, correspondiente, en promedio, a 3.5-7 grupos acetilo por 10 unidades de xilosa (Alén, 2000). El grupo 4-O-metilglucurónico lateral es más resistente a los ácidos que la  $\beta$ -D-xilopiranosil y grupos acetilo. Además de estas unidades estructurales principales, los glucoroxilanos también pueden contener pequeñas cantidades de L-ramnosa y ácido galacturónico

- **XILOGLUCANOS**

Es un heteropolímero de glucosa y xilosa con trazas de otras osas que presenta grupos acetilo. Consisten en  $\beta$ -1,4-D-glucosa ligada a la cadena principal con 75% de estos residuos sustituidos en O-6 con D-Xilosa. L-arabinosa y residuos de D-galactosa se puede

unir a los restos de xilosa que forman cadenas laterales di- o triglicosil. Además en la L-fucosa se han detectado residuos unidos de galactosa. (Maruyama et al, 1996; Sims et al., 1996). Estos polisacáridos predominan en las paredes celulares primarias de maderas duras (Dicotiledóneas y Monocotiledóneas) (De Vries y Visser, 2001), aunque también pueden estar presentes en una proporción minoritaria en las gramíneas.

Los Xiloglucanos interactúan con microfibrillas de celulosa, para la formación de enlaces de hidrógeno, contribuyendo a la integridad estructural de la red de celulosa. (Carpita y Gibeaut, 1993; de Vries y Visser, 2001).

- **GLUCANOS**

Son heteropolímeros ramificados que están constituidos principalmente por glucosa de grado de polimerización 200. Los materiales alternativos los presentan en proporciones bajas del orden de 2 o 4 por 100g de materia seca

- **SUSTANCIAS PÉCTICAS**

Son heteropolímeros que se caracterizan por presentar un esqueleto de unidades de ácido galactourónico. Se encuentran en la pared primaria y en la lámina media en mayor proporción en células que no han lignificado. Forman la pectina, que es un compuesto cementante de la pared celular, por lo que se pueden considerar que los componentes que unen micelas, microfibrillas o células continuas son la lignina, la hemicelulosa, la pectina o sustancias pécticas.

En la Tabla VII se muestra la composición de monosacáridos presentes en diferentes materiales alternativos la cual fue tomada de Ariza et al 2005.

**Tabla VII** Principales constituyentes de las hemicelulosas en materiales alternativos

| <b>Material</b>        | <b>Xilosa</b> | <b>Manosa</b> | <b>Galactosa</b> | <b>Arabinosa</b> | <b>Gpos. Acetilo</b> | <b>Ácidos Urónicos</b> |
|------------------------|---------------|---------------|------------------|------------------|----------------------|------------------------|
| <b>Lignocelulósico</b> |               |               |                  |                  |                      |                        |
| Bagazo de caña         | 21.5          | 0             | 0                | 2.7              | -                    | -                      |
| Cascarilla de arroz    | 12.3          | 2.7           | 0.1              | 2.6              | -                    | -                      |
| Paja de cebada         | 15            | 1.3           | 1.7              | 4                | -                    | -                      |
| Tallos de maíz         | 13-21.1       | 0-0.25        | 0.7-0.8          | 2.8-3.7          | 3.6                  | 4.4                    |
| Zuros de maíz          | 29.1          | 0             | 0                | 2.8              | -                    | -                      |
| Paja de arroz          | 13            | 1.6           | 0.4              | 4                | -                    | -                      |
| Paja de sorgo          | 15            | 0.8           | 0.2              | 3                | -                    | -                      |
| Paja de trigo          | 16.9-18.5     | 0-0.7         | 0-0.7            | 1.6-2.1          | 2.4                  | 2.2                    |

### 3.4.4 LIGNINA

La lignina es un heteropolímero aromático, amorfo por la condensación de precursores fenólicos, de estructura tridimensional compleja y ramificada Figura 13. Sus funciones principales son dar soporte estructural, rigidez, impermeabilidad y protección a los polisacáridos estructurales (celulosa y hemicelulosa) del ataque microbiano así como mantener unidas las fibras celulósicas, es por ello que resulta altamente resistente a la degradación química y biológica (Aro et al., 2005).

Los monómeros que forman la lignina son los alcoholes cinamílicos Figura 12, diferenciados entre sí gracias a las diferentes sustituciones que presenta el anillo aromático. Así, el alcohol p-cumarílico da a lugar a las unidades p-hidroxifenilo (unidades H) el cual no presenta ningún sustituyente; el alcohol coniferílico da a lugar la formación de unidades guayacilo (unidades G) presentando un grupo metoxilo en la posición 3 del anillo aromático y el alcohol sinapílico que da lugar a las unidades siringilo (unidades S) presenta dos grupos metoxilo en posiciones 3 y 5 de dicho anillo.

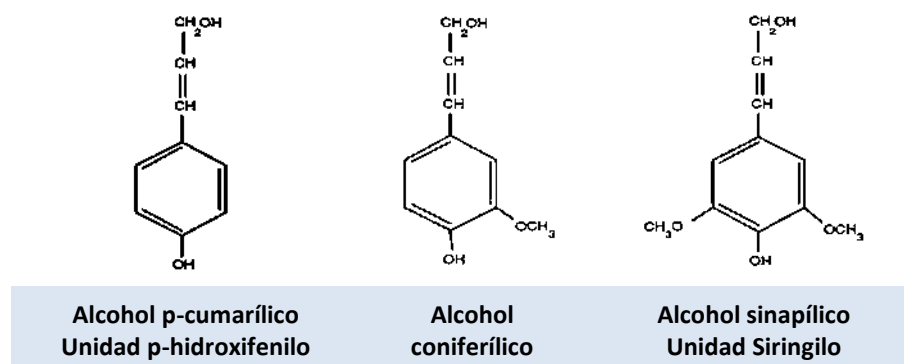


Figura 12 Alcoholes cinamílicos precursores de la lignina

La polimerización de estos precursores durante la formación de la pared celular es producida por medio de la sucesión de una etapa enzimática y una etapa química. Siendo en la primera etapa oxidados los precursores por peroxidasas de la pared resultando radicales fenoxilo (Higuchi, 1990), que en seguida durante la etapa química reaccionan al azar entre ellos. En esta etapa se generan una gran variedad de formas resonantes que pueden reaccionar unas con otras, es por ello que la lignina no presenta una estructura única. (Hernández, 1997).

- **TIPOS DE ENLACE:**

Las uniones que presentan pueden ser de tipo condensado (enlaces C-C), o del tipo no condensado (enlace aril-alquil éter) en las que intervienen tanto los anillos aromáticos como las cadenas propílicas (Adler, 1977).

- **ENLACE TIPO ETER**

Este tipo de enlace forma grupos de tipo no condensado, son los más frecuentes ya que alrededor de un 40 a 60% de las unidades de lignina se encuentran formadas por el enlace  $\beta$ -o-4, aunque también es posible encontrar los enlaces  $\alpha$ -o-4, sin embargo son menos frecuentes siendo los enlaces más escasos los del tipo  $\gamma$ -o-4.

- **ENLACE CARBONO-CARBONO**

La alta condensación de la lignina se encuentra condicionada por los enlaces C-C ya que sólo se puede establecer entre unidades H o G, puesto que las unidades S al tener en su estructura dos grupos metóxilo en posiciones 3 y 5 no pueden establecer este tipo de enlace.

- **ENLACE TIPO ÉSTER**

Este tipo de enlace raramente se presenta, pero cuando lo hace éste se produce en la cadena propílica.

**TIPOS DE LIGNINA:**

De acuerdo al grupo taxonómico al que pertenecen las plantas existen diferentes tipos de lignina:

- **GIMNOESPERMAS (Ligninas G)**

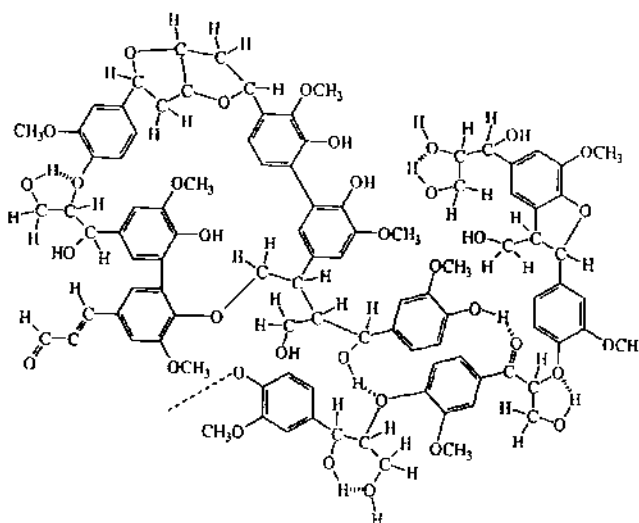
Es el tipo de lignina más sencillo, se encuentran formadas por unidades del tipo G (guayacilo ó guayacilpropanos). Es posible encontrar unidades del tipo S, en una proporción  $S/G = 1/10$  sin embargo, son menos frecuentes

- **ANGIOESPERMAS LEÑOSAS (Ligninas G/S)**

Están conformadas por unidades del tipo S y del tipo G aproximadamente en la misma proporción. Los grupos metóxilo, en posiciones 3 y 4, del anillo aromático permiten la reducir la formación de los enlaces tipo éter, y sobre todo los enlaces C-C, con lo cual se reduce el grado de polimerización y en menor proporción la condensación.

- **ANGIOESPERMAS HERBÁCEAS (Ligninas HGS)**

Éste tipo de lignina es la que se encuentra presente en el Agave *Tequilana Weber*, la lignina presente se conoce como (lignina HGS) en ellas se encuentran además de las ligninas más sencillas, es decir, las formadas por unidades de tipo G (guayacilo ó guayacilpropanos) y las de tipo S (Singiril ó Singirilpropanos). Las unidades tipo H también conocidas como tipo P Hidroxifeno ó P hidroxifenil propanos).



Reticulación debido a las reacciones de radicales adventicias hacia el C<sub>6</sub>-C<sub>3</sub> precursores del fenol cinamílico.

**Figura 13** Estructura de la Lignina

## 4. AGAVE TEQUILANA WEBER COMO MATERIA PRIMA

### 4.1 INTRODUCCIÓN

En un mundo con problemas de alimentación como el nuestro, no resulta aceptable aplicar la producción de azúcares simples como la glucosa a partir del maíz para producir etanol. Sin embargo, la teoría y la experiencia práctica han demostrado que la integración material y energética de los procesos de producción de azúcar, etanol y proteína unicelular es la solución más adecuada desde el punto de vista ecológico. La alternativa de emplear residuos lignocelulósicos en la producción de etanol, constituye hoy día una posibilidad altamente prometedora por su amplia disponibilidad en el mundo. La existencia en los diversos países iberoamericanos de abundantes recursos lignocelulósicos, justifica la dedicación de estas naciones de un esfuerzo importante al desarrollo y adaptación de tecnologías tendientes a la utilización integral y racional de los mismos. En este grupo de materias primas se ubica el bagazo como residuo agroindustrial. La idea de producir etanol a partir de esta vía data de las décadas de 1940 y 1950, y su producción se ha llevado a escala comercial en algunos países, principalmente en Brasil. (Hernández Ma. Teresa, 2007)

El fenómeno de la globalización, hace que incremente la demanda de nuevas fuentes energéticas, el etanol a base de agave *Azul*, materia prima con la que se produce el tequila, ha sido reconocido como un buen combustible no contaminante, capaz de reemplazar el consumo de derivados del petróleo. La principal ventaja de esta planta es su capacidad de sobrevivir en condiciones climáticas extremas, en terrenos poco fértiles incluso en el desierto, con lo cual no compite con terrenos para cultivo alimenticio. Para producir biocombustibles sin destruir bosques lluviosos o competir con cultivos que son base de la alimentación en México, se propone hacer uso integral de la planta *Agave Tequilana Weber*.

En un estudio realizado por un grupo de investigadores entre ellos Oliver Inderwildi (Oliver R. Inderwildi, et. al., 2011) se comprobó que el agave es un combustible de bajo impacto medioambiental, puesto que la producción de etanol a partir de agave emite 35 g de dióxido de carbono por cada mega julio de energía mientras que el etanol proveniente del maíz presenta un índice de 85 g. y la del petróleo lanza 100 g a la atmósfera. Este, es el primer estudio completo del ciclo de la energía y de los gases de efecto invernadero en el etanol derivado de la planta del agave. En él se ha tenido en cuenta cada etapa del ciclo de producción: desde el uso de fertilizantes hasta los lubricantes de la maquinaria pasando por la electricidad generada al quemar los residuos. (Oliver R. Inderwildi, et. al, 2011)

Lo anterior plantea nuevos retos a la sociedad, siendo la población rural quien desempeña un papel primordial en el aprovechamiento y manejo de los recursos naturales, lo que constituye un punto de gran importancia para el desarrollo sustentable.

## **4.2 USOS E IMPORTANCIA DEL AGAVE EN MÉXICO**

Entre las plantas más notables del paisaje mexicano, en especial de las zonas áridas y semiáridas del país se encuentran los agaves también conocidos como magueyes, que son considerados especies clave en dichas regiones tanto por su abundancia como por la cantidad de recursos que proporcionan.

En México, dichas plantas han tenido y tienen una gran importancia económica y cultural para numerosos pueblos indígenas y mestizos, que los han aprovechado para cubrir una amplia gama de necesidades durante siglos, que van desde alimentación, usos medicinales hasta la elaboración de implementos agrícolas. Los principales usos de importancia socioeconómica y agroecológica que se le han otorgado a lo largo del tiempo se muestran en la Tabla VIII, mientras que, en la Tabla IX se muestran los usos, productos y parte de la planta que se utiliza en las regiones donde existen agaves en la actualidad.

Es por esto, que los agaves no sólo tienen su máxima expresión de diversidad morfológica, filogenética y evolutiva en México, sino también cultural, ya que los seres humanos que han poblado estas tierras han sabido aprovechar al máximo los beneficios que esta planta ofrece.

**Tabla VIII** Principales usos de importancia socio-económica del agave

| <b>PRINCIPALES USOS DE IMPORTANCIA SOCIOECONÓMICA DEL AGAVE</b> |                                                                                                               |                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Usos</b>                                                     | <b>Producto</b>                                                                                               | <b>Parte de la Planta</b>                                                                     |
| <b>Alimentación</b>                                             | Azúcar, Guisos, Dulce, Envolver Barbacoa, Mixiotes, Gusanos blancos, Gusanos rojos, Pan de Pulque y Tortillas | Tallo, Piña, Flores y Frutos, Escapo Floral, Hojas, cutícula del cogollo, Perianto de flores. |
| <b>Bebidas</b>                                                  | Aguamiel, Miel, Atole de aguamiel, Pulque, Mezcal, Tequila, Sotol, Bacanora, Vinagre, Jarabe                  | Tallo, Piña                                                                                   |
| <b>Agrícola</b>                                                 | Cerca viva para evitar la erosión.                                                                            | Planta completa                                                                               |
| <b>Forraje</b>                                                  | Abono orgánico, Bovinos, Caprinos, Porcinos                                                                   | Hojas, Escapos Florales, Flores y parte de la Inflorescencia, Bagazo                          |

**Tabla IX** Usos actuales del agave

| <b>USOS DE LAS ESPECIES DE AGAVE</b> |                                                                                                                                                                    |                                                            |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| <b>Construcción</b>                  | Cercas, casas, corrales, tejas para cubrir techos, canales para coleccionar agua de lluvia, Materiales compuestos: Resinas, Termoplásticos o Termófilos más fibras | Escapo floral, Hojas, Residuos de fibra.                   |
| <b>Fibras</b>                        | Cordelería, jarcería y cestería, escobetillas y cepillos para limpieza con jabón incluido, estropajos, tejido y vestuario.                                         | Fibras de hojas, raíces                                    |
| <b>Medicinal</b>                     | Cura golpes y lesiones internas, sana heridas, prevención de escorbuto, cura la anemia.                                                                            | Hojas mieles y pulque.                                     |
| <b>Doméstico</b>                     | En jardines calles, jabón o recipientes para agua, tapaderas de cazuelas, ollas o barriles, palillos de extracción de gusanos comestibles.                         | Hojas, tallos y raíces, espina terminal más hebra de hoja. |
| <b>Otros usos</b>                    | Industria química farmacéutica, medicamentos y productos esteroides, productos de celulosa para papel, producción de etanol, celulosa y glucósidos.                | Hojas, raíces tallo y semilla pulpa, bagazo y jugos.       |

### 4.3 TAXONOMÍA DEL AGAVE

El género agave cuyo significado en griego es “admirable” fue dado a conocer a la ciencia por el naturalista sueco Carl Von Linneo en 1753. Su clasificación taxonómica Tabla X, ha sido objeto de controversias debido a su gran variación fenotípica y genotípica incluso dentro de la misma especie y de una misma población. La información que está disponible en la clasificación del Sistema Integrado de Información Taxonómica (SIIT) de la comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), en relación al orden botánico para la familia y género agave, es muy similar a la clasificación propuesta por el sistema Cronquist en el que la familia se divide sólo en siete géneros.

De acuerdo a la taxonomía clásica se les clasifica dentro de la familia *Amaryllidaceae* y la subfamilia botánica *Agavoidea*. Siendo ésta la más grande comprendiendo aproximadamente, doscientas setenta y cinco especies (Lawrence, 1951). Por otro lado Hutchinson (1979) lo ubicó dentro de los *Agavales* en la familia *Agavaceae*, incluyendo géneros pertenecientes a la familia *Liliacea* y otros a la *Amaryllidacea*. De acuerdo a esta última clasificación, el subgénero agave está integrado por 12 secciones con 82 especies, 21 sub-especies y 23 variedades.

**Tabla X** Propuestas taxonómicas del género agave

|                                 | <b>Hutchinson<br/>(1959)</b>                                                                                                   | <b>Dahlgreen<br/>et. al. (1985)</b>                | <b>Cronquist (1981<br/>y 1998)</b> | <b>CONABIO<br/>(2006)</b> |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| <b>Reino</b>                    | Plantae                                                                                                                        | Plantae                                            | Plantae                            | Plantae                   |
| <b>Sub-reino</b>                |                                                                                                                                |                                                    |                                    | Tracheobionta             |
| <b>División</b>                 | Angiospermae                                                                                                                   | Magnoliophyta                                      |                                    | Magnoliophyta             |
| <b>Clase</b>                    | Monocotiledoneae                                                                                                               | Liliopsida                                         | Liliopsida                         | Liliopsida                |
| <b>Sub-clase</b>                |                                                                                                                                |                                                    | Liliidae                           | Liliidae                  |
| <b>Orden</b>                    | Agavales                                                                                                                       | Asparagales                                        | Liliales                           | Liliales                  |
| <b>Familia</b>                  | Agavaceae                                                                                                                      | Agavaceae                                          | Agavaceae                          | Agavaceae                 |
| <b>Sub-familia<br/>(tribus)</b> | Agavaeae <sup>1</sup><br>Dracaenae <sup>2</sup><br>Nolineae <sup>3</sup><br>Phormieae <sup>4</sup><br>Polyantheae <sup>5</sup> | Agavoideae <sup>A</sup><br>Yuccoideae <sup>B</sup> |                                    |                           |

|                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                  |                                                                                                                    |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Género</b>     | Yuccaeae <sup>6</sup><br>Agave <sup>1</sup><br>Beschorneria <sup>1</sup><br>Furcraea <sup>1</sup><br>Doryanthes <sup>1</sup><br>Cordyline <sup>2</sup><br>Cohnia <sup>2</sup><br>Dracaena <sup>2</sup><br>Sansevieria <sup>2</sup><br>Nolina <sup>3</sup><br>Calibanus <sup>3</sup><br>Dasylirion <sup>3</sup><br>Phormium <sup>4</sup><br>Polyanthes <sup>5</sup><br>Prochnyanthes <sup>5</sup><br>Pseudobrava <sup>5</sup><br>Hesperaloë <sup>6</sup><br>Clistoyucca <sup>6</sup><br>Yucca <sup>6</sup><br>Samuela <sup>6</sup> | Agave <sup>A</sup><br>Beschorneria <sup>A</sup><br><br>Furcraea <sup>A</sup><br><br><br><br><br><br>Polianthes <sup>A</sup><br>Prochnyanthes <sup>A</sup><br><br>Hesperaloë <sup>B</sup><br>Yucca <sup>B</sup><br>Manfreda <sup>A</sup> | Agave<br><br><br><br><br>Doryanthes<br><br>Cordyline<br>Dracaena<br>Sansevieria<br>Nolina<br><br>Dasylirion<br>Phormium<br>Yucca | Agave<br><br><br>Furcraea<br><br><br><br><br><br>Phormium<br>Poluanthes<br><br>Hesperaloë<br>Yucca<br><br>Manfreda |
| <b>Sub-género</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Littaea<br>Agave                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                  |                                                                                                                    |

El agave, físicamente está formado por hojas delgadas casi planas y por la piña. Desde el punto de vista de su constitución los elementos importantes que lo forman son: *fibras, azúcares, sales minerales y agua*. El centro del Agave es el corazón de la planta, en su alrededor se encuentran las pencas, que son los tallos de las hojas del agave. En la piña se acumula el jugo natural, el cual tiene altos contenidos de fructuosa. Su rico contenido de azúcar en condiciones óptimas de madurez de la planta, varía entre 20 y 30 grados Brix que es el ingrediente básico para producir tequila.

---

#### 4.4 DISTRIBUCIÓN DEL AGAVE

Los agaves son plantas cuyas características fisiológicas y morfológicas les confieren una notable capacidad de adaptación a los ambientes más hostiles, donde se desarrollan y multiplican fácilmente. El género *Agave* es originario de Mesoamérica, distribuyéndose desde los 34 ° Latitud Norte hasta los 60 ° Latitud Sur.

Se pueden encontrar en gran diversidad de hábitats, desde valles y planicies hasta cerros y laderas pedregosas, incluyendo lugares montañosos de gran altitud. Se desarrollan mejor, tanto a nivel individual como poblacional, sobre planicies extensas con suelos aluviales, livianos y con altos contenidos de óxidos y de potasio, con drenaje y alta exposición a los rayos solares, de profundidad y textura medias con un pH ligeramente ácido y alcalino es decir entre 6 y 8. Conviven con varios tipos de vegetación, destacando la vegetación xerófita, pastizales, matorrales, bosques, entre otros. Puede encontrarse tanto en sitios con altitudes de 300 msnm, como en lugares situados a más de 3000 msnm.

México es considerado centro de origen y de diversidad de los agaves, no se tiene claro cuántas especies se han documentado. Sin embargo, actualmente algunos autores mencionan que se han reconocido 166, otros 200 y algunos más mencionan hasta 273 diferentes especies de agaves en el continente americano, distribuidas una pequeña parte de Estados Unidos, México, América Central y América del Sur. Se considera que el 75% de todas las especies se encuentran en nuestro país y el 58% son endémicas del territorio nacional, lo que muestra la gran importancia biológica en el país. Como ya se mencionó anteriormente los agaves son plantas xerófitas, perennes adaptadas a vivir en condiciones climáticas desfavorables, con largos periodos de sequía y altas temperaturas, como las regiones subtropicales semiáridas y áridas, cálidas, semi-cálidas y templadas. Esto se debe a la pobre tolerancia que presentan a las bajas temperaturas. Ya que la absorción celular se reduce a la mitad cuando las temperaturas descienden al nivel de  $-6^{\circ}\text{C}$ . El agave que es menos tolerante a bajas temperaturas (agave *Sisilana*) reduce a la mitad su absorción celular a  $-6.4^{\circ}\text{C}$  y los dos agaves más tolerantes (agave *Parryi* y agave *Utahensis*) reducen

su absorción celular a  $-19^{\circ}\text{C}$ . En particular por esta razón el *Agave Tequilana Weber* no puede ser cultivado en regiones donde ocasionalmente ocurren temperaturas de  $-7^{\circ}\text{C}$  o inferiores. Por otro lado, la hoja de este agave puede tolerar temperaturas de hasta  $55^{\circ}\text{C}$  (Nobel et al., 1998). La asimilación de  $\text{CO}_2$  es favorecida por temperaturas diurnas/nocturnas de bajas a moderadas y disminuye drásticamente en ambientes donde las temperaturas del aire diurnas/nocturnas son altas.

#### 4.5 CULTIVO DE AGAVE TEQUILANA WEBER VARIEDAD AZUL

El agave *Tequilana Weber* es la especie de mayor importancia económica cultivada en el país y es la única especie de Agavaceae que es apropiada para la producción de tequila esto gracias a su alto contenido de fructanos los cuales constituyen los principales carbohidratos de reserva de la planta. Su clasificación taxonómica más reciente se muestra en la Tabla XI:

**Tabla XI** Clasificación taxonómica del agave *Tequilana Weber*

|                   |                               |
|-------------------|-------------------------------|
| <b>Reino:</b>     | Plantae                       |
| <b>División:</b>  | Magnoliophyta                 |
| <b>Clase:</b>     | Liliopsida (Monocotiledoneae) |
| <b>Subclase:</b>  | Liliidae                      |
| <b>Orden:</b>     | Liliales                      |
| <b>Familia:</b>   | Agavaceae                     |
| <b>Género:</b>    | Agave                         |
| <b>Subgénero:</b> | Agave                         |
| <b>Sección:</b>   | Rigidae                       |
| <b>Especie:</b>   | Agave Tequilana Weber         |



Los fructanos son oligómeros compuestos principalmente de unidades de fructuosa que se encuentran unidas a una molécula de sacarosa, siendo fácilmente degradables por medio de tratamientos térmicos o enzimáticos. De acuerdo a su estructura molecular se les ha clasificado de la siguiente manera como: fructoligosacáridos, inulinas, levanas y fructanas mixtas o ramificadas.

Las inulinas Figura 14, son la clase de fructanos presentes en la piña del agave *Tequilana Weber*, su degradación por medio de hidrólisis ácida permite la liberación de azúcares para su posterior fermentación. Las inulinas son polímeros lineales cuya estructura está formada por moléculas de fructosa unidas por enlaces glucosídicos  $\beta$  (2-1) que contienen una molécula de glucosa unida por un enlace glucosídico  $\alpha$  (1-2) la cual forma el extremo reductor de la cadena (Homme et al., 2001). El grado de polimerización de éstas llega a ser hasta de 200 unidades de fructosa, aunque generalmente su tamaño oscila entre 30 y 60 unidades de fructosa (Rosa et al., 1986).

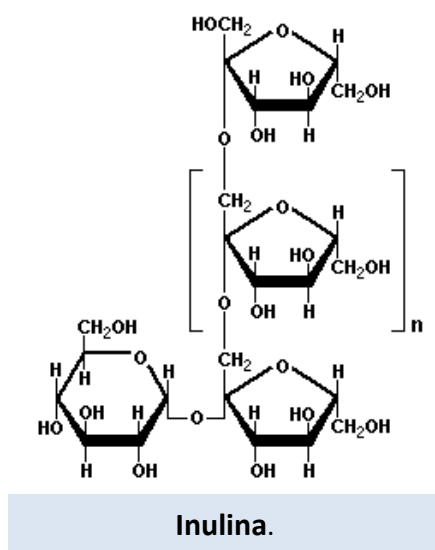


Figura 14 Estructura de la inulina

#### 4.6 TERRITORIO DE DENOMINACIÓN DE ORIGEN

La designación de productos agroalimentarios con el nombre de su lugar de producción para su distribución y venta es una práctica que le confiere a dichos productos de un valor especial o un mérito particular al ser reconocida la fuerte unión entre el entorno natural (esto es, suelo, geografía, topografía, clima, etcétera.) y el hombre y sus especificidades históricas y culturales es decir, cultivo, métodos de producción y transformación. Todo ello en conjunto propicia las características propias y la calidad de los productos. De aquí surge la llamada denominación de origen, la cual se define como

aquella que utiliza el nombre de una región o lugar geográfico de un país para designar un producto originario, cuya calidad o características se deben exclusivamente a este medio geográfico resultado de factores naturales y humanos.

La denominación de origen del tequila conforme a la Declaración General de Protección a la Denominación de Origen el 9 de diciembre de 1974 se publicó en el Diario Oficial de la federación la protección prevista por el Título Quinto de la Ley de Invenciones y Marcas vigente, a la denominación de origen "Tequila", para aplicarse a la bebida alcohólica, que tiene su origen en el municipio de Jalisco que lleva ese nombre, en donde se cultiva y produce agave *Tequilana Weber variedad azul*, pero fue modificada posteriormente para incluir otros municipios de Jalisco y otros estados Figura 15, por lo que su área actual consta de 181 municipios, de los cuales 125 se encuentran en el estado de Jalisco, ocho en Nayarit, once en Tamaulipas, siete en Guanajuato y treinta en Michoacán, de tal manera que el tequila sólo puede ser elaborado en esos 181 municipios que comprenden aproximadamente 6% del territorio nacional.

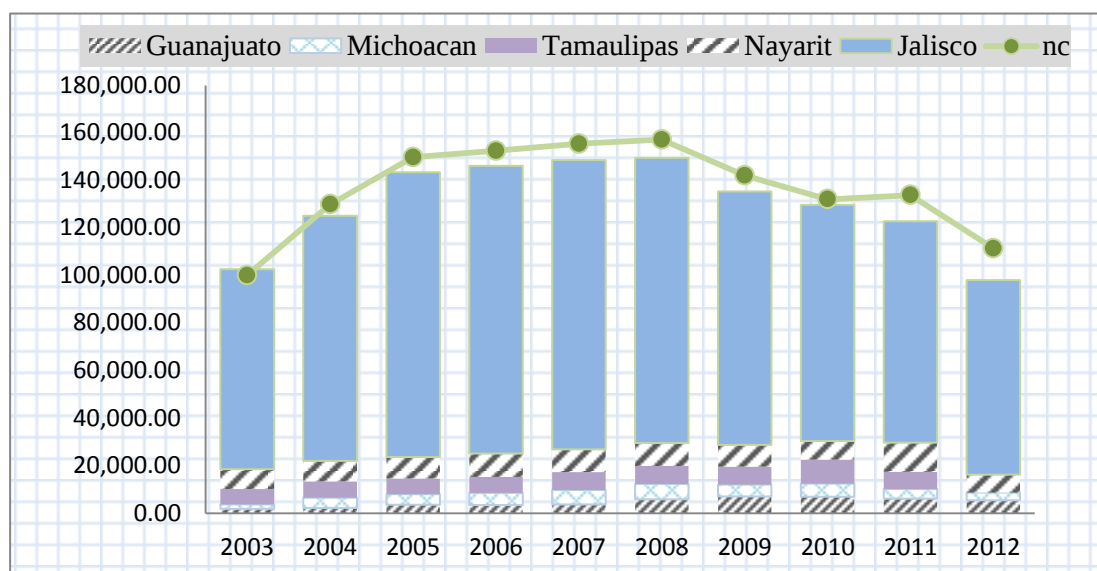


| Nayarit                |                          | Michoacán     |                        | Tamaulipas        | Guanajuato             |
|------------------------|--------------------------|---------------|------------------------|-------------------|------------------------|
| Ahuacatlán             | Chavinda                 | Numarán       | Tanhuato               | Aldama            | Abasolo                |
| Amatlán de<br>Cañas    | Briseñas de<br>Matamoros | Pajacuarán    | Tinguindín             | Altamira          | Cuerámaro              |
| Ixtlán del<br>Río      | Chilchota                | Peribán       | Tocumbo                | Antiguo           | Huanímaro              |
| Jala                   | Churintzio               | La piedad     | Venustiano<br>Carranza | Morelos           | Manuel<br>Doblado      |
| Xalisco                | Cotija                   | Regules       | Gómez Farías           | González<br>Llera | Pénjamo                |
| San Pedro              | Ecuandureo               | Los Reyes     | Villa Mar              | Mante             | Purísima del<br>Rincón |
| Lagunillas             | Jacona                   | Sahuayo       | Vista<br>Hermosa       | El nuevo          |                        |
| Santa María<br>del Oro | Jiquilpan                | Tancítaro     | Yurécuaro              | Morelos           | Romita                 |
| Tepic                  | Maravatio                | Tangamandapio | Zamora                 | Ocampo            |                        |
|                        |                          | Tangancícuaro | Zináparo               |                   |                        |
|                        | Nuevo<br>Parangacutiro   |               | Marcos<br>Castellanos  | Tula              |                        |
|                        |                          |               |                        | Xicoténcatl       |                        |

**Figura 15** Municipios que conforman el territorio de denominación de origen del tequila, el territorio comprende todo el estado de Jalisco

#### 4.7 ESTADÍSTICOS DEL AGAVE TEQUILERO

Los gráficos que se muestran a continuación presentan un comparativo del aporte por estado respecto a la cosecha nacional de agave tequilero, los estados contemplados son los que forman parte del territorio de denominación del tequila. Para su elaboración se tomaron datos de los últimos 10 años los cuáles fueron obtenidos del SIACON

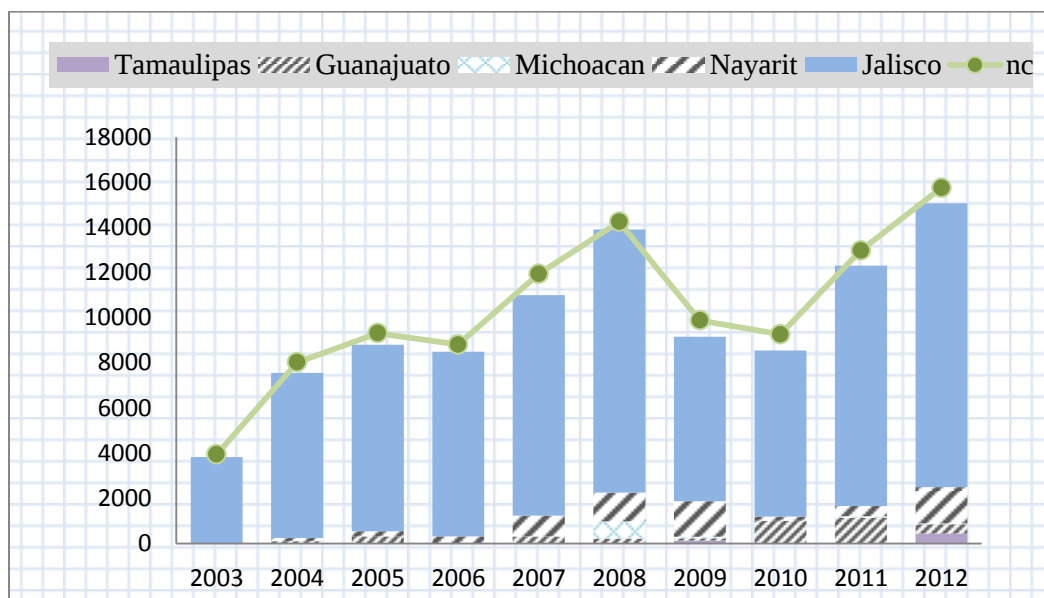


**Figura 16** Superficie sembrada [Ha.] vs Período [Años] de los estados que comprenden la DOT frente a la superficie sembrada a nivel nacional

En la Figura 16, se puede observar que el 95.32% de la superficie sembrada de agave *Tequilana Weber* corresponde a la superficie de los municipios que se encuentran bajo el territorio de denominación, correspondiendo el mayor porcentaje 80.83% al estado de Jalisco seguido por el estado de Nayarit con el 7.03%. Hasta el año 2012 en los estados que comprenden la zona de Denominación de Origen del Tequila (DOT) se tenían establecidas 105 mil 062 hectáreas de los cuales se obtuvo una producción de un millón 366 mil 055 toneladas, cuyo valor de producción fue de 1 billón 739 millones 482 mil 763 pesos. En este año, se cosecharon 15 mil 753 hectáreas, obteniendo una producción de un

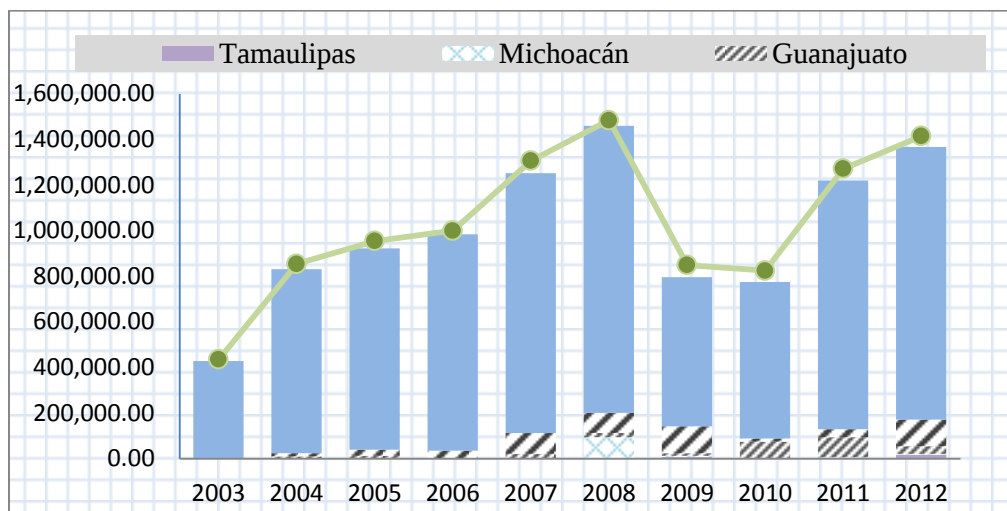
millón 420 mil 395 toneladas, cuyo valor de la producción fue de casi 1,800 millones de pesos (SIAP,2013).

La creciente demanda del tequila que se derivó de la denominación de origen al tequila acompañada por la certificación de calidad, la promoción en los mercados internacionales por el Consejo Regulador del Tequila (CRT) y la proliferación de nuevas empresas, ha propiciado la siembra de grandes cantidades de plantas, que al no tener un control sobre la fitosanidad del material utilizado, han generado que aparezca con mayor frecuencia y severidad daños de enfermedades causadas por el picudo del agave *Scyphophorus Acupunctatus Gyllenhal*, el piojo harinoso *Pseudococcus sp.*, el gusano blanco *Acentrocneme (Aegiale) Hesperiaris (Wlk.)*, la marchitez causada por *Fusarium Oxysporum*; y la pudrición del cogollo causada por *Erwinia sp.* (Flores, 2000). Ante tal situación el CRT como medida de prevención ha optado por realizar una disminución en los últimos años de las plantaciones en la DOT como se aprecia en la Figura 16, todo ello con el fin de ejercer un mayor control sobre el cultivo, y evitar la propagación de enfermedades.



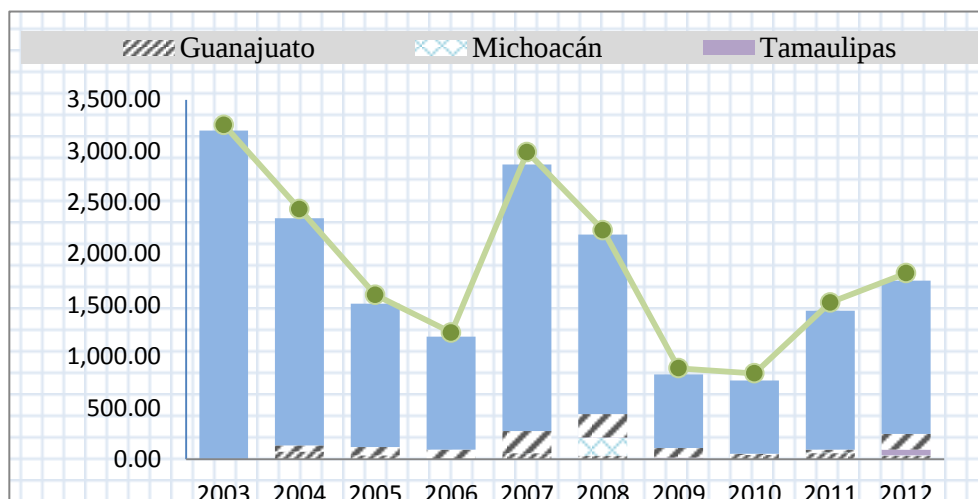
**Figura 17** Superficie cosechada [Ha.] vs Período [Años] de los estados que comprenden la DOT frente a la superficie cosechada a nivel nacional

La Figura 17 muestra que el mayor porcentaje de hectáreas cosechadas del cultivo es aportado por el estado de Jalisco siendo el 88.05% seguido por el estado de Nayarit con el 6.8%. Mientras que a nivel nacional la DOT aporta el 94.68% del total de hectáreas cosechadas.



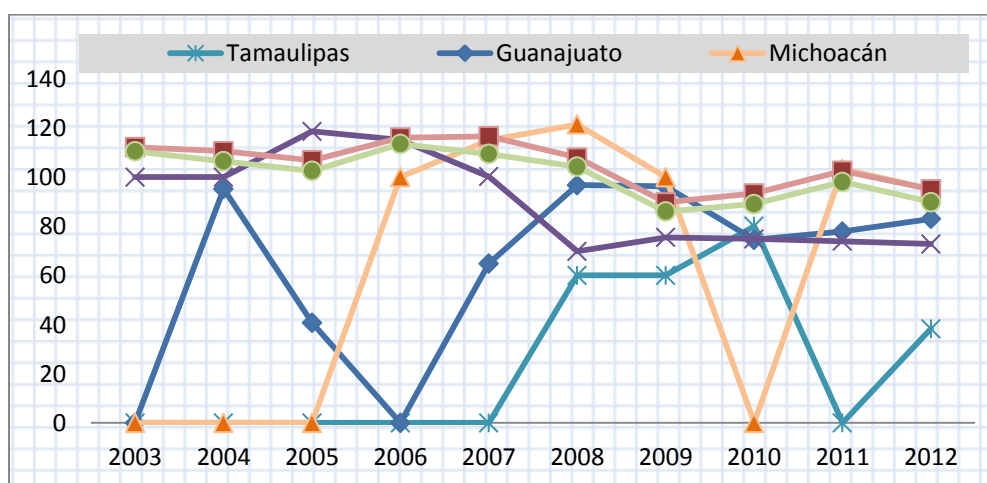
**Figura 18** Volumen de producción [Ton] vs Período [Años] de los estados que comprenden la DOT frente al volumen de producción a nivel nacional

A partir del año 1997 y hasta el 202 la producción de agave tequilero sufrió una caída considerable al pasar del 704.6 mil toneladas a 235.28 mil toneladas lo que significó una reducción de 469.32 mil toneladas. Sin embargo, en los siguientes años Figura18, su producción fue en aumento teniéndose una baja producción en el 2009 y 2010, a pesar de ello tomando como punto de partida el año 2010 se observa un crecimiento porcentual del 36.47% en el año 2011 marcando una recuperación significativa en términos reales de 444 mil 816.20 toneladas.



**Figura 19** Valor de producción [Millones \$] vs Período [Años] de los estados que comprenden la DOT frente al valor de producción a nivel nacional

Se puede apreciar en la Figura 19 que el mayor porcentaje del valor de producción a nivel nacional se obtiene por el estado de Jalisco lo cual es de esperarse debido a que el estado en su totalidad se dedica a la producción del tequila el aporte del estado es del 90.58% siendo el aporte del último año de 1,800 millones de pesos. Las regiones fuera de la DOT que producen agave *Tequilana Weber* solo aportan sólo el 3.8% del valor total de producción a nivel nacional.



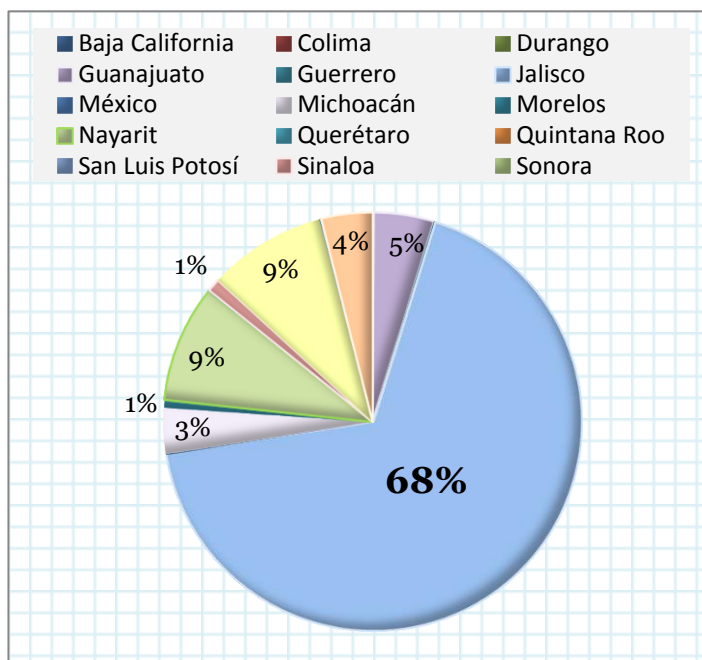
**Figura 20** Rendimientos [Ton/Ha.] vs Período [Años] de los estados que comprenden la DOT frente al valor de producción a nivel nacional

La Figura 20 muestra que los rendimientos del estado de Jalisco frente a los rendimientos nacionales, son iguales o incluso superiores debido a que el aporte de los otros estados productores son muy bajos. El año que se presentaron mejores rendimientos a nivel nacional dentro del periodo analizado es el año 2006 con 113.49 Ton/Ha. y el más bajo en el 2009 con 85.99 Ton/Ha.

Las Figuras 21, 22 y 23 así como sus respectivas Tablas XII, XIII y XIV indican el aporte en porcentaje de cada uno de los estados que cosechan agave *Tequilana Weber* dentro y fuera del territorio de denominación de acuerdo a la fuente SIACON, para ello fueron tomados los datos de los últimos cinco años.

**Tabla XII** Porcentaje de superficie sembrada de a. Tequilero

| Estado          | %Superficie |
|-----------------|-------------|
| Baja California | 0.02        |
| Colima          | 0.08        |
| Durango         | 0.01        |
| Guanajuato      | 4.59        |
| Guerrero        | 0.08        |
| Jalisco         | 67.74       |
| México          | 0.08        |
| Michoacán       | 3.47        |
| Morelos         | 0.63        |
| Nayarit         | 8.99        |
| Querétaro       | 0.07        |
| Quintana Roo    | 0.01        |
| San Luis Potosí | 0.04        |
| Sinaloa         | 1.00        |
| Sonora          | 0.01        |
| Tamaulipas      | 9.11        |
| Veracruz        | 0.08        |
| Yucatán         | 0.10        |
| Zacatecas       | 3.88        |

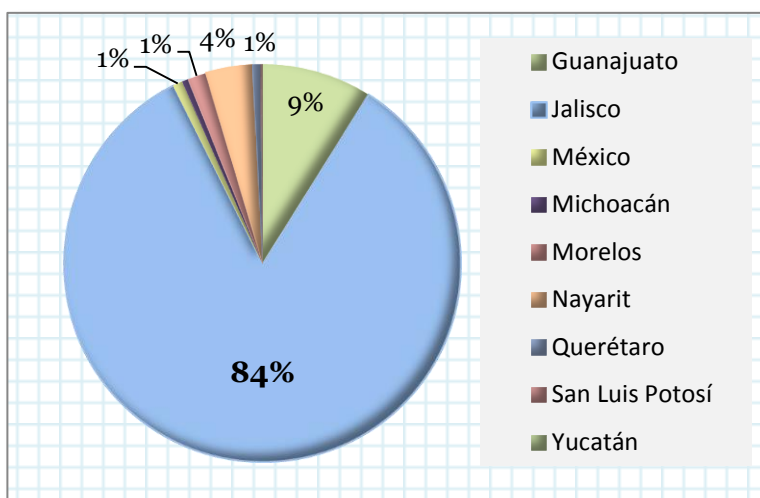


**Figura 21** Porcentaje de agave sembrado en la República Mexicana

Los estados que se encuentran fuera del territorio de denominación que cuentan con el mayor porcentaje de superficie cosechada respectivamente son: Zacatecas, Sinaloa y el estado de Morelos. Esto nos plantea un nuevo panorama para la localización de nuevas plantaciones de dicho cultivo ya que si bien no se tiene una amplia producción las tierras en las cuales se cultivan tienen las características adecuadas para el crecimiento de la planta.

**Tabla XIII** Porcentaje de superficie cosechada de Agave Tequilero

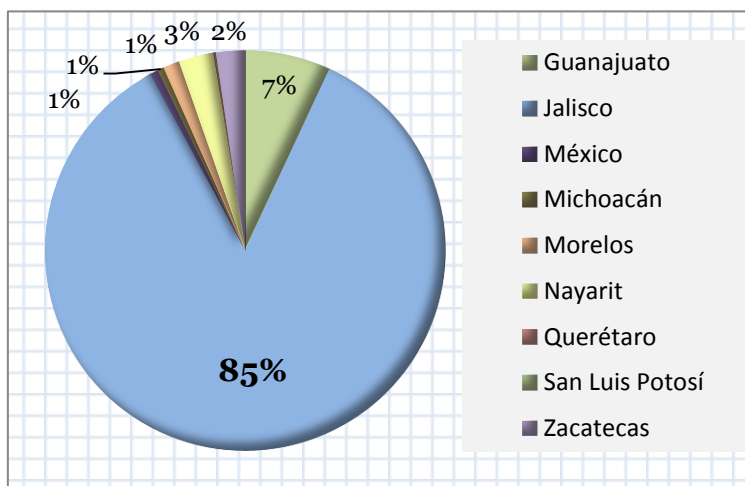
| Estado          | % Cosecha |
|-----------------|-----------|
| Guanajuato      | 8.71      |
| Jalisco         | 81.56     |
| México          | 0.79      |
| Michoacán       | 0.48      |
| Morelos         | 1.45      |
| Nayarit         | 3.74      |
| Querétaro       | 0.66      |
| San Luis Potosí | 0.10      |
| Yucatán         | 0.02      |



**Figura 22** Porcentaje de agave cosechado en la República Mexicana

**Tabla XIV** Porcentaje de volumen de producción de Agave Tequilero

| Estado          | % Volumen |
|-----------------|-----------|
| Guanajuato      | 6.92      |
| Jalisco         | 85.30     |
| México          | 0.60      |
| Michoacán       | 0.51      |
| Morelos         | 1.31      |
| Nayarit         | 2.86      |
| Querétaro       | 0.16      |
| San Luis Potosí | 0.03      |
| Zacatecas       | 2.31      |



**Figura 23** Porcentaje de volumen de producción de agave en la República Mexicana

Se tienen varias versiones de los inventarios de agave sin embargo, el CRT está llevando a cabo un inventario Tabla XV que con cifras preliminares da un total de 229 millones de plantas al 2011. A pesar de ello, dentro de este registro únicamente se contabilizan las plantas que se encuentran dentro del DOT y considerando que el 4.67% de la superficie sembrada se encuentra fuera del territorio se tiene un panorama prometedor para su empleo como materia prima.

**Tabla XV** Inventario de plantas de agave dentro de la DOT y registradas en el CRT Diciembre 2010. Fuente análisis estadísticos CRT

| <b>Año</b>   | <b>Plantas de Agave</b> |
|--------------|-------------------------|
| 2000         | 1,905,812               |
| 2001         | 3,417,602               |
| 2002         | 8,417,211               |
| 2003         | 23,620,651              |
| 2004         | 28,854,078              |
| 2005         | 37,597,013              |
| 2006         | 40,685,948              |
| 2007         | 42,262,280              |
| 2008         | 38,190,202              |
| 2009         | 28,082,442              |
| <b>Total</b> | <b>253,033,239</b>      |

#### **4.8 TIERRAS FUERA DEL DOT PARA CULTIVO DEL AGAVE TEQUILANA WEBER**

La industria de los biocombustibles requiere de un abasto sostenido y predecible de materia prima para asegurar su producción. Debido a que la duración del proceso de cultivo del agave, toma de seis a ocho años, es necesario disponer de la mayor información posible sobre el manejo del cultivo a fin de obtener producciones de calidad y garantizar el abasto de biocombustible. Para ello, el factor decisivo es la actividad agrícola por lo que se requiere conocer las características óptimas para el desarrollo adecuado de este cultivo fuera de las áreas de denominación DOT ya que la producción de éstas únicamente es destinada a la producción del Tequila.

A continuación se analizan las variables principales que intervienen para la adecuada selección de áreas para la producción del agave *Tequilana Weber*, dentro de las cuales se encuentran la temperatura nocturna, probabilidad de heladas, altitud, pendiente del suelo y precipitación anual.

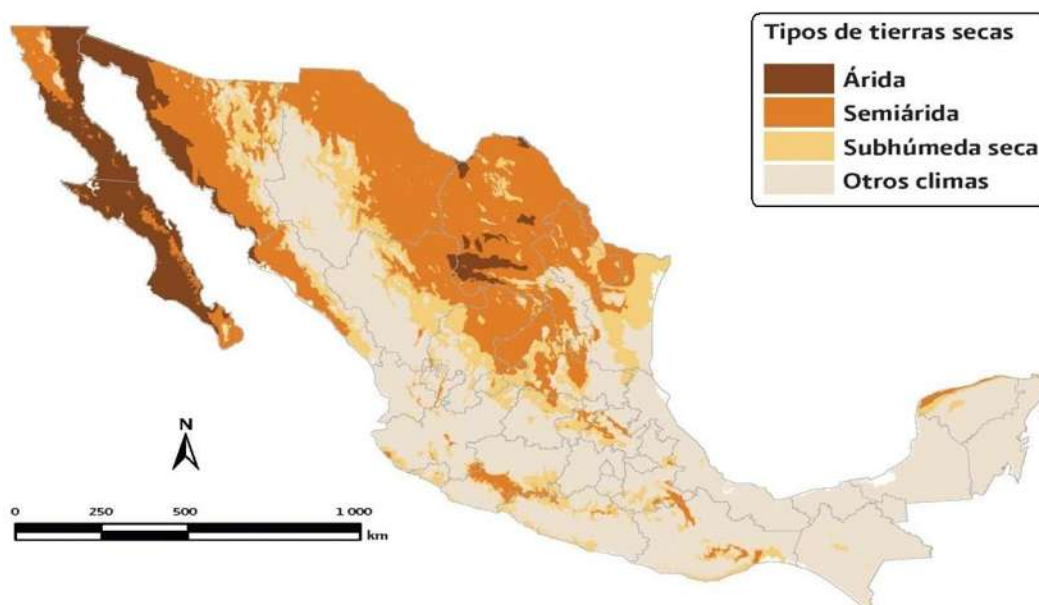
## **4.9 DISTRIBUCIÓN Y ADAPTACIÓN CLIMÁTICA**

El agave *Tequilana Weber* es una planta que tiene una alta capacidad de adaptación a las regiones subtropicales, semiáridas y subhúmedas con sequías frecuentes, y condiciones térmicas que van desde templado, semicálido a cálido. Con cierta preferencia por los suelos de textura media como los franco-arcillosos o los franco-arenosos. Lo que proporciona las condiciones ideales para el cultivo agave, el cual presenta una alta susceptibilidad a temperaturas nocturnas bajas, debido a su metabolismo ácido crasuláceo de tal manera que ésta variable es crucial para la adaptación y productividad de esta especie así como para la identificación de áreas con potencial para su cultivo.

A continuación se da una descripción de los factores principales que integran las regiones antes mencionadas:

### **4.9.1 REGIÓN SEMIÁRIDA**

Se considera como región semiárida aquella zona cuya precipitación pluvial varía de 350 a 600 mm anuales, presenta una temperatura media anual de 18°C a 25°C, con un periodo de sequía de seis a ocho meses y una cobertura vegetal por unidad de área mayor del 70%. El territorio nacional presenta extensas regiones de zonas áridas y semiáridas que cubren el 54.3% de su superficie total; donde de los 32 estados que integran el territorio nacional 25 de ellos presentan porciones áridas Figura 24, ya sea en mayor o menor proporción.



**Figura 24** Regiones áridas y semiáridas de la República Mexicana

La distribución de las lluvias en estas zonas obedece principalmente a la localización de la Sierra Madre Oriental así como a las Serranías Meridionales que se distribuyen de forma aislada en el norte del país; el efecto de estas elevaciones provoca lo que se conoce como “sombra orográfica” donde la precipitación pluvial no sólo es escasa y errática sino que también el viento es secante, evaporando rápidamente la poca humedad contenida en el suelo y la vegetación existente, aunado a ello la presencia de suelos con fuertes pendientes, arenosos o erosionados no permite la retención de agua, provocando que el índice de humedad que presentan las zonas semiáridas sea de -40 a -20.

- **DISTRIBUCIÓN DE LAS ZONAS SEMIÁRIDAS**

Dentro de las zonas semiáridas del país las que presentan precipitaciones pluviales iguales o superiores a la evapotranspiración potencial durante periodos de 30 a 119 días, es decir, de 270 a 560 mm anuales son las regiones que limitan con el clima árido en el norte del altiplano, las que se encuentran en la base de la Sierra Madre Occidental en Sonora y Baja California, siendo predominante en la planicie costera del Golfo. En el sur, con la

cuenca baja del río Tepalcatepec, en Michoacán; así como en algunas porciones del valle de Tehuacán-Cuicatlán, en la cuenca alta del río Tehuantepec y una franja angosta en la península de Yucatán.

Mientras que para las regiones que limitan con los climas sub-húmedos como lo son la planicie costera de Tamaulipas; laderas bajas de barlovento de la Sierra Madre Occidental en los estados de Sonora y Sinaloa; así como partes bajas de la Mesa Central (Guanajuato Querétaro e Hidalgo); los valles de San Juan en Puebla y Perote en Veracruz, gran parte de los valles centrales de Oaxaca; la cuenca del Balsas (Guerrero, Michoacán y Puebla); pequeñas áreas costeras de Jalisco y Colima así como una pequeña franja al noroeste de la península de Yucatán reciben entre 340 y 792 mm de precipitación con un periodo de sequía que varía entre ocho y diez meses.

El principal problema que se presenta en esta región para el cultivo del agave se debe a que en estas regiones no se encuentran nubes esto aunado al aire seco que se presenta permite que el terreno y la atmosfera se calienten mucho durante el día, cuando este calor se irradia hacia la atmosfera después de la puesta de sol se produce un agudo enfriamiento nocturno e incluso heladas en invierno.

- **TIPO DE SUELOS EN LAS REGIONES SEMIÁRIDAS**

El tipo de suelos que existen en las regiones semiáridas son conocidos como xerosoles y aridisoles. Sin embargo, la presencia de la gran variedad de sustratos geológicos, característicos del relieve y condiciones climáticas locales, ha propiciado la existencia de diversos tipos de suelos en esta región que varían de acuerdo a la profundidad, acidez y fertilidad. Los cuáles de manera general puede clasificárseles como arenosos o arcillosos

En la zona costera de Sonora y Baja California, así como en las lagunas costeras y terrenos bajos sujetos a inundaciones periódicas por las aguas marinas, predominan los suelos sódico-salinos, que en tiempos de estiaje dan lugar a formación de costras de cloruro de

sodio NaCl. En el norte de Sonora las dunas de sílice ocupan gran extensión, mientras que en la costa del Golfo de California son frecuentes las dunas móviles (Flores y Valdés, 1988).

En los estados de Zacatecas y San Luis Potosí se encuentra capas de acumulación de carbonato de calcio cuya profundidad y espesor varía de unos milímetros hasta los 40 cm, aunque los grandes valles pueden alcanzar profundidades de 230 m con espesores de 90 m; éste horizonte corresponde a los suelos calcimórficos que son cementados con sílice por lo que reciben el nombre de duripán. También se tienen en ciertas regiones de los estados de Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Durango, Coahuila, Chihuahua y Tamaulipas suelos llamados phaeozem y duripán este tipo de suelos se caracterizan por su alto nivel de fertilidad; cuando éstos son más profundos y existe traslocación de partículas se forman los vertisoles, que son suelos pesados arcillosos de alta productividad y manejo difícil (Flores, 1974:50-64). La geomorfología de muchas regiones semiáridas permite la creación de suelos con alto contenido de sales solubles debido a la existencia de bolsones y cuencas cerradas que propician su acumulación. Ya que las sales son arrastradas por el agua a las partes bajas y, al no ser drenadas hacia el mar éstas se estancan y se acumulan. Éste fenómeno se ve agravado debido a los altos niveles de evaporación ocasionados por las elevadas temperaturas.

Los procesos abrasivos de los chubascos característicos de las zonas semiáridas originan el arrastre de materiales aluviales que, cuando se ponen en contacto con los coluviales dan origen a los suelos conocidos como, fluvisoles, los cuales se constituyen por partículas estratificadas de diferentes formas y tamaños. Los cuales son fáciles encontrar en la zona carbonífera de Coahuila y en la región Lagunera puesto que abundan en esas regiones aunque también es posible encontrarlos en la cuenca del río Atoyac, así como en la del Balsas y en algunas porciones de las zonas semiáridas de Oaxaca, Puebla, Veracruz y el Bajío; en las partes altas de los lomeríos predominan los regosoles y en las bajas se encuentran los litosoles, esto debido a la acumulación de materiales aluviales y coluviales. Mientras que en los fondos de los valles gracias a que las condiciones microclimáticas y el

relieve son más adecuados se encuentran suelos arcillosos profundos, de color oscuro, que presentan un alto contenido de materia orgánica este tipo de suelo pertenece a los vertisoles; dadas sus características este tipo de suelo es altamente productivo si se le da el manejo adecuado. Por otro lado los suelos pertenecientes a la porción noroeste de la península de Yucatán son suelos calcimórficos, con una coloración que va desde café oscuro a gris oscuro, son suelos muy someros, rocosos y de baja a moderada productividad.

- **RECURSOS HÍDRICOS**

Los ríos de las regiones semiáridas de México drenan la mayor parte del territorio nacional es decir, más del 60%, aunque éstos aportan apenas un poco más del 21% del caudal hidrológico total del país. Sus escurrimientos medios anuales registran grandes variaciones de un año a otro y sus caudales se reducen durante varios meses del año hasta que llegan prácticamente a ser nulos durante largos periodos. Los recursos hídricos del país se han clasificado en trece zonas hidráulicas de acuerdo a la Comisión Nacional del Agua (CNA) Figura 25. Las cuáles se organizan en tres grupos: la vertiente pacífica, vertiente del Golfo y cuencas cerradas. De acuerdo a dicha clasificación las cuencas que irrigan las zonas semiáridas de la vertiente pacífica corresponden a las siguientes:

- Las corrientes de la **región de la Península de Baja California**, tienen una reducida potencialidad de escurrimiento y régimen errático y efímero. Las aportaciones medias anuales de estos ríos registran fuertes variaciones de un año a otro llegando a permanecer secos durante períodos de varios años. La península se encuentra desvinculada del continente, a excepción del delta del río Colorado que se incorpora a la región hidráulica noroeste. Entre los principales ríos pueden mencionarse el río Tijuana en Baja California y el Santo Domingo, en Baja California Sur.
- La **región Alto noroeste** se extiende entre los parteaguas de la Sierra Madre Occidental y el litoral del Océano Pacífico, la limita al norte de la frontera con

Estados Unidos y al sur, el parteaguas entre los ríos Ameca y Santiago. A esta región le pertenecen los ríos Colorado, Yaqui y Mayo, con regímenes erráticos e intermitentes caracterizados por caudales de estiaje muy pequeños e incluso nulos, y grandes avenidas en verano e invierno, producidas por ciclones tropicales y frentes polares.

- A la **región Noroeste bajo** corresponde la cuenca del río Fuerte, que irriga parte de la Sierra Tarahumara y zona semiárida de Sinaloa, donde se desarrollan importantes actividades agrícolas y ganaderas.
- La **región Lerma-Santiago** se ubica en el Altiplano Meridional y comprende gran parte del sistema Lerma-Chapala-Santiago; las cuencas cerradas de los lagos de Cuitzeo, Pátzcuaro, Zirahuén y otros; la subcuenca del río Tula, que pertenece a la cuenca del río Pánuco; la cuenca del valle de México; los valles de Oriental, Libres y el Seco; y la parte alta de la cuenca del río Tecolutla. Debido a los regímenes erráticos e intermitentes de sus ríos, el caudal de esta región está regulado por medio de numerosas presas destinadas a la protección contra inundaciones, riego agrícola abastecimiento a centros de población y generación de energía eléctrica.
- La gran cuenca del Balsas corresponde a la **región del Pacífico centro**. Se ubica en la depresión del mismo nombre, entre el Sistema Volcánico Transversal, la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre del Sur. El río Balsas tiene una reducida potencialidad de escurrimiento, con régimen errático e intermitente, caracterizado por la presencia de intensas inundaciones en los meses de verano y pequeños gastos de estiaje. Drena porciones semiáridas de Puebla, Guerrero y Michoacán.

Por otro lado en la vertiente del Golfo de México, las zonas áridas se encuentran incluidas en dos regiones hidráulicas:

- La **región Frontera norte** corresponde a la gran cuenca del río Bravo y sus afluentes mexicanos, de régimen errático e intermitente, presenta grandes avenidas de origen ciclónico durante el verano, utilizadas para alimentar a las presa de almacenamiento que permiten optimizar al máximo el caudal hidrológico de la cuenca. Su importancia radica en ser límite fronterizo con Estados Unidos Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y la parte norte del estado de Tamaulipas.
- Dentro de la región hidráulica **Golfo Norte** destacan las cuencas de los ríos San Fernando y Soto La Marina, cuyos gastos están influenciados por los ciclones tropicales y los nortes invernales, lo cual ha permitido el desarrollo de las actividades agrícolas y ganaderas de la región.
- El **noroeste de la Península de Yucatán**, como toda ella, carece de corrientes superficiales permanentes y las precipitaciones son más escasas que en el resto de la península, lo cual provoca las condiciones de aridez.

La región cuencas cerradas abarca gran parte del Altiplano septentrional y parte del meridional, correspondiente a las cuencas cerradas de chihuahua, el Bolsón de Mapimi, El Salado y las cuencas cerradas de los ríos Nazas y Aguanaval, entre otras. Las corrientes de los ríos de esta región son de régimen errático, torrencial e intermitente, se caracterizan por las grandes variaciones en los volúmenes anuales que aportan; la concentración de los escurrimientos en unos cuantos meses del año, periodos secos de varios años de duración y gastos de estiaje nulos. Estos ríos están sobre explotados y representan la única fuente de abastecimiento de agua de una vasta zona árida. Sólo pueden aprovecharse por medio de presas que permiten captar, conservar y aprovechar el agua por períodos de varios años.



**Figura 25** Regiones hidrológicas de la República Mexicana (Tomada de la FAO)

En estas regiones de apariencia inhóspita, subsiste una gran cantidad y variedad de especies vegetales que han pasado por diversos, complejos y fascinantes procesos de adaptación que les han permitido sobrevivir en un ambiente hostil, como es el caso de las plantas de la familia agavácea que se encuentran plenamente adaptadas a los ambientes semiáridos pues presentan mecanismos que les han permitido sobrevivir en ambientes con graves restricciones ecológicas, estas plantas conservan una reserva de agua que es almacenada en hojas y tallos. Aunque también se les puede encontrar en otros hábitats más benignos como en las regiones sub-húmedas.

#### 4.9.2 REGIÓN SUBHÚMEDA

Dentro de las regiones subhúmedas podemos encontrar dos tipos de clima con este rango de humedad; la región tropical subhúmeda y la región templada subhúmeda. Que cubren 73 millones de Ha. del territorio nacional donde 40 millones de Ha. corresponden a la zona tropical subhúmeda mientras que los 33 millones de ha restantes pertenecen a un clima templado subhúmedo.

- **DISTRIBUCIÓN REGIÓN SUBHÚMEDA**

La primera de ellas la zona tropical subhúmeda, cubre el 17.5% del territorio nacional cuya distribución geográfica se extiende sobre 32.5 millones de Ha., en un total de 578 municipios donde el 75% o más de sus territorios se encuentran en esta; que comprende 21 de los 32 estados. La zona tropical subhúmeda cubre importantes porciones de la Planicie Costera del Pacífico, desde el río Suchiate hasta cerca del paralelo 24° Norte, entrando al interior del país y ocupando grandes áreas de la parte media y baja de la cuenca del río Balsas, la mayor parte de la península de Yucatán excepto la pequeña faja costera del noroeste, en la vertiente del Golfo, tiene muy poca presencia únicamente a partir de la sierra de San Martín hasta las intermediaciones del paralelo que pasa por Soto la Marina; el valle centro en el centro de Veracruz en un área situada entre Nautla, Alvarado, Jalapa y tierra Blanca, sin llegar a ninguna de estas poblaciones, pero incluyendo las inmediaciones del puerto de Veracruz, el sur de Tamaulipas, sureste de San Luis Potosí, extremo norte de Veracruz y extremo noreste de Querétaro, comprendiendo una parte de “La Huasteca”, con una porción Noroeste de la Sierra Madre de Chiapas y la vertiente marina de esta serranía así como el occidente y sur de México. En el extremo sur de Baja California existe un manchón aislado que se localiza en las partes inferiores y medias de las Sierras de la laguna y Giganta.

Es una zona que se desarrolla en México entre los 0 y 1900 msnm más frecuentemente por debajo de la cota de 1 500 msnm. Mientras que en los declives del Golfo de México excepto por la Depresión Central de Chiapas no se le ha observado por arriba de los 800 msnm. Un factor primordial que caracteriza a estas zonas es la temperatura en especial la mínima extrema, que en general no es menor de 0°C. Siendo la temperatura media anual del orden de 20 a 29°C, donde en algunas depresiones interiores es más alta.

Se caracteriza por tener un clima cálido en algunos sitios seco, con una distribución de humedad desigual a lo largo del año, ya que se divide éste en dos estaciones muy definidas la lluviosa y la seca. El periodo de sequía abarca de entre 5 a 8 meses consecutivos con lo

cual se da una idea de lo acentuado de la aridez entre los meses de Diciembre y Mayo. El periodo de lluvias se localiza en los meses de verano, con una precipitación pluvial igual o superior a la evapotranspiración potencial durante periodos de 120 a 180 días, es decir, el monto de precipitación pluvial anual varía entre 300 y 1800 mm, más frecuentemente entre 600 y 1200 mm.

Por otro lado la región templada subhúmeda corresponde al 19.7% del territorio nacional, esta zona abarca más de 1000 municipios de 20 estados. Pues se distribuye a lo largo de las grandes cadenas montañosas del país, es decir, la Sierra Madre Oriental incluye el Bajío, el sureste de la Sierra de Zacatecas, el Valle de Toluca, la cuenca de México, parte del sureste de Hidalgo, suroeste de Puebla, la región Mixteca, Sierra de Oaxaca La Faja Volcánica Transmexicana, Sierra madre del Sur, así como las Sierras de Chiapas, Oaxaca y Baja California. El clima de estas zonas presenta una temporada de lluvias bien definida de 4 a 6 meses, durante el cual se cubren completamente los requerimientos de las plantas. Durante la época seca es importante el déficit de humedad, condición por la cual las plantas perennes normalmente pierden sus hojas. La precipitación media anual en estas zonas del norte y centro del país es superior a los 700 mm y en las regiones del sur llegan a ser superiores a los 1100 mm, donde la precipitación orográfica aumenta en verano debido a los movimientos convectivos del aire y por la influencia de los ciclones tropicales. Con una evapotranspiración que va de 600 a 1500mm, siendo la temperatura media anual de 11 a 25°C. En este tipo de clima las heladas son una constante que se presenta cada año, donde la temperatura del mes más frío es ligeramente superior a los 0°C

- **TIPOS DE SUELOS EN LA REGIÓN SUBHÚMEDA**

Generalmente esta zona se encuentra en lomeríos y laderas con suelos someros y pedregosos, en algunos casos suelos profundos con un drenaje deficiente. En su mayoría los suelos son pardos, con un humus que se mineraliza con bastante rapidez (mull o moder) el nombre científico para describir a este tipo de suelos corresponde a Mollisol, este tipo presenta un horizonte superficial blando es rico en materia orgánica y espeso. Presenta la

humedad suficiente y buena aireación gracias a la gran cantidad de gusanos de tierra que suelen contener. Por todo ello estos suelos son particularmente favorables para la vegetación; además de que durante la estación fría sólo se hielan en la capa más superficial.

En cuanto a los demás tipos de suelo que se pueden encontrar, se tienen demasiadas características variables pues las texturas pueden variar de arcilla arena, el pH de ácido a ligeramente alcalino, pueden ser pobres o ricos en materia orgánica e ir de colores claros a oscuros, rojizos, amarillentos, grisáceos, cafés o negros. En general este tipo de suelos son muy bien drenados y por lo común jóvenes con características derivadas de la roca madre, que puede ser tanto ígnea, como metamórfica y en pocas ocasiones sedimentaria marina.

- **RECURSOS HÍDRICOS**



**Figura 26** Aguas superficiales de la República Mexicana

El característico relieve de las zonas templadas con grandes cadenas montañosas muy cerca de la costa y grandes cuencas endorreicas, hace que los ríos sean en general cortos. Dos de las cuencas más importantes del país debido a su humedad pasan por la región subhúmeda las correspondientes a la cuenca del Papaloapan y la costa de Chiapas. A continuación se da una descripción de los ríos

más importantes de la región subhúmeda.

- El río Lerma o Grande de Santiago, es el segundo río más largo del México con (1270 km de longitud, nace en los manantiales de Almoloya del Río, en el estado de México, atraviesa el Valle de Toluca y desemboca en el océano Pacífico.

- El río Balsas es una fuente hídrica muy importante cuya longitud es de 771 km. Este río nace tras la confluencia de los ríos San Martín y Zahuapan, en el estado de Puebla. Haciendo frontera entre los estados de Guerrero y Michoacán desembocando en el Océano Pacífico.
- Una parte del río Grijalva alimenta a la zona ya que este tiene una longitud aproximada de 600 km que nace en el estado de Chiapas y recorre Tabasco antes de desembocar en el Golfo de México.

Únicamente se mencionaron los ríos con mayor importancia dado su abundante caudal, son obstante en la Figura 26 se puede observar la riqueza hidrológica que posee la región subhúmeda.

La Tabla XVI muestra de manera general las características climáticas presentes en la República Mexicana por entidad federativa.

**Tabla XVI** Características climáticas por entidad federativa

| PRINCIPALES TIPOS DE CLIMAS, RANGOS DE TEMPERATURA<br>MEDIA ANUAL Y DE PRECIPITACIÓN TOTAL ANUAL<br>POR ENTIDAD FEDERATIVA |                                             |                                                |                                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| ENTIDAD<br>FEDERATIVA                                                                                                      | TIPO DE CLIMA                               | RANGO DE<br>TEMPERATURA<br>MEDIA ANUAL<br>(°C) | RANGO DE<br>PRECIPITACIÓN<br>TOTAL ANUAL<br>(mm) |
| 1. Aguascalientes                                                                                                          | <i>Semiárido</i>                            | 10 a 18                                        | 300 a 600                                        |
| 2. Baja California                                                                                                         | <i>Semiárido, Árido</i>                     | 10 a 26                                        | 0 a 300                                          |
| 3. Baja California Sur                                                                                                     | <i>Semiárido, Árido</i>                     | 18 a 26                                        | 0 a 600                                          |
| 4. Campeche                                                                                                                | <i>Cálido subhúmedo</i>                     | más de 26                                      | 1 000 a 2 000                                    |
| 5. Coahuila de Zaragoza                                                                                                    | <i>Semiárido, Árido</i>                     | 10 a 26                                        | 100 a 600                                        |
| 6. Colima                                                                                                                  | <i>Cálido subhúmedo</i>                     | 22 a 26 y más                                  | 600 a 2 000                                      |
| 7. Chiapas                                                                                                                 | <i>Cálido húmedo,<br/>Cálido subhúmedo,</i> | 10 a más de 26                                 | 1 000 a más de 4 000                             |

|                                |                                                                                                                                |                  |                    |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|--------------------|
|                                | Templado húmedo,<br><i>Templado subhúmedo</i>                                                                                  |                  |                    |
|                                | <i>Templado subhúmedo,</i>                                                                                                     |                  |                    |
| <b>8. Chihuahua</b>            | <i>Semiárido</i>                                                                                                               | menos de 10 a 22 | 100 a 2 000        |
|                                | <i>Árido</i>                                                                                                                   |                  |                    |
| <b>9. Distrito Federal</b>     | <i>Templado subhúmedo</i>                                                                                                      | 10 a 18          | 600 a 2 000        |
| <b>10. Durango</b>             | <i>Templado subhúmedo,</i><br><i>Semiárido</i>                                                                                 | menos de 10 a 22 | 300 a 2 000        |
| <b>11. Guanajuato</b>          | <i>Templado subhúmedo,</i><br><i>Árido</i>                                                                                     | 10 a 22          | 300 a 1 000        |
| <b>12. Guerrero</b>            | <i>Cálido subhúmedo,</i><br><i>Templado subhúmedo,</i><br><i>Semiárido</i>                                                     | 10 a más de 26   | 600 a 2 000        |
| <b>13. Hidalgo</b>             | <i>Templado húmedo,</i><br><i>Templado subhúmedo,</i><br><i>Semiárido</i>                                                      | 18 a 22          | 600 a 4 000        |
| <b>14. Jalisco</b>             | <i>Cálido subhúmedo,</i><br><i>Templado subhúmedo,</i><br><i>Semiárido</i>                                                     | 10 a más de 26   | 300 a 2 000        |
| <b>15. México</b>              | <i>Cálido subhúmedo,</i><br><i>Templado subhúmedo</i>                                                                          | menos de 10 a 26 | 600 a 2 000        |
| <b>16. Michoacán de Ocampo</b> | <i>Cálido subhúmedo,</i><br><i>Templado subhúmedo,</i><br><i>Semiárido</i>                                                     | 10 a más de 26   | 300 a 2 000        |
| <b>17. Morelos</b>             | <i>Cálido subhúmedo,</i><br><i>Templado subhúmedo</i>                                                                          | 10 a 26          | 1 000 a 2 000      |
| <b>18. Nayarit</b>             | <i>Cálido subhúmedo</i>                                                                                                        | 18 a más de 26   | 1 000 a 2 000      |
| <b>19. Nuevo León</b>          | <i>Templado subhúmedo,</i><br><i>Semiárido</i>                                                                                 | 10 a 26          | 600 a 1 000        |
| <b>20. Oaxaca</b>              | <i>Cálido húmedo,</i><br><i>Cálido subhúmedo,</i><br><i>Templado húmedo,</i><br><i>Templado subhúmedo,</i><br><i>Semiárido</i> | 10 a más de 26   | 300 a más de 4 000 |
| <b>21. Puebla</b>              | <i>Cálido húmedo,</i><br><i>Cálido subhúmedo,</i><br><i>Templado húmedo,</i><br><i>Templado subhúmedo,</i>                     | 10 a 26          | 300 a 4 000        |

|                                                               | <i>Semiárido</i>                                                 |                  |                      |
|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------|----------------------|
| 22. Querétaro de Arteaga                                      | <i>Templado subhúmedo,<br/>Semiárido</i>                         | 10 a 22          | 300 a 1 000          |
| 23. Quintana Roo                                              | <i>Cálido subhúmedo</i>                                          | 22 a más de 26   | 1 000 a 2 000        |
| 24. San Luis Potosí                                           | <i>Templado húmedo,<br/>Templado subhúmedo,<br/>Semiárido</i>    | 10 a 22          | 300 a 4 000          |
| 25. Sinaloa                                                   | <i>Cálido subhúmedo,<br/>Semiárido<br/>Árido</i>                 | 18 a 26          | 300 a 2 000          |
| 26. Sonora                                                    | <i>Semiárido<br/>Árido</i>                                       | 10 a 26          | 0 a 600              |
| 27. Tabasco                                                   | <i>Cálido húmedo</i>                                             | más de 26        | 2 000 a más de 4 000 |
| 28. Tamaulipas                                                | <i>Cálido subhúmedo,<br/>Templado subhúmedo,<br/>Semiárido</i>   | 18 a 26          | 300 a 2 000          |
| 29. Tlaxcala                                                  | <i>Templado subhúmedo,<br/>Árido</i>                             | menos de 10 a 18 | 300 a 1 000          |
| 30. Veracruz-Llave                                            | <i>Cálido húmedo,<br/>Cálido subhúmedo,<br/>Templado húmedo,</i> | 10 a 26          | 1 000 a 4 000        |
| 31. Yucatán                                                   | <i>Cálido subhúmedo</i>                                          | 22 a 26 y más    | 300 a 2 000          |
| 32. Zacatecas                                                 | <i>Templado subhúmedo,<br/>Semiárido</i>                         | 10 a 22          | 300 a 1 000          |
| FUENTE: INEGI. Datos Básicos de la Geografía de México, 2013. |                                                                  |                  |                      |

Para la identificación de áreas potenciales para el cultivo del agave *Tequilana Weber* se da a continuación una descripción de los factores que intervienen en la selección:

#### 4.10 ALTITUD

El agave *Tequilana Weber* tiene la ventaja de adaptarse a un amplio rango altitudinal, sin embargo se ha observado que le favorece un intervalo que va desde los 1 000 a los 2 200 msnm (Ruíz *et al.*, 1999; Vargas, 2004). Mientras que en altitudes inferiores a los 1 000 m, el desarrollo inicial del cultivo resulta ser rápido y prometedor, de tal manera que los sitios con estas características tienen potencial para la producción de

planta. Sin embargo, no ocurre así para la producción de la «piña», ya que ésta, aunque puede adquirir un volumen considerable, generalmente y bajo un manejo convencional, no adquiere las características deseables y requeridas para la producción del bioetanol, debido a que la concentración de azúcares que se logra es baja. Por otro lado en altitudes superiores a 2 200 msnm, la velocidad de desarrollo del cultivo se reduce significativamente y el riesgo de daño por bajas temperaturas y/o heladas se incrementa de manera significativa (Ruiz *et al.*, 2003a; Vargas, 2004)

#### 4.11 PRECIPITACIÓN, HUMEDAD AMBIENTAL Y DEL SUELO

Bajo un régimen de precipitación anual de 700 a 1 000 mm y una atmósfera de seca a moderadamente seca la mayor parte del año el agave prospera (Ruiz *et al.*, 1999). Sin embargo, (Vargas, 2004) señala un intervalo óptimo de lluvia acumulada anual de 600 a 1 800 mm, para el desarrollo óptimo de la. Por otro lado las regiones productoras más importantes de la planta se encuentran ubicadas en el estado de Jalisco, México en donde la precipitación anual va de 700 a 1 100 mm (Ruiz *et al.*, 1997b; Ruiz *et al.*, 1998; Flores *et al.*, 2003; Ruiz *et al.*, 2003b).

Este dato resulta prometedor y relevante para la selección de las áreas potenciales en las regiones semiáridas ya que éstas poseen precipitaciones alrededor de los 700 mm. Con lo cual se garantiza tomando únicamente este aspecto climático la producción de *A. Tequilana Weber* en esas tierras.

En invierno la humedad del suelo es baja, sin embargo la planta de agave mantiene la ganancia de carbono durante este periodo, gracias a su fisiología CAM la succulencia de sus órganos fotosintéticos le permite mantener turgente el tejido fotosintético durante periodos de baja disponibilidad de agua. (Gibson y Nobel, 1986; Nobel, 1994; Pimienta *et al.*, 2000). De acuerdo a lo reportado por Flores *et al.* (2002) las características ambientales que son asociadas con un riesgo de presencia de marchitez para el agave son la presencia de una

---

humedad relativa promedio mensual de 60% o más alta y una temperatura promedio anual de 20 a 23.9°C

#### 4.12 TEMPERATURA

Como ya se había mencionado anteriormente el *A. Tequilana Weber* es una planta que tiene una pobre tolerancia a las bajas temperaturas, en comparación con las demás especies que pertenecen a la familia Agavaceae (Nobel y Smith, 1983; Nobel, 1988). Cuando el agave es expuesto a temperaturas de -6°C la absorción celular de la planta se reduce a la mitad. Es por ello que el *A. Tequilana* no se puede cultivar en regiones en donde se pueden presentar temperaturas de -7°C o inferiores. Por otro lado, se sabe que la hoja de esta especie de agave puede llegar a tolerar temperaturas de hasta 55°C (Nobel et al. 1998).

Dado a su tipo fotosintético (CAM) esta planta resulta muy sensible a las temperaturas nocturnas. Aunque la asimilación del CO<sub>2</sub> se favorece con temperaturas diurnas de bajas a moderadas y disminuye drásticamente en ambientes donde las temperaturas nocturnas son elevadas. En estas condiciones también se incrementa la respiración (Nobel et al., 1998; Pimienta et al., 2000)

De acuerdo a lo reportado por (Nobel et al. 1998), se observó experimentalmente que la asimilación neta diaria de CO<sub>2</sub> durante periodos de 24 horas fue mayor en ambientes en donde las temperaturas diurnas y nocturnas fueron de 15°C y de 5°C respectivamente, disminuyendo 10% con temperaturas de 25°C/15°C, y el 72% con temperaturas de 35°C/25°C. de acuerdo a lo anterior el agave *Tequilana Weber* presenta un incremento fraccional de la respiración por cada incremento de 10°C en la temperatura de 2.17 al pasar de 5 a 15°C, un incremento de 2.55 al pasar de 15 a 25°C y 2.68 al pasar de 25 a 36°C. (Vargas, 2004) en su publicación realiza los datos de temperatura nocturna y asimilación neta de CO<sub>2</sub> reportados por (Pimienta et al.1999), obtuvo que la relación entre estas dos variables describía una relación curvilínea, la cual podía ser descrita por una ecuación cuadrática, estableciendo como variable independiente a la temperatura nocturna y como

variable dependiente a la asimilación neta de CO<sub>2</sub>. La ecuación que se obtuvo es la siguiente:

$$\text{Asimilación Neta de CO}_2 = 0.989589 + 1.126854T_n - 0.035244 T_n^2$$

Dónde: La asimilación neta de CO<sub>2</sub> se expresa en  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  y  $T_n$  es la temperatura nocturna en grados Celsius.

En el estudio se reporta que la temperatura nocturna óptima se encuentra alrededor de 16°C, esto es el nivel de temperatura nocturna con el que se logra la máxima asimilación neta de CO<sub>2</sub>. También se aprecia el límite térmico nocturno inferior -1°C y un límite térmico máximo, el cual no se obtuvo bajo experimentación pero que por deducción gráfica corresponde de entre 26 a 30°C. De lo anterior se deduce que una asimilación neta positiva en el agave *Tequilana Weber*, tiene lugar cuando la temperatura nocturna se encuentra entre -1 y 28°C.

#### 4.13 LUZ

El agave *Tequilana Weber* se desarrolla mejor cuando se encuentra expuesto a días soleados la mayor parte del tiempo, lo cual significa que éste tendrá un mejor comportamiento en áreas en donde el periodo de lluvias no sea muy prolongado. Por otro lado, aunque la cantidad de luz, expresada en flujo de fotones fotosintéticos, constituye un factor ambiental limitante para la fotosíntesis en plantas con fisiología CAM de acuerdo a (Gibson y Nobel, 1986), la evaluación estacional de la actividad fotosintética de agave *Tequilana*, ha revelado que la obtención de valores fotosintéticos altos depende más de la temperatura nocturna que de la disponibilidad de luz (Pimienta *et al.*, 1999).

#### 4.14 SUELO

Los agaves prefieren suelos de textura media, como lo son los suelos francos, franco-arenosos o franco-arcillosos. Aunque en zonas con baja precipitación, los agaves prefieren suelos con mayor retención de humedad, es decir, suelos de textura pesada, como arcillosos o limo-arcillosos, pero pueden desarrollarse adecuadamente en suelos delgados o profundos. Además, el género agave presenta tolerancia de ligera a intermedia a sales y prospera mejor en un rango de pH de 6.0 a 8.0; y no son recomendables suelos con problemas de acidez o alcalinidad para su cultivo (FAO, 1994).



**Figura 27** Tipos de suelos de la República Mexicana

El agave puede desarrollarse en terrenos con alto grado de pendiente, con drenaje superficial muy eficiente, considerados no aptos para la agricultura tradicional. Sin embargo, bajo esas condiciones, es necesario realizar prácticas de conservación de suelo y agua para asegurar un ambiente favorable para el cultivo. En la actualidad, dentro de los requisitos para

cultivar agave que fijan las compañías tequileras, se establece un límite máximo de pendiente del suelo de 8 por ciento, para facilitar el manejo de este cultivo. En cuanto al límite inferior de pendiente, cabe mencionar que en terrenos planos se corre el riesgo de tener problemas de encharcamiento, lo cual es perjudicial para el cultivo. Los agaves requieren suelos con drenaje de bueno a excelente (FAO, 1994), de ahí que no es conveniente cultivar agave en terrenos con pendiente inferior a 2 por ciento. Con esto además, se evitaría que el agave desplace de manera significativa otros cultivos que actualmente ocupan las tierras de primera calidad en las diversas regiones agrícolas de las zonas de denominación de origen del país. Dado que el *agave Tequilana Weber* frecuentemente se cultiva en terrenos de ladera, es conveniente procurar no plantar en

terrenos de ladera norte, sobre todo en regiones donde las heladas de tipo advectivo son frecuentes Figura 27. En regiones con altitud superior a 1,800-2,000 msnm, tampoco se recomienda plantar agave en las partes bajas de las laderas, donde comúnmente, se presentan asentamientos de aire muy frío (Ruiz *et al.*, 1999).

#### **4.15 DETERMINACIÓN DE ÁREAS CON POTENCIAL PARA CULTIVAR AGAVE TEQUILANA WEBER**

Realizar la determinación de las regiones con potencial para establecer el cultivo de agave implica la comparación de las disponibilidades ambientales de las regiones en cuestión con los requerimientos o necesidades agroecológicas del cultivo para su óptimo crecimiento. La identificación de las áreas con potencial, se puede realizar de acuerdo a la (FAO, 1996) considerando las características de suelo, fisiografía y clima, considerando los parámetros definidos en función de los requerimientos agroecológicos del cultivo con los sistemas de manejo bajo los cuales se desarrollan. Sin embargo, existen variables ambientales que son consideradas críticas o de suma importancia para determinar las zonas potenciales. En este caso, la temperatura nocturna resulta ser la variable más limitada del potencial de cultivo, es por ello que se considera a ésta variable la más importante.

En la Tabla XVII se describen las condiciones que se tomaron en cuenta para la identificación de las zonas, como lo son altitud, precipitación, temperatura y pendiente del suelo, estos valores se enfocan hacia la evasión de riesgos ligados a la ocurrencia de heladas y a la localización de zonas con temperaturas tanto diurnas como nocturnas frescas que favorezcan la fotosíntesis del agave *Tequilana*. En cuanto a la pendiente del suelo se emplea un intervalo óptimo de 2 a 8 por ciento, en correspondencia con los criterios establecidos por la industria tequilera para la selección de terrenos adecuados para la plantación.

**Tabla XVII** Potencial agroecológico para el cultivo de *Agave Tequilana Weber*

| <b>Potencial Agroecológico</b> |               |                              |                 |
|--------------------------------|---------------|------------------------------|-----------------|
| <b>Variable</b>                | <b>Óptima</b> | <b>Subóptima</b>             | <b>Marginal</b> |
| Temperatura nocturna (°C)      | 11 a 21       | -1 a 11 y 21 a 28            | <-1 y >28       |
| Probabilidad de Heladas        | < 0.10        |                              | >0.10           |
| Altitud (msnm)                 | 1 000 a 2 200 | 600 a 1 000<br>y 2200 a 2500 | <600 y > 2500   |
| Pendiente del suelo (%)        | 2 a 8         | 1 a 2 y 8 a 45               | <1 y >45        |
| Lluvia anual (mm)              | 600 a 1500    | 1500 a 1800                  | <600 y >1800    |

#### **4.16 AGAVE TEQUILANA WEBER COMO MATERIA PRIMA PARA LA OBTENCION DE BIOETANOL**

La biomasa producida de los residuos industriales y los desechos agrícolas del *agave Tequilana Weber* generados en la producción del tequila muestran un elevado potencial para ser empleados como materia prima en la elaboración de bioetanol no solo debido a su bajo costo y abundancia, sino también a su origen ya que el *agave Tequilana Weber* al pertenecer al género de las agaváceas presenta una fisiología de metabolismo ácido crasulácea (Szarek y Ting, 1977; Szarek, 1979) conocido por sus siglas en inglés como CAM. Las plantas que utilizan el metabolismo CAM recientemente han sido reconocidas como cultivos bioenergéticos potenciales (Smith, 2008; Borland et., al., 2009) debido a que tienen bajos requerimientos de agua por lo que resultan productivas en las regiones semiáridas, ya que asimilan el carbono en la noche lo que disminuye el gradiente difusivo de agua en las hojas y mejora la eficiencia del uso del agua (Nobel, 1994).

El consumo de agua se reduce gracias a que la evapotranspiración potencial (ETP) aumenta exponencialmente con la temperatura y por la apertura de las estomas en condiciones nocturnas frías, es decir, se pierde menos agua por CO<sub>2</sub> asimilado. De lo anterior, se

concluye que cuanto mayor sea la variación de la temperatura diurna, mayor es la ventaja de eficiencia del uso del agua de la fisiología CAM.



**Figura 28** Jima Agave Tequilana Weber

La adaptabilidad de estas plantas a climas extremos gracias a su fisiología hace posible su uso integral, con lo cual no sólo se aprovecharía gran parte del 54.3% del territorio nacional que tiene un carácter de árido o semiárido, sino que también se estaría promoviendo y apoyando el desarrollo del sector agropecuario, todo ello evitando la competencia de tierras con cultivos alimenticios y dado que las regiones con potencial para plantaciones se encuentran

fuera de la región de denominación del tequila la industria tequilera no presentaría riesgo alguno.

Lo anterior plantea un panorama prometedor para el abastecimiento de materia prima Figura 28. Sin embargo, estos no son los únicos beneficios que ofrece emplear plantas con fisiología CAM para la producción de biocombustibles. Como sabemos en los materiales lignocelulósicos, la lignina es el tercer componente mayoritario con hasta un 30% en peso seco (Somerville, 2007), la cual representa uno de los mayores impedimentos para la liberación de los azúcares, proceso que permite la fermentación de celulosa y hemicelulosa para dar origen a los combustibles, puesto que una de sus funciones es proporcionar al xilema la resistencia para soportar tensiones impuestas durante la transpiración. Por lo anterior, la presencia de lignina en estos materiales implica un paso extra para la obtención de los azúcares conocido como pre-tratamiento en el cual se busca romper la estructura de este polímero reticulado, actualmente esta etapa del proceso representa uno de los principales costos económicos en el proceso. Incluso, se ha descrito como el segundo costo unitario más elevado de la producción de etanol lignocelulósico precedido solamente por el costo de las materias primas (Mosier et al., 2005).

Sin embargo en plantas CAM como el agave *Tequilana Weber*, la tensión en el xilema es baja debido a que la transpiración también lo es y por lo tanto se requiere menos lignina. Como resultado, menores cantidades de lignina son evidentes en la composición del tejido de plantas CAM, por ejemplo las hojas de agave tienen entre 3-15% de lignina en peso seco y un 68% de celulosa. (Iñíguez-covarrubias et al., 2001; Santiago et al., 2002, Vieira et al., 2002, Garcia-Reyes & Rangel Mendez 2009). Además de que existe una gran acumulación de carbohidratos no estructurales solubles en el tejido de la planta para apoyar la carboxilación PEPC mediada (Borland et al 2009) la baja cantidad de lignina y alta solubilidad de las reservas de hidratos de carbono en estas plantas implica que se requiere menos energía para su conversión a combustibles lo que nos lleva a tener un costo menor del proceso por lo anterior y gracias a su alto contenido en inulina el agave *Tequilana Weber* puede resultar en una materia prima de gran calidad para la producción de bioetanol (Smith, 2008, Borland et al., 2009)

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 MATERIA PRIMA

Para la realización del presente estudio se emplearon plantas de agave *Tequilana Weber* de entre 7 y 8 años de edad. Cultivadas en el predio “LA NOPALERA” ubicado en el municipio de Arandas Jalisco. La piña y las hojas del agave fueron transportadas a las instalaciones de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo al edificio de Posgrado de Ingeniería Química en Morelia Michoacán.

### 5.2 REACTIVOS

- D (-) Fructosa (Catálogo F-2543, Sigma Aldrich-USA)
- D (-) Xilosa (Catálogo 7665, HYCEL-MEXICO)
- D (-) Manosa (Catálogo 104, HYCEL-MEXICO)
- D (+) Sacarosa (Catálogo 5750, Sigma Aldrich-USA)
- L (+) Arabinosa (Catálogo A-3256, Sigma Aldrich-USA)
- B D (+) Glucosa (Catálogo D-9434, Sigma Aldrich-USA)
- L (+) Tartrato doble de sodio y potasio (Catálogo 6381, Sigma Aldrich-USA)
- Hidróxido de sodio (Catálogo 1310, Sigma Aldrich-USA)
- Ácido 3-5, dinitro-salicílico (Catálogo D-0550, Sigma Aldrich-USA)
- Etanol (Catálogo 6417, Sigma Aldrich-USA)
- $\text{H}_2\text{SO}_4$

### 5.3 EQUIPO

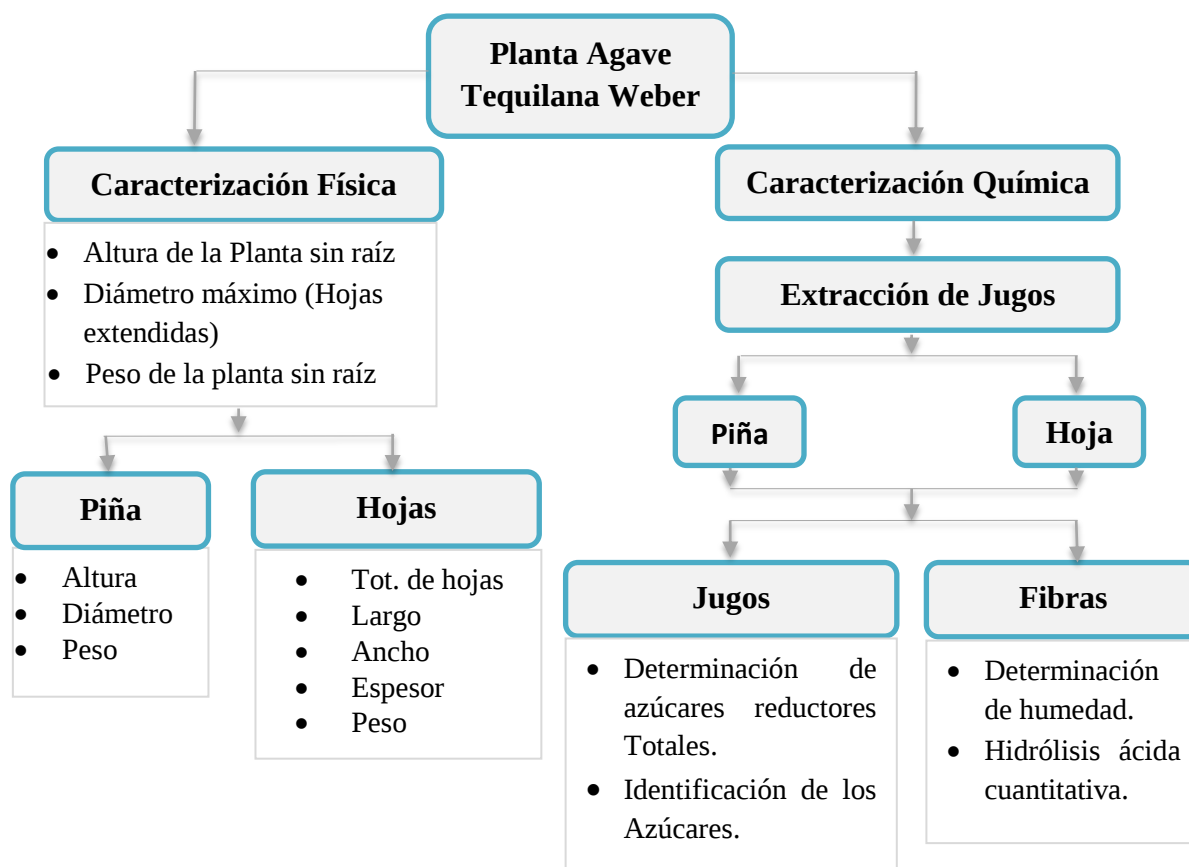
- Balanza analítica, Sartorius modelo BP61S con precisión de  $\pm 1\text{mg}$ .
- Baño maría PolyScience modelo 20L-M; Niles, IL
- Vortex Genie2 Scientific Industries Modelo G-560 N°. Serie 2-397504
- Cromatógrafo de líquidos de alta resolución (HPLC) VARIAN.
- Estufa Felisa FE-291A
- Mufla
- Molino de 4 aspas MAGRITEP
- Prensa tornillo Inventer Duty Motor N°de serie 201082900-100
- Espectrómetro JENWAY modelo 7305 N° de serie: 39883
- Desecador
- Balanza, TORREY modelo FS 250/500 de capacidad  $250\text{ kg} \pm 0.5\text{ kg}$ .
- Autoclave Felisa Modelo FE-399
- Bomba Cromatográfica Cuaternaria VARIAN 350.
- Detector diferencial de índice de refracción VARIAN 800.
- Control de temperatura del HPLC VARIAN
- Automuestreador VARIAN 410.

### 5.4 MÉTODOS

- A. Humedad método 7.005 (AOAC, 1984)
- B. Azúcares reductores totales (ART). Método del ácido 3,5 DNS (miller,1959)
- C. Cromatógrafo HPLC
- D. Hidrólisis Ácida Cuantitativa
- E. Determinación de lignina.



El proceso de caracterización de ambas fracciones de la planta se esquematiza en el diagrama de bloques de la Figura 30.



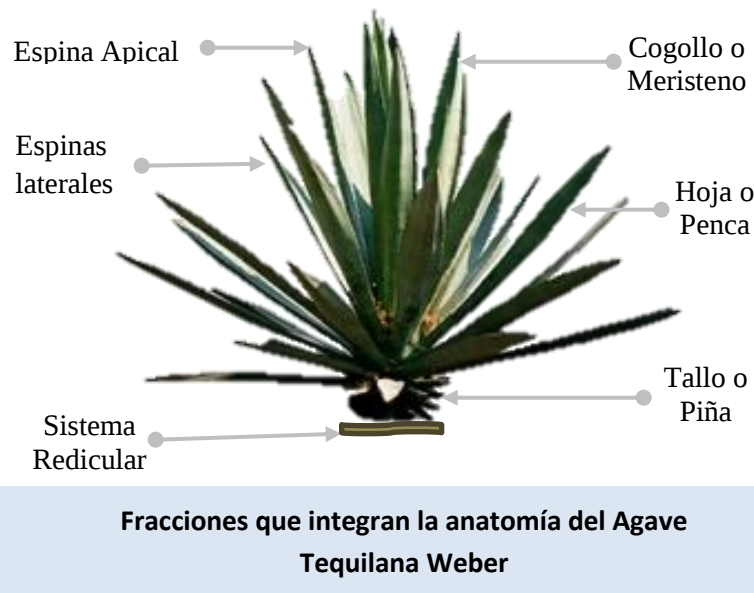
En el diagrama se muestran las actividades realizadas para la determinación física y química de la planta.

**Figura 30** Mapa esquemático de la metodología realizada para la caracterización

## 6. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL AGAVE TEQUILANA WEBER

### 6.1 DESCRIPCIÓN FÍSICA

La parte aérea de la planta está conformada por dos fracciones principales que son las hojas y tallo. El tallo y las bases de las hojas que se unen a él comprenden la porción conocida con el nombre de cabeza o piña (Iñiguez, 2001). En la Figura 31 se muestra de manera general las partes que integran la anatomía de la planta de agave *Tequilana Weber*. La cual goza de ciertas características que la hacen diferente de otros agaves ya que es carnosa en forma de roseta, fibrosa, de color azul o verde grisáceo que es originado por su alto contenido de ceras que impiden que la planta pierda agua. Las hojas son rígidas con espinas marginales y apicales; almacena inulina en el tallo y es productora de fructosa.



**Figura 31** Anatomía del agave *Tequilana Weber*

### 6.2 DETERMINACIÓN DE DIMENSIONES Y PESOS DE LA PLANTA COMPLETA.

En el lugar de origen se determinaron las siguientes propiedades físicas:

- Altura de la planta sin raíz.
- Diámetro máximo tomando en cuenta las hojas extendidas.
- Peso de la planta sin la raíz.

El instrumento de medición empleado para obtener la altura así como el diámetro de la planta fue un flexómetro TRUPER de 10 m  $\pm$  0.5 mm, modelo 27FN-8MEB. La lectura se realizó colocando la planta en una superficie horizontal y con un elemento en la parte superior de la planta, cuya horizontalidad se verificó realizando la medición en cada extremo del elemento para que fuese la misma. Para determinar el peso de la planta se empleó una báscula TORREY modelo FS 250/500 cuya capacidad es de 250 kg  $\pm$  0.5 kg, se realizó el pesaje de la piña de la planta así como de todas sus hojas para determinar el porcentaje de cada una de éstas fracciones en el peso total de la planta.

### **6.3 DETERMINACIÓN DE LAS DIMENSIONES Y PESO DE LA HOJA.**

Las propiedades que se determinaron para las hojas fueron las siguientes:

- Número total de hojas.
- Longitud
- Ancho máximo
- Espesor máximo
- Peso de las hojas

Para obtener la longitud, ancho y espesor se empleó el flexómetro antes mencionado. Los pesos de cada hoja se determinaron en una balanza analítica Sartorius modelo BP61S con precisión de  $\pm$  1mg. Los parámetros mencionados anteriormente se determinaron para 12 hojas, 4 hojas de cada una de las tres plantas que fueron empleadas para este estudio las cuales fueron seleccionadas al azar, de un total de aproximadamente 84 hojas en promedio por planta. Una vez obtenidas las mediciones para las distintas propiedades a evaluar de la planta se obtuvo un valor medio y la desviación estándar, así como se reportaron el valor mínimo y máximo de cada una.

## 7. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL JUGO DEL AGAVE TEQUILANA WEBER

### METODOLOGÍA

Para realizar la caracterización química del jugo de la piña y hojas del agave *Tequilana Weber* se realizaron las siguientes actividades:

- Molienda y extracción del jugo tanto de las hojas y piña del agave *Tequilana Weber*.
- Determinación del porcentaje de azúcares reductores totales presentes en las fracciones de la planta (Hojas y Piña)
- Identificación de los azúcares presentes en las fracciones del agave.

### 7.1 ACONDICIONAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA EXTRACCIÓN DEL JUGO DE AGAVE TEQUILANA WEBER



**Figura 32** Equipo empleado para la extracción de los jugos

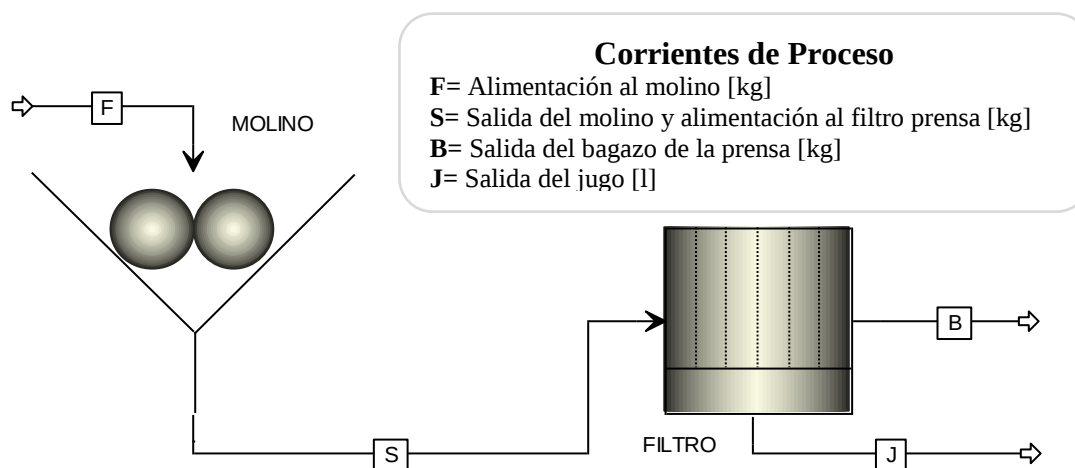
Para obtener el jugo de la planta, las piñas fueron trozadas en cuatro partes por medio de hachas con el fin de proporcionar el tamaño adecuado para la banda transportadora del molino, se realizó la molienda por separado de las hojas y la piña en una trituradora MAGRITEP de 4 aspas con navajas angulares al alto carbón, la fibra fue recolectada en un recipiente colocado en la parte inferior y posteriormente fue trasladada a la prensa de tornillo horizontal para extraer el jugo de dichas fracciones Figura 32, el jugo fue extraído de tres

zonas de la prensa el cual escurrió inmediatamente para liberar la carga impuesta por 5 discos que fueron colocados como contrapeso, el peso individual de cada disco es de 5 kg,

lo que hizo un total de 25 kg de contrapeso para 48.68 kg de piña que fueron prensados, Figura 33. Se repitió el mismo procedimiento para la obtención del jugo de las hojas a diferencia de que éstas fueron colocadas enteras en la banda para su posterior molienda. En ambos casos se obtuvo un jugo de color verde esmeralda los cuales fueron filtrados al vacío para eliminar sólidos en suspensión, los cuáles fueron recolectados en recipientes de plástico cerrados herméticamente, y almacenados a una temperatura de 4°C.



**Figura 33** Obtención de los jugos



**Figura 34** Diagrama general del proceso de extracción de los jugos del agave *Tequilana Weber*

## BALANCES DE MASA

El balance de masa se realizó con la finalidad de determinar el porcentaje de jugo y bagazo en las fracciones, para el balance de masa de las piñas de los 50.8 kg iniciales sólo 48.68kg entraron al molino ( $F = 48.68\text{kg}$ ) ya que 2.12 kg se perdieron en la fase de corte, de dicha corriente se obtuvo la corriente con el bagazo (B) y la corriente (J) correspondiente al jugo. Las pérdidas de materia prima en el molino y del traslado a la prensa no fueron significativas, por lo que no se consideraron. El mismo procedimiento se empleó para las hojas con una alimentación de 7.27 kg ( $F=7.27\text{kg}$ ).

En ambos casos se determinó la densidad del jugo realizando el filtrado del jugo para eliminar bagazo, y empleando picnometría. La Tabla XVIII indica las condiciones de uso empleadas en el filtro prensa, y la Figura 34 muestra el diagrama de flujo del proceso.

**Tabla XVIII** Condiciones de uso del filtro prensa

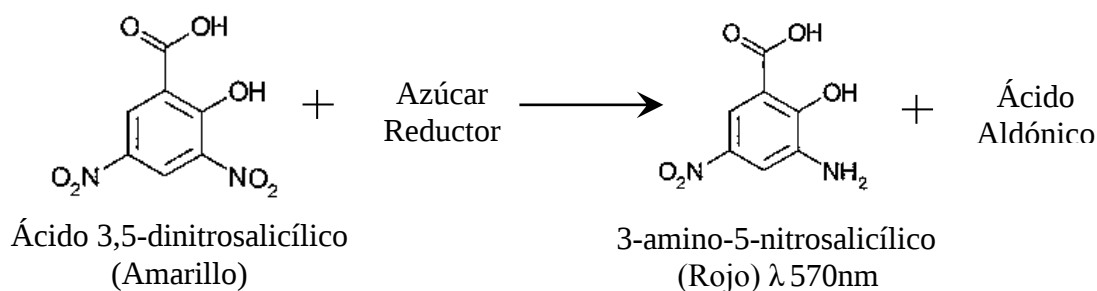
| <b>Característica</b>               | <b>Asignación</b> |
|-------------------------------------|-------------------|
| Selección del tipo de motor         | Asíncrono         |
| Tensión del Motor                   | 220 v             |
| Corriente del Motor                 | 14.4 A            |
| Potencia del Motor                  |                   |
| Frecuencia del Motor                | 60 Hz             |
| Tipo de Refrigeración               | Automático        |
| Factor de Sobrecarga                | 150%              |
| Selección de consigna de frecuencia | Fija              |
| Frecuencia Mínima                   | 20 Hz             |
| Frecuencia Máxima                   | 60 Hz             |
| Tiempo de Aceleración               | 20 s              |
| Tiempo de Desaceleración            | 20 s              |
| Modo de Control                     | Lineal            |

Los azúcares que pueden ser convertidos en etanol y que se encuentran en la planta de agave *Tequilana Weber* provienen de polímeros de fructosa con una molécula de glucosa terminal conocida como inulina y oligofructanos; para la determinación de azúcares reductores totales (ART) se utilizó el método fotolorimétrico de Miller (DNS) a 570 nm, y para realizar la identificación de los azúcares se utilizó cromatografía de alta resolución (HPLC).

## 7.2 DETERMINACIÓN DE AZÚCARES TOTALES REDUCTORES

La determinación de los azúcares reductores totales (ART) presentes en el agave *Tequilana Weber* se realizó por medio del método DNS (Miller 1959), este es un método colorimétrico que permite detectar la presencia del grupo carbonilo libre (C=O) en la molécula de los carbohidratos; Lo cual implica la oxidación del aldehído o un grupo funcional de cetona, el ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS) (de color amarillo) se reduce a 3-amino-5-nitrosalicílico bajo condiciones alcalinas.

Cuando el ácido 3,5 dinitrosalicílico es reducido a ácido 3-amino-5-nitrosalicílico en presencia de calor, por la glucosa u otro azúcar reductor que entra en contacto con él, se desarrolla un cambio de color con variaciones de amarillo hasta rojo ó café y la formación del ácido aldónico correspondiente tal reacción se indica de forma general en la Figura 35. El cambio de coloración fue determinado por medio de lecturas de densidad óptica, leídas por espectrofotometría a una longitud de onda de 570 nm.



**Figura 35** Reacción que se lleva a cabo entre el azúcar reductor y el DNS

La aplicación del método DNS requiere la preparación del reactivo y las muestras para la lectura.

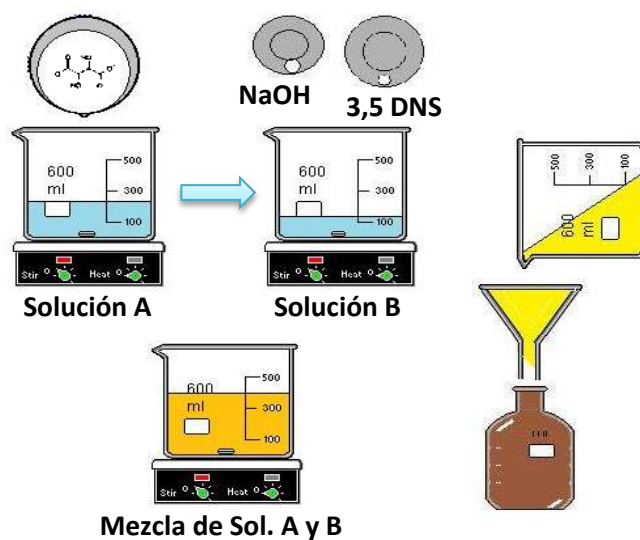
### Preparación del Reactivo DNS

Para la preparación del reactivo DNS se mezclaron dos soluciones, la primera de ellas **solución A**, se obtuvo diluyendo por calor 150 g de tartrato de sodio y potasio en 250 ml de agua destilada, mientras que la **solución B** fue preparada diluyendo 8 g de NaOH en 100 ml de agua destilada, después se agregaron 5 g de ácido 3,5 DNS y se diluyó por calor. Posteriormente ambas soluciones (solución A y B) fueron mezcladas y aforadas a 500 ml con agua destilada posteriormente se almacenó en un frasco ámbar a 4°C, Figura 36.

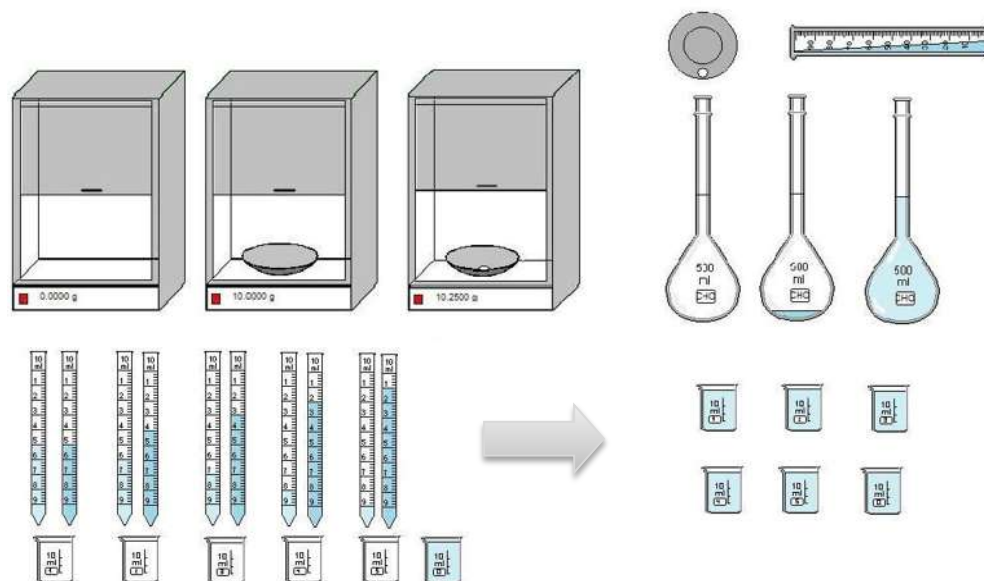
La concentración de los azúcares reductores totales liberados en la muestra se determinó por interpolación en una curva patrón de glucosa. Para obtener esta curva se preparó una solución con una concentración de 5 g/L empleando glucosa como estándar, a partir de la cual por medio de diluciones se prepararon las soluciones con las concentraciones que se indican en la Tabla XIX y Figura 37.

**Tabla XIX** Concentración de las soluciones para la curva patrón

| Dilución                                                        | Sol. Inicial<br>[ml] | Agua<br>[ml] | Concentración<br>[g/L] |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------|--------------|------------------------|
| <b>Concentración inicial <math>5 \times 10^{-3}</math> g/ml</b> |                      |              |                        |
| Sol. Inicial                                                    | -                    | -            | 0.5                    |
| Sol. N° 1                                                       | 5                    | 5            | 0.25                   |
| Sol. N° 2                                                       | 4                    | 6            | 0.2                    |
| Sol. N° 3                                                       | 3                    | 7            | 0.15                   |
| Sol. N° 4                                                       | 2                    | 8            | 0.1                    |
| Sol. N° 5                                                       | 1                    | 9            | 0.05                   |



**Figura 36** Preparación del reactivo DNS

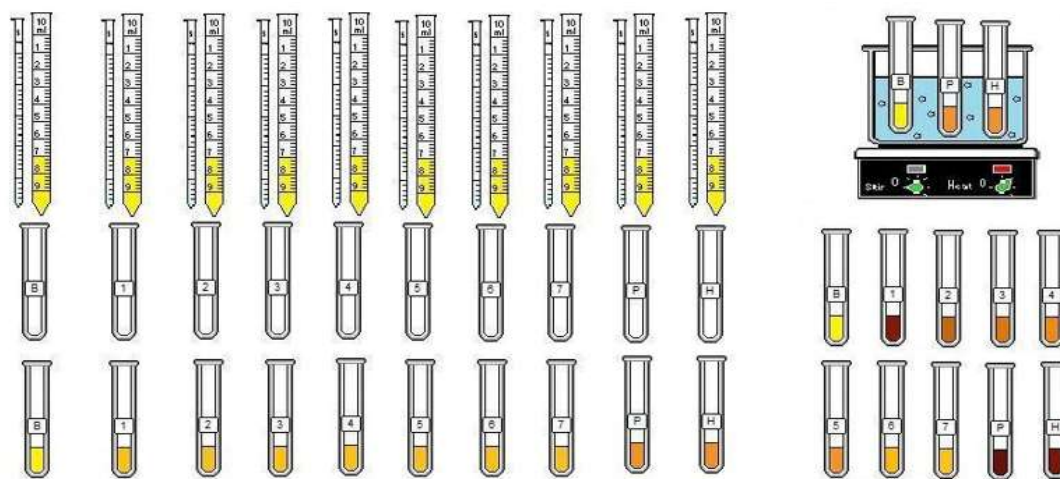


**Figura 37** Preparación de las soluciones de glucosa para la curva patrón

A estas soluciones se les aplicó el método DNS como se indica en la Figura 38, para ello se tomaron 0.3 ml de las soluciones que fueron colocados en diferentes tubos de ensayo, a cada uno de ellos se agregaron 3 ml del reactivo DNS, después fueron colocados

en ebullición durante 10 minutos a baño maría e inmediatamente se detuvo la reacción con baño de agua fría.

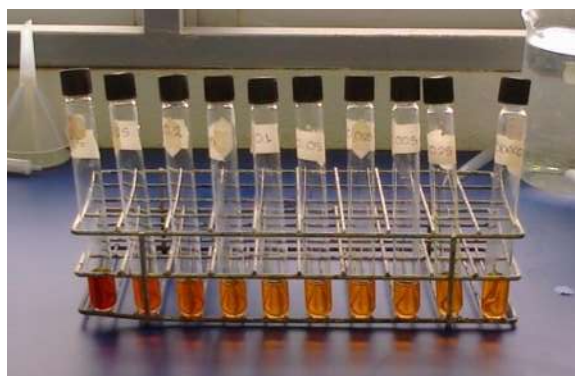
Se dejaron en reposo durante 5 minutos y se leyó la absorbancia por duplicado de cada una de ellas en un espectrofotómetro JENWAY modelo 7305 N° de serie: 39883 Figura 39 a una longitud de onda de 570 nm. El mismo tratamiento fue realizado para la preparación del blanco empleando agua destilada y las muestras del jugo del agave *Tequilana Weber* las cuales se diluyeron en factores de 1/100, para realizar las lecturas. Finalmente leyendo la absorbancia de cada una de las muestras en la curva patrón se determinó la concentración de azúcares reductores Figura 40.



**Figura 38** Aplicación del Método DNS a las soluciones bajo estudio



**Figura 39** Equipo empleado para las lecturas



**Figura 39** Soluciones obtenidas de la aplicación del método DNS

### 7.3 DETERMINACION INDIVIDUAL DE AZÚCARES

Para realizar la identificación por cromatografía de alta resolución de los azúcares presentes en el jugo de la piña y las hojas del agave *Tequilana Weber*, se empleó la metodología estandarizada por (Chirino, 2005). Para realizar la prueba se consideraron seis azúcares: Arabinosa, Fructosa, Glucosa, Manosa, Sacarosa y Xilosa.

Los estándares de éstos azúcares se inyectaron al cromatógrafo VARIAN Star 800 modelo 410 con detector de índice de refracción encontrándose la mejor resolución para los picos presentes con la concentración al 1% utilizando como fase móvil agua grado HPLC y un flujo de 1 ml/min y una presión aproximada de 170-200 atm, una temperatura de 70°C y un volumen de inyección de 20 µL. En estas condiciones el tiempo total de obtención de los cromatogramas fue de 20 min, utilizando una columna empacada MetaCarb 87C que contiene resinas de poliestireno sulfonado, una longitud de 150 mm con diámetro interno de 4.6 mm y diámetro externo de ¼ cm, recomendada para la separación de carbohidratos, capaz de resolver como picos separados, los monosacáridos bajo estudio.

Las curvas de calibración mostraron coeficientes de correlación muy cercanos a la unidad. Se prepararon soluciones patrones individuales con los azúcares para así determinar el tiempo de retención de cada uno de ellos, utilizando las mismas condiciones empleadas en la mezcla e inyectando dos veces para ver la reproducibilidad del método. Para la preparación de los estándares se pesaron aproximadamente 0.01g de cada uno de los azúcares los cuales fueron diluidos posteriormente en 10 ml de agua destilada y las soluciones fueron homogeneizadas empleando el vortex la Tabla XX muestra las concentraciones exactas de cada uno de ellos, así como la comparación del tiempo de retención de cada azúcar expresada en minutos.

**Tabla XX** Tiempos de retención de los estándares de azúcar

| <b>Azúcares</b> | <b>Conc. [g/L]</b> | <b>Tiempo de Retención [min]</b> | <b>Área [mvolts*s]</b> |
|-----------------|--------------------|----------------------------------|------------------------|
| L (+) Arabinosa | 1.01               | 10.0123                          | 175                    |
| D(-) Fructosa   | 1.01               | 10.0305                          | 157                    |
| B D(+) Glucosa  | 1                  | 7.4379                           | 169                    |
| D (-) Manosa    | 0.99               | 8.7274                           | 157                    |
| D(+) Sacarosa   | 1                  | 6.1137                           | 197                    |
| D(-) Xilosa     | 1.06               | 8.3346                           | 167                    |

### Preparación de los Estándares y Extractos

Para la preparación de los extractos de la piña cruda así como de las hojas los jugos fueron filtrados al vacío para eliminar las partículas, así mismo se diluyeron en una relación 1/10 con agua destilada y fueron homogeneizadas por medio de un vortex. Se tomaron 2 ml de cada una de ellas diluciones y se filtraron nuevamente por medio de filtros más pequeños y posteriormente fueron inyectadas a un volumen de 30 µl en viales para realizar las lecturas en el cromatógrafo. El mismo procedimiento se realizó para la lectura de los estándares preparados.

Los tiempos de retención permanecieron casi constantes en las muestras con un mínimo margen de error ya que la desviación estándar fue siempre menor al 2%.

## 7.4 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LAS FIBRAS DE LAS HOJAS Y PIÑA DEL AGAVE TEQUILANA WEBER

### METODOLOGÍA

Para realizar la caracterización química de las fibras de ambas fracciones se realizaron las siguientes actividades:

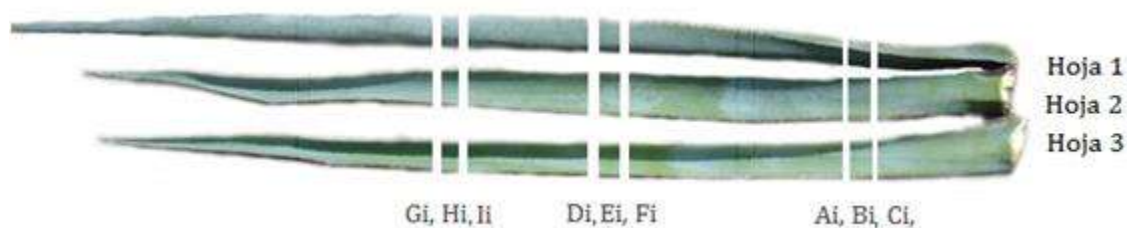
- Determinación del porcentaje de humedad de las hojas y piña del agave *Tequilana Weber*, antes y después del prensado.
- Determinación del contenido del material lignocelulósico por medio de la Hidrólisis Ácida Cuantitativa (HAC).

#### 7.4.1 DETERMINACION DE HUMEDAD

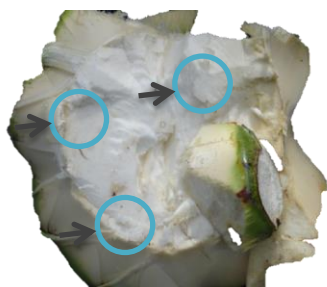
Todos los tejidos vegetales y animales poseen agua ya sea en mayor o menor proporción la cual puede existir en dos formas generales, como agua libre y/o agua ligada, la primera es la forma predominante y es liberada con gran facilidad, mientras que el agua ligada se encuentra combinada o absorbida a las proteínas, a las moléculas de sacáridos o son absorbidas por la superficie de partículas coloidales.

El método empleado para la determinación del contenido de humedad de las fracciones de agave *Tequilana Weber* fue el **Método por Secado de Estufa**, de acuerdo a la NMX-F-083- (1986), y al método 7.005 (AOAC, 1984)

El presente método se basa en la pérdida de peso de la muestra por evaporación del agua debido al calentamiento, refiriendo su peso al peso total de la muestra expresada como porcentaje. Para ello, fueron seleccionadas tres hojas al azar de las cuáles fueron extraídas 3 muestras a lo largo de la hoja de aproximadamente de 2 x 2 cm como se indica en la Figura 41, posteriormente fueron etiquetadas de la letra A a la I añadiendo subíndices en correspondencia al número de hoja.



**Figura 40** Secciones de las hojas para determinar el porcentaje de humedad



**Figura 41** Toma de muestras de la piña de Agave Tequilana

Posteriormente las muestras fueron colocadas en crisoles previamente tarados, y fueron pesadas en una balanza analítica Sartorius modelo BP61S con precisión de  $\pm 1\text{mg}$ , se dejaron durante 3 días en una estufa Felisa FE-291A a una temperatura constante de  $60^{\circ}\text{C}$  como se observa en la Figura 43.

Al término de ese periodo las muestras se colocaron en un desecador para evitar que tomaran humedad del medio y se pesaron en la misma balanza analítica, durante el periodo de secado se realizaron pesadas de las muestras para verificar que mantuvieran el peso constante. El mismo procedimiento fue realizado para la piña, así como para las fibras que se obtuvieron después del proceso de extracción de jugos, en cada uno de los casos se realizó la prueba por triplicado. En la Figura 42 se observan las secciones donde se extrajeron las muestras de la piña.



**Figura 42** Prueba de humedad

Los cálculos empleados para la determinación del contenido de humedad a partir de la pérdida de peso de la muestra obedecen a la siguiente expresión matemática.

$$\% \text{ humedad} = \left( \frac{M_1 - M_2}{M} \right) (100)$$

**Dónde:**

$M_1$  = peso del crisol más la muestra húmeda,  $M_2$  = peso del crisol más muestra seca

$M$  = peso de la muestra

#### 7.4.2 HIDRÓLISIS ÁCIDA CUANTITATIVA

La determinación del contenido de material lignocelulósico presente en las fibras de ambas fracciones del agave *Tequilana Weber* fue realizada por medio de una hidrólisis ácida cuantitativa, (HAC) conforme al diagrama que se muestra en la Figura 44. Dicha técnica permite hidrolizar todos los polisacáridos a monómeros de un modo cuantitativo para con ello determinar tanto los azúcares presentes en la materia prima como la lignina la cual corresponde al residuo sólido que se obtiene. La hidrólisis ácida cuantitativa consta de dos etapas a continuación se expone el procedimiento:

##### PRIMERA ETAPA:

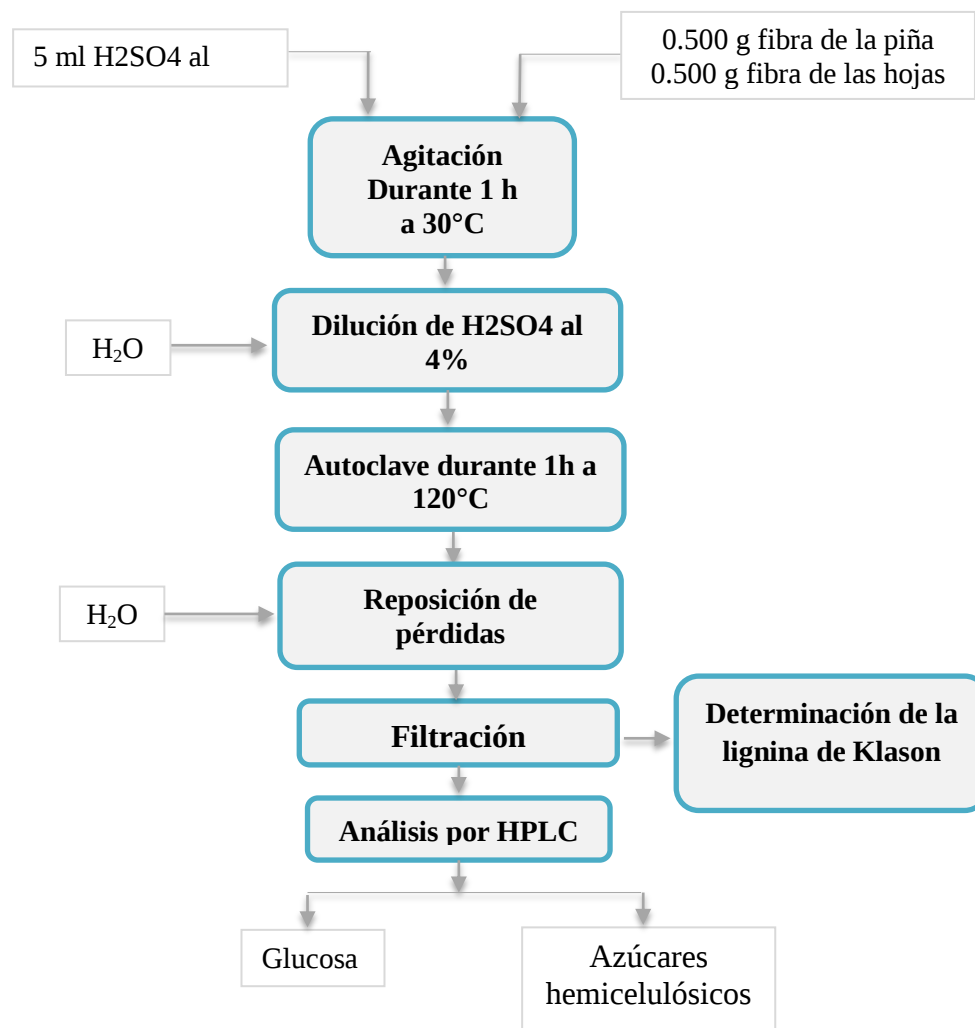
Durante la primera etapa los polisacáridos son hidrolizados por medio de ácido sulfúrico concentrado a temperatura baja, obteniendo una disolución compuesta mayoritariamente por monómeros y oligómeros, así como un residuo sólido que fundamentalmente corresponde a lignina de Klason. Para ello se realizó lo siguiente:

Fueron pesados en una balanza analítica Sartorius modelo BP61S 0.5 g de cada una de las fibras de las cuales se conoce el contenido seco. Los 0.5 g se depositaron en tubos de ensaye en un baño de agua PolyScience modelo 20L-M, Niles IL a 30°C, y se les añadió a cada uno de ellos 5 ml de ácido sulfúrico al 72% el cual fue preparado siguiente las normas estándar. Se mantuvieron los tubos durante 1 h con agitación, esto para lograr una homogeneización de la mezcla con el material lignocelulósico.

##### SEGUNDA ETAPA:

En esta etapa se trató el contenido de cada uno de los tubos en medio ácido diluido a una temperatura de 120°C con el propósito de romper todos los oligómeros a monómeros. Para ello se vertió el contenido de cada tubo sobre un frasco con rosca de 250ml. Se arrastró con agua destilada el residuo adherido y se le agregó agua adicional hasta obtener un peso total de disolución de 148.67g, lo cual permitió llegar a una concentración del 4%

de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Los frascos fueron tapados y se introdujeron en una autoclave Felisa modelo FE-399 durante 1 h a 1 atm de presión. Finalizada la hidrólisis se retiraron los recipientes de la autoclave, y fueron enfriados en chorro de agua. Tras la hidrólisis realizada se obtiene una suspensión (hidrolizados), en que la fase sólida corresponde a la lignina de Klason y la fase acuosa contiene los productos de la hidrólisis de los polisacáridos (monómeros), los cuales fueron analizados por cromatografía líquida de alta resolución.



**Figura 43** Diagrama de flujo del proceso de la hidrólisis ácida cuantitativa

### **DETERMINACIÓN DE LA LIGNINA**

El peso del residuo insoluble que queda tras la hidrólisis ácida cuantitativa en dos etapas se denomina lignina de Klason. Su determinación se hizo de la siguiente manera:

El precipitado fue filtrado a través de crisoles de placa filtrante con tamaño de poro n°3 de peso seco conocido así como al vacío, fue lavado con agua destilada y se mantuvo en la estufa a 105°C durante 24 h. Transcurrido el tiempo se retiraron los precipitados y fueron enfriados en un desecador que contiene gel de sílice y posteriormente se determinó su peso.

Los cálculos realizados para la determinación del contenido porcentual en lignina de Klason en base seca se rigen por la siguiente expresión:

$$LK = \frac{W_R}{W_h(1 - H)} * 100$$

**Dónde:**

**W<sub>R</sub>:** Peso en g del residuo seco,      **W<sub>h</sub>:** Peso inicial total de la muestra antes de la HAC

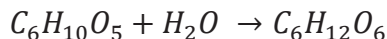
**H:** Humedad de la muestra

### **DETERMINACIÓN DE CELULOSA Y HEMICELULOSAS**

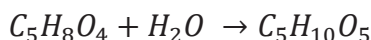
Los líquidos obtenidos de la hidrólisis, fueron filtrados a través de membranas de 0.45 micras de diámetro de poro y posteriormente fueron analizados por cromatografía de alta resolución HPLC a las mismas condiciones empleadas para los estándares de azúcares (glucosa, xilosa, arabinosa y fructosa). Para realizar la cuantificación, se consideró que los azúcares de seis carbonos fueron originados por el rompimiento de la celulosa, y por medio de la cinética de la reacción y la estequiometría de la misma se dedujo la cantidad original de celulosa en la muestra. La cuantificación de hemicelulosas se realizó considerando que el azúcar Xilosa conforma el 80% de las hemicelulosas.

### Hidrólisis

**Celulosa:**



**Hemicelulosa:**



#### 7.4.3 DETERMINACIÓN DE LAS REGIONES ÓPTIMAS PARA EL CULTIVO Y ESTIMACIÓN DE PRODUCCIÓN DE BIOETANOL

La determinación de áreas potenciales para el cultivo de agave *Tequilana Weber* fue determinada en base a los datos reportados en la Tabla XVII, para ello se analizaron los estados que no forman parte del territorio de denominación.

La calificación de los estados se realizó en base a datos reportados por el INEGI obtenidos en el 2012, de acuerdo a lo expuesto con anterioridad se tomaron como variables la temperatura nocturna anual, la precipitación pluvial anual y la altitud. A dichas variables se les asignó un porcentaje de acuerdo a su influencia en el crecimiento del cultivo siendo otorgado el 50% para la temperatura nocturna el 30% para la precipitación pluvial y el 20% restante para la altitud, este último como se ha descrito tiene gran importancia en la probabilidad de heladas y el contenido de azúcares que puede presentar la piña. Sin embargo, dado que el siguiente análisis se realiza de forma general por estado y a que los valores reportados por el INEGI se manejan dentro de intervalos se optó por darle un menor porcentaje al igual que no se toma en cuenta la pendiente ya que éstas variables son específicas de ciertas regiones.

Así mismo, la estimación de producción de bioetanol se realizó en base a los resultados obtenidos por los balances de masa así como de los datos reportados por el INEGI, tomando en cuenta las hectáreas sin actividades agropecuarias o forestales estatales, las hectáreas de agostadero y aquellas que se encuentran sin vegetación. Para lo cual se consideró que por cada hectárea se siembran 3297 plantas de acuerdo a datos reportados

por productores del estado de Jalisco y tomando en cuenta un peso promedio de 100kg por planta.

El cálculo para la producción de bioetanol teórico se realizó empleando las fórmulas descritas en (Stuart R. Paul, El-Halwagi Mahmoud M., 2012), las cuáles se obtienen a partir de estequiometría empleando una densidad del bioetanol de 0.781g/L

$$\frac{\text{litros de etanol}}{\text{tonelada de materia prima}} = 7.2715(\% \text{Peso de Celulosa})$$

$$\frac{\text{litros de etanol}}{\text{tonelada de materia prima}} = 7.4367(\% \text{Peso de Hemicelulosa})$$

$$\frac{\text{litros de etanol}}{\text{tonelada de materia prima}} = 6.5443 (\% \text{Peso de ART})$$

## 8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 8.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL AGAVE TEQUILANA WEBER

Las características del agave difieren en función de la región en la que se encuentra, esto debido a factores como temperatura, humedad, precipitación pluvial entre otros como diferencias genéticas de las plantaciones que influyen en su crecimiento, a continuación se da una descripción física de las hojas del agave *Tequilana Weber*. La planta cuenta con una gran difusión desde el centro de tallos con una altura entre  $1.2 \pm 1.8$  m gruesos con espesores de  $30 \pm 50$  cm en la madurez. La panícula es de  $5 \pm 6$  m de altura, se encuentra densamente ramificado con  $20 \pm 25$  compuestos de umbelas de flores verdes con estambres rosados, flores de entre  $68 \pm 75$  mm de largo en pedicelos bracteolados pequeños de  $3 \pm 8$  mm de largo (Gentry, 1982).

La parte más importante comercialmente del agave *Tequilana Weber* es la “piña” la cual se muestra en la Figura 45 ésta se emplea para la producción del tequila, ya que contiene una gran cantidad de inulina de tal forma que el tequila se obtiene por medio de la hidrólisis de la piña para su transformación en azúcares fermentables, el peso de la planta de agave (hojas y piña) oscila entre los 100 kg y 120 kg (Saldaña et al. 2011), se tienen registros sobre el peso promedio de la cabeza del agave



**Figura 44** Piña de Agave Tequilana Weber

que va de 30 a 70 kg., aunque se han obtenido cultivos cuyas cabezas han llegado a pesar entre 80 y 120 kg., y dentro de estos, cabezas de hasta 150 kg y con un contenido de azúcares reductores totales que oscila entre 16 a 28% en peso fresco, cabe mencionar que estos datos dependen de las condiciones de producción, el suelo y estado de maduración de la planta.

Por otro lado las hojas o pencas Figura 46 constituyen los residuos agrícolas del cultivo, y representan alrededor del 45 al 50% del peso total de la planta. Las hojas del



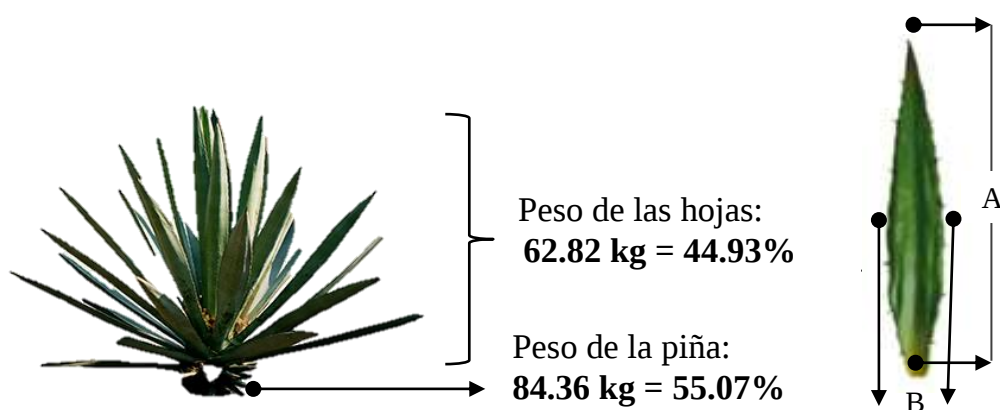
**Figura 45**  
Hoja de a.  
Tequilana

agave *Tequilana Weber Azul* son cortadas cerca de sus bases tienen una longitud entre  $90 \pm 120$  cm y entre  $8 \pm 12$  cm de ancho esto debido a que las piñas se cosechan después de 7 o 9 años de haber sido sembradas pero antes de la inflorescencia. Las hojas son lanceoladas, acuminadas, tienen fibra firme en su mayoría rígidamente extendida, son cóncavas ascendentes a la horizontal, más amplias hacia la mitad, estrecha y espesa hacia la base, generalmente de un color verde azulado a gris, a veces con zonas cruzadas, el margen va de recto a ondular; sus dientes generalmente son de tamaño regular y el espaciamiento raramente irregular, principalmente  $3 \pm 6$  mm de largo y hasta la mitad de la hoja, las cúspides son delgadas curvadas o flexionadas de bajas bases piramidales, de entre café claro a café oscuro, con  $1 \pm 2$  cm, de distancia; las espinas generalmente son cortas de  $1 \pm 2$  cm de largo ocasionalmente aplanadas o acanaladas por encima de la amplia base que es de color café oscuro (Gentry, 1982).

La fibra de las hojas está compuesta de haces de agrate de fibras cortas. Los cuales varían en longitud; con una longitud promedio de 40 cm ( $23 \pm 52$  cm) y una anchura promedio de 0,12 mm ( $0,6 \pm 13$  mm). La longitud media de la fibra final es 1,6 mm con una anchura media de 25  $\mu$ m. Y su contenido de azúcares reductores totales oscila entre 3.3 a 16.1% en peso fresco, lo cual depende de la edad de la planta, las condiciones agronómicas del cultivo, y de la proximidad de las hojas hacia la cabeza o piña de la planta. (Iñiguez et al., 2001).

## 8.2 DETERMINACIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LA PLANTA

Del primer estudio realizado, se determinó el porcentaje en peso húmedo de las fracciones que componen a la planta donde aproximadamente el 55.07% del peso total, corresponde al peso de la piña; mientras que el 44.93% restante corresponde a las hojas de la planta, como se muestra en la Figura 47.

**Figura 47** Conformación de la Planta**Figura 47** Penca de Agave Tequilana

Dicha relación fue establecida como parámetro para estimar el porcentaje de las fracciones de las plantas que se emplearon en el balance de masa, obteniendo los siguientes resultados:

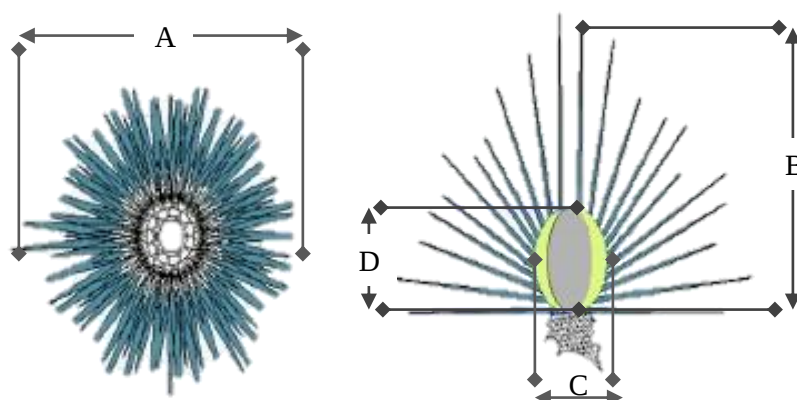
**Peso Piña<sub>2</sub>:** 21.94 kg por relación      **Peso de Hojas Piña<sub>2</sub>:** 17.90 kg

**Peso Piña<sub>3</sub>:** 28.86 kg por relación      **Peso de Hojas Piña<sub>3</sub>:** 23.55 kg

**Total:** 50.80 kg

**Total:** 41.45 kg

La Figura 49 resume las dimensiones encontradas a partir de las mediciones realizadas a las plantas y sus valores se indican en la Tabla XXI

**Figura 48** Dimensiones de la Planta de Agave Tequilana Weber

**Tabla XXI** Correspondiente a las dimensiones de la Figura 49

| Propiedad Física                      | (m)            |        |        | Desviación<br>Estándar |
|---------------------------------------|----------------|--------|--------|------------------------|
|                                       | Valor<br>Medio | Mínimo | Máximo |                        |
| <b>A</b> Diámetro máximo de la planta | 2.330          | 2.210  | 2.530  | 0.177                  |
| <b>B</b> Altura de la planta          | 1.440          | 1.310  | 1.660  | 0.194                  |
| <b>C</b> Diámetro máximo de la piña   | 0.350          | 0.315  | 0.400  | 0.045                  |
| <b>D</b> Altura de la piña            | 0.46           | 0.410  | 0.520  | 0.057                  |

### 8.3 DETERMINACIÓN DE DIMENSIONES Y PESO DE LAS HOJAS

La planta de la cual se determinó el porcentaje de las fracciones, contaba con un total de 90 hojas. Para estimar el total de hojas en las plantas empleadas en el balance de masa, el muestreo se hizo con seis hojas, dos de cada una de las piñas las cuales fueron tomadas aleatoriamente y pesadas obteniéndose de ello un peso promedio de  $0.260 \pm 0.01$  kg con lo anterior fue posible estimar que el número total de hojas presentes en cada una de las plantas, fue de:

**Hojas Piña<sub>2</sub>:** 69 hojas

**Hojas Piña<sub>3</sub>:** 91 hojas

Las dimensiones de las hojas se resumen en la siguiente Tabla XXII dichas dimensiones se encuentran referidas a la Figura 48.

**Tabla XXII** Correspondiente a las dimensiones de la Figura 48

| Propiedad Física             | Valor<br>medio | Mínimo | Máximo | Desviación<br>Estándar |
|------------------------------|----------------|--------|--------|------------------------|
| <b>A</b> Largo (m)           | 1.007          | 0.895  | 1.280  | 0.187                  |
| <b>B</b> Ancho máximo (cm)   | 5.800          | 4.200  | 8.000  | 1.641                  |
| <b>C</b> Espesor máximo (cm) | 3.000          | 2.000  | 5.000  | 1.414                  |

## 8.4 PORCENTAJE DE HUMEDAD

El porcentaje de humedad de las fracciones fue determinado antes de que las plantas fueran procesadas así como al salir de la prensa, los datos obtenidos se muestran en la Tabla XXIII

**Tabla XXIII** Porcentaje de humedad en la planta de a.  
*Tequilana Weber*

| % Humedad     | Desviación Estándar | % Humedad                   | Desviación Estándar |
|---------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|
| <b>Piña</b>   |                     | <b>Bagazo de la Piña</b>    |                     |
| 61.62         | 2.196               | 41.95                       | 0.063               |
| <b>Pencas</b> |                     | <b>Bagazo de las Pencas</b> |                     |
| 80.81         | 0.369               | 61.77                       | 0.006               |

Como se puede observar en la Tabla XXIII, la humedad es el principal constituyente de las plantas de agave, alcanzando una concentración del 61.62% para la piña y el 80.81% para las hojas, dichos resultados dependen de factores tales como la edad de la planta, la temporada de la cosecha, así como a la cantidad de agua a la que están expuestas, siendo éste último un factor determinante para la contenido de azúcares totales en la planta.

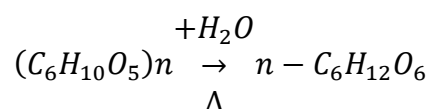
## 8.5 CUANTIFICACIÓN DE AZÚCARES TOTALES REDUCTORES

Los resultados de la cuantificación de azúcares reductores en unidades de glucosa se muestran en la Tabla XXIV la curva empleada para su determinación presentó un factor de correlación de  $R^2 = 0.9978$ .

**Tabla XXIV** Contenido de ART en el agave *Tequilana Weber*

| Muestra                  | Conc. [g/L] | °Brix  |
|--------------------------|-------------|--------|
| Extracto de Piña Cruda   | 86.39       | 8.638  |
| Extracto de Hojas Cruda  | 39.90       | 3.990  |
| Extracto de Piña Cocida  | 292.29      | 29.229 |
| Extracto de Hojas Cocida | 77.53       | 7.753  |

De la tabla anterior podemos llegar a las siguientes conclusiones, como es de esperarse la fracción de la piña presenta un mayor contenido de azúcares reductores en comparación con el extracto de las hojas. Sin embargo, en ambos casos el contenido resulta ser muy bajo, lo cual se le puede atribuir a que al ser ambos extractos de la planta cruda, la gran mayoría de azúcares aún se encuentran en forma de polisacáridos especialmente en forma de inulinas. Así mismo, se reporta la concentración de azúcares reductores presentes en el extracto de la piña la cual fue sometida a cocción a una temperatura de 110°C durante 3 hr, el efecto de la temperatura en la piña produjo la hidrólisis de la inulina contenida en el agave hasta el grado de monosacáridos llevándose a cabo la siguiente reacción generalizada:



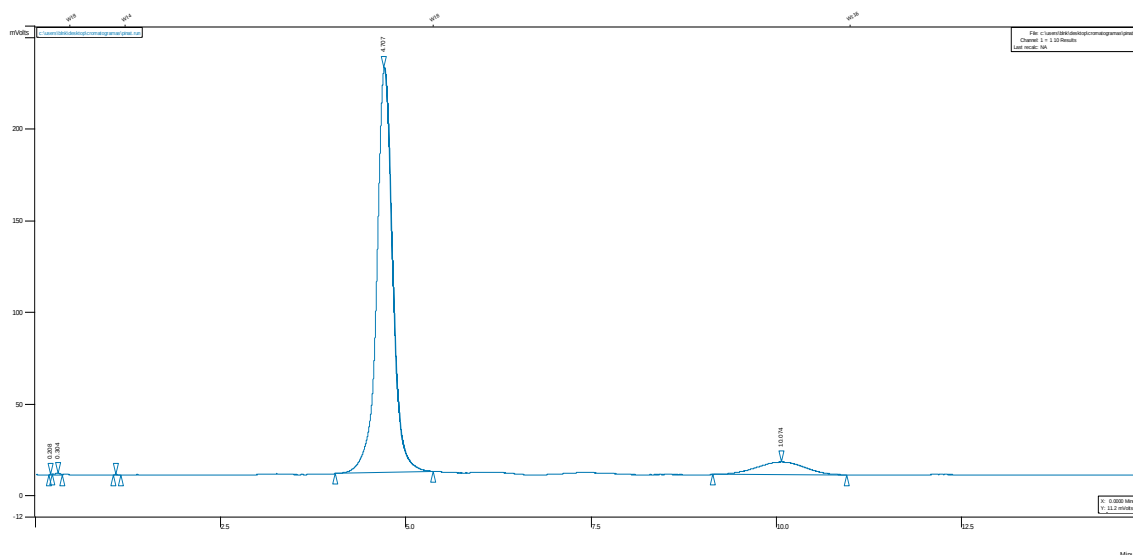
Se observa que la cocción de la piña incrementó en más del triple el contenido de azúcares reductores de la piña cruda, y la cocción de las hojas lo duplica.

## 8.6 DETERMINACIÓN INDIVIDUAL DE AZÚCARES

Para la determinación de los azúcares presentes en las muestras de los extractos se analizaron los cromatogramas que se muestran en las Figuras 52, 53, 54. Se obtuvieron dos cromatogramas para cada una de las muestras y se tomó el valor promedio de ambas como criterio de tiempo de retención. Es por ello que los valores reportados en los cromatogramas no son exactamente los reportados.

Para el extracto de la piña cruda Figura 50 se observan únicamente dos picos cuyos tiempos de retención promedio corresponden a 4.707 y 10.074 minutos, los cuáles se pueden asignar a los polisacáridos de inulina y a la fructosa respectivamente. Dicha aseveración se basa en estudios anteriores donde se observa que para la columna empleada a las condiciones establecidas y el tiempo de retención observado el pico que se encuentra a un tiempo de 4.707 minutos corresponde a la inulina, además dicha aseveración se sustenta

con el resultado obtenido anteriormente donde el contenido de azúcares reductores es muy bajo gracias a la presencia de inulina en el agave crudo.



**Figura 49** Cromatograma extracto de la Piña Cruda de A. Tequilana Weber

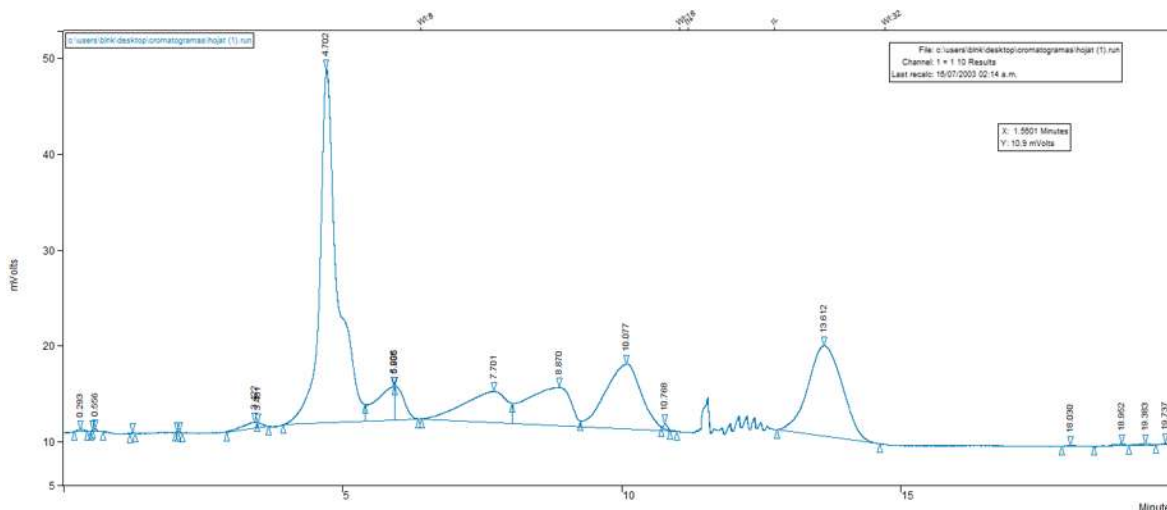
La Tabla XXV muestra las cantidades de azúcares presentes en el extracto de la piña cruda de acuerdo a los estándares manejados.

**Tabla XXV** Identificación y cuantificación de azúcares presentes en la piña cruda del agave *Tequilana Weber*

| Extracto De Piña Cruda |          |                          |                             |
|------------------------|----------|--------------------------|-----------------------------|
| Tiempo de Retención    | Azúcar   | Cantidad de Azúcar [g/L] | Cont. Total de Azúcar [g/L] |
| 4.707                  | -----    | -----                    | -----                       |
| 10.074                 | Fructosa | 2.059                    | 20.59                       |

Por otro lado en el cromatograma de las hojas Figura 51, es posible visualizar una mayor cantidad de picos cuyos tiempos de retención corresponden a los siguientes: 4.702, 5.9347, 7.701, 8.8705, 10.0767, 13.61 minutos, de los cuales tres de ellos no es posible

identificarlos, sin embargo el tercer pico corresponde a la glucosa, seguido por la manosa, la fructosa, y otros azúcares sin identificar. La Tabla XXVI muestra dichos azúcares y la cuantificación de los mismos.



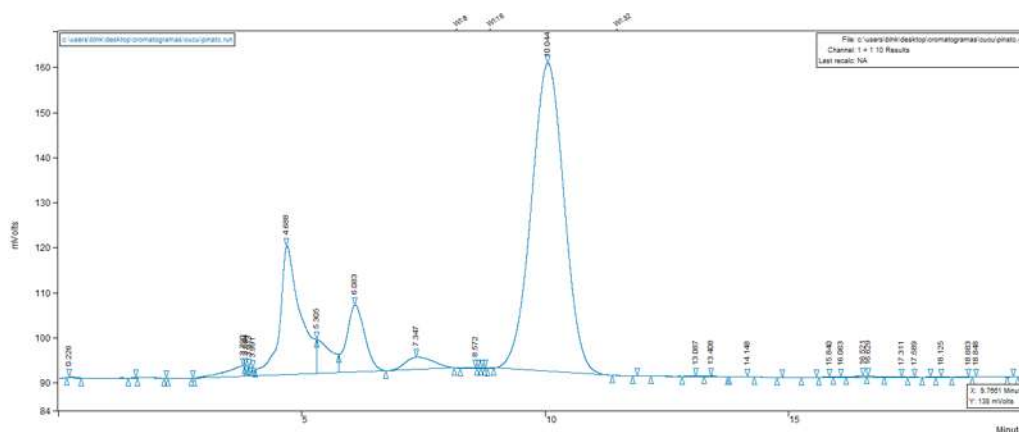
**Figura 50** Cromatograma extracto de las hojas de *A. Tequilana Weber*

**Tabla XXVI** Identificación y cuantificación de azúcares presentes en las hojas del agave *Tequilana Weber*

| Extracto Hojas      |          |                          |                             |
|---------------------|----------|--------------------------|-----------------------------|
| Tiempo de Retención | Azúcar   | Cantidad de Azúcar [g/L] | Cont. Total de Azúcar [g/L] |
| 4.7021              | -----    | -----                    | -----                       |
| 5.9347              | -----    | -----                    | -----                       |
| 7.701               | Glucosa  | 1.018                    | 10.18                       |
| 8.8705              | Manosa   | 1.356                    | 13.56                       |
| 10.7067             | Fructosa | 1.949                    | 19.49                       |
| 13.61               | -----    | -----                    | -----                       |

Y finalmente para la piña cocida Figura 52 se observan cinco picos muy pronunciados con tiempos de retención de: 4.688, 5.305, 6.083, 7.347 y 10.0436 minutos, como se puede observar, uno de los picos más grandes que era al correspondiente al tiempo de 4 minutos en la piña cruda disminuyó su área tras la hidrólisis y dio origen a otros

azúcares siendo el que ocupa una mayor área el correspondiente a la fructosa. La Tabla XXVII indica las concentraciones de los azúcares identificados.



**Figura 51** Cromatograma del extracto de Piña de *A. Tequilana Weber* Cocida

**Tabla XXVII** Identificación y cuantificación de azúcares presentes en la piña cocida del agave *Tequilana Weber*

| Extracto Piña Cocida |          |                         |                             |
|----------------------|----------|-------------------------|-----------------------------|
| Tiempo de Retención  | Azúcar   | Cantidad de Azúcar[g/L] | Cont. Total de Azúcar [g/L] |
| 4.688                | -----    | -----                   | -----                       |
| 5.305                | -----    | -----                   | -----                       |
| 6.083                | Sacarosa | 1.949                   | 19.49                       |
| 7.347                | Glucosa  | 0.657                   | 6.57                        |
| 10.0436              | Fructosa | 20.605                  | 206.05                      |

## 8.7 DETERMINACIÓN DE COMPONENTES ESTRUCTURALES EN LA FIBRA DEL AGAVE (CELULOSA, HEMICELULOSA Y LIGNINA)

La caracterización del material tiene como finalidad conocer las cantidades aproximadas de polímeros existentes en la muestra, para así realizar una determinación

preliminar del potencial de producción del agave *Tequilana Weber* como materia prima para la producción de bioetanol.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla XXVIII

**Tabla XXVIII** Caracterización de la fibra del agave *Tequilana Weber*

| <b>Fracción</b>   | <b>Piña</b> | <b>Hojas</b> |
|-------------------|-------------|--------------|
| Componente        | %           | %            |
| Celulosa          | 55.11       | 45.34        |
| Hemicelulosa      | 10.31       | 13.95        |
| Lignina de Klason | 23.58       | 28.68        |

Las hojas presentan un mayor contenido de lignina y hemicelulosa en comparación con la piña; Sin embargo, el contenido de celulosa de la piña supera en un 17.72 % el contenido de celulosa de las hojas. Haciendo un comparativo entre valores reportados por Iníguez-Covarrubias et al. (2001), como se muestra en la Tabla XXIX

**Tabla XXIX** Comparativo porcentaje de componentes de a. *Tequilana Weber* procedentes de diferentes regiones

|                     | <b>A.Tequilana*</b> | <b>A.Tequilana</b> | <b>A.Tequilana*</b> | <b>A.Tequilana</b> |
|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
|                     | <b>Piña</b>         |                    | <b>Hojas</b>        |                    |
| <b>Celulosa</b>     | 43                  | 55.11              | 65                  | 45.37              |
| <b>Hemicelulosa</b> | 19                  | 10.31              | 5                   | 13.95              |
| <b>Lignina</b>      | 15                  | 23.58              | 16                  | 28.68              |

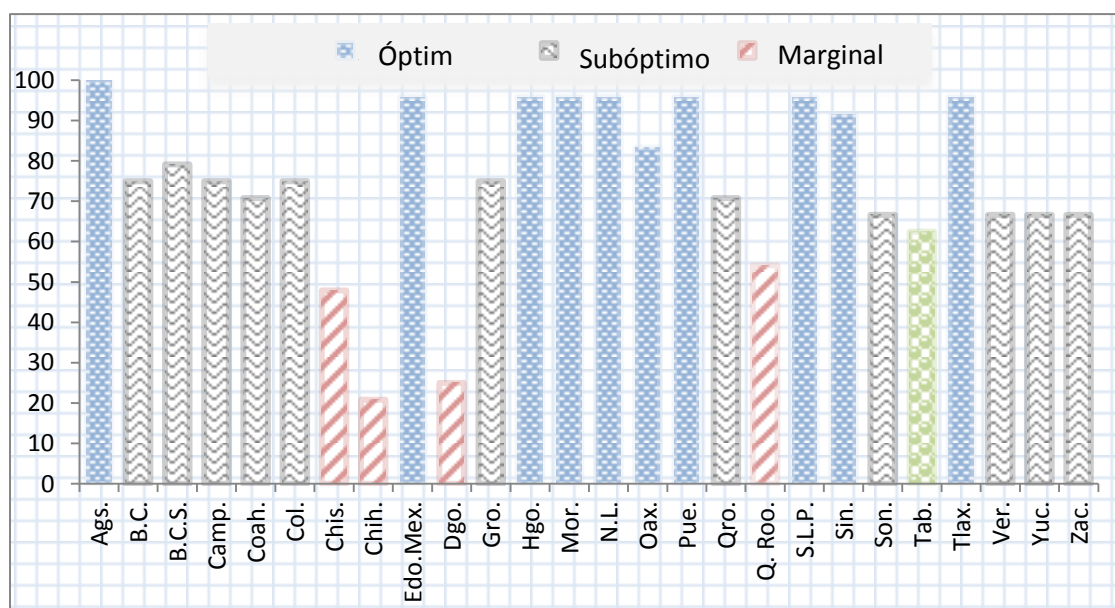
A.Tequilana\* por Iníguez-Covarrubias et al. (2001);

Se puede observar que el contenido de cada uno de los componentes difiere con los resultados obtenidos, lo anterior se atribuye a que la composición de los carbohidratos extraídos de las mismas especies de plantas se diferencia de acuerdo a la ubicación de los cultivos de origen, los cuales son expuestos a diferentes climas. De acuerdo a datos presentados por Iníguez-Covarrubias et al. (2001). Los perfiles de componentes cuyas plantas que fueron cultivadas en la misma región fueron similares entre las especies. Esto

muestra la importancia de la selección de los territorios para realizar plantaciones y así poder optimizar el rendimiento de los biocombustibles.

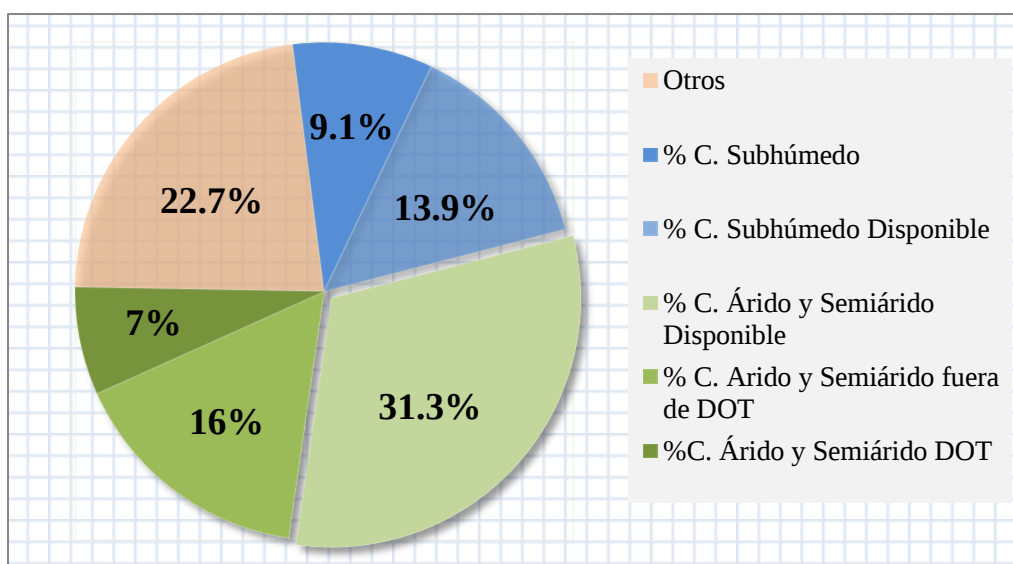
### 8.8 DETERMINACIÓN DE ZONAS CON POTENCIAL PARA LA PLANTACIÓN DE AGAVE TEQUILANA WEBER

Del análisis realizado, se obtuvo la Figura 53 en la cual se observa que diez de los veintisiete estados contemplados en el estudio resultan con características óptimas para el cultivo de agave *Tequilana* y once de los mismos presentan características subóptimas para ello, la suma de estos territorios representa el 63.99% del territorio árido y semiárido del país. Siendo el 23.18% restante correspondiente a los territorios de los estados de Chihuahua y Durango, que no entran dentro de la categoría de subóptimos, debido al intervalo de altitud reportado. En el caso del estado de Tabasco éste presenta buena temperatura nocturna pero los resultados de las variables restantes no ofrecen un buen resultado, sin embargo es necesario realizar un estudio más detallado de las regiones de estos estados en las cuales es factible realizar el cultivo.



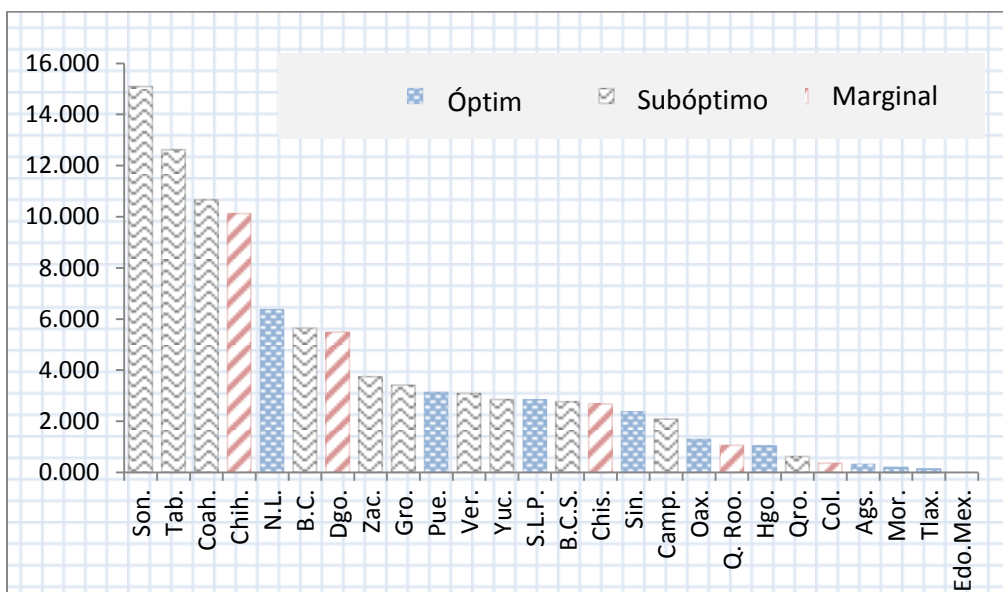
**Figura 52** Potencial de cultivo de los Estados de la República Mexicana fuera de la región de denominación de origen

Del análisis de disponibilidad de tierras para cultivo se obtuvo Figura 54 en la cual, de acuerdo a los datos reportados del INEGI el 54.3% del territorio tiene un carácter de Árido y Semiárido representado de color verde, de los cuales el 7% forma parte de los estados con territorio de denominación del Tequila, y del 47.3% restante el 31.3% está formado por territorio sin actividad agropecuaria o forestal, tierras de agostadero, y sin vegetación. Por otro lado el 23% del territorio nacional tiene un clima subhúmedo donde 13.9% se encuentra disponible para realizar el cultivo.



**Figura 53** Climas y disponibilidad de tierras de la República Mexicana

Así mismo se determinó que los estados con mayor área disponible son los estados de Sonora, Tabasco y Coahuila cuyas características los sitúan como candidatos subóptimos para las plantaciones, Figura 55. El 17.7% del territorio disponible (88'666,241 Ha.) para plantaciones se encuentra en áreas óptimas, el 62.9% lo comprenden los estados clasificados como subóptimos y finalmente el 19.4% lo forman los estados cuyas características resultan marginales.



**Figura 54** Porcentaje de áreas disponibles por estado

## 8.9 PROYECCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL

Aplicando las fórmulas de proyección se determinó que una tonelada de piña produce 263.9478L a partir de su contenido de celulosa, 47.5982L de etanol provenientes de la hemicelulosa y 64.0749L a partir de los jugos, lo cual hacen un total de 375.6209L por tonelada. Por otro lado, una tonelada de hojas produce a partir de la celulosa 222.6725L de etanol y 70.0673L que provienen de su contenido de hemicelulosa, siendo la producción más baja a partir del jugo con 16.2295L lo que hace un total de 308.9693L por tonelada de hojas.

Ahora bien tomando en cuenta que el porcentaje en peso de la piña en la planta es del 55.07% y el resto de las hojas. La producción de etanol por tonelada tomando el peso total de la planta es de 345.6743L. En la Tabla XXX se hace un comparativo de la producción del agave *Tequilana Weber* frente a otros cultivos.

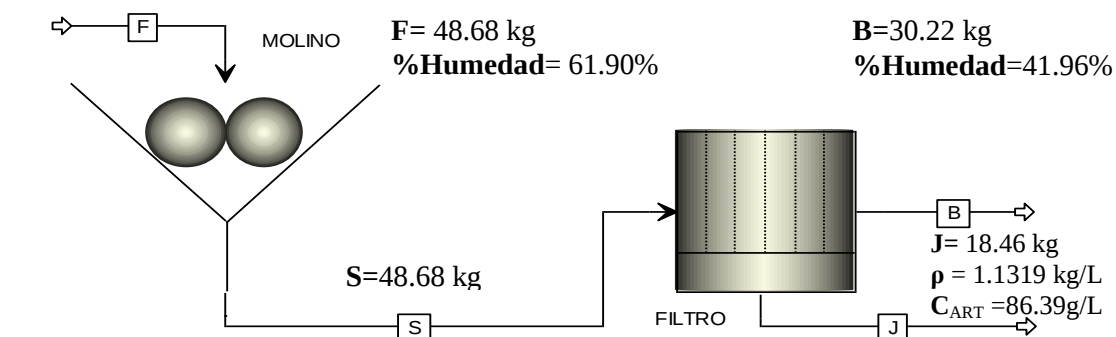
**Tabla XXX** Potencial de producción teórico de bioetanol a partir de diversas fuentes de biomasa lignocelulósica

| Material (Variedad)               | Bioetanol (L/ton) | Material (Variedad)                | Bioetanol (L/ton) |
|-----------------------------------|-------------------|------------------------------------|-------------------|
| Álamo Híbrido                     | 409.2             | Rastrojo de Maíz                   | 416.8             |
| Eucalipto                         | 443.9             | Sericea lespedeza                  | 402.3             |
| Langosta Negra                    | 424.4             | Switchgrass                        | 358               |
| Sicomoro Americano                | 412.9             | Gran festuca                       | 320.4             |
| Bagazo de Azúcar de Caña          | 468.9             | Sorgo dulce                        | 369.9             |
| Álamo Oriental                    | 500               | Papel                              | 618.1             |
| Paja de Trigo                     | 365.3             | Desechos                           | 585               |
| Cáscaras de frutos secos          | 367.7             | Hojas                              | 704               |
| Mazorca                           | 587.5             | Res.de papel de pulpa química      | 510.7             |
| Pasto                             | 442.1             | Sol. primarios de aguas residuales | 58.2              |
| Residuos porcinos                 | 251.9             |                                    |                   |
| Residuos ganaderos                | 22                |                                    |                   |
| Palma aceitera                    | 281.6             |                                    |                   |
| Bagazo A. Tequilana Weber (Piña)  | 375.6             |                                    |                   |
| Bagazo A. Tequilana Weber (Hojas) | 308.9             |                                    |                   |

Tal como se muestra en la Tabla XXX el agave *Tequilana Weber* genera valores que se encuentran dentro del promedio. Como es de esperarse, la producción más elevada se obtiene a partir de las piñas de la planta, superando la producción de las hojas por un 21.6%. Por lo que emplear los residuos de la industria tequilera como materia prima para estos fines resulta adecuado, además al realizar el cultivo del Agave en tierras marginales fuera de la DOT el empleo de la planta sería integral obteniendo a partir de sus fracciones prácticamente el mismo rendimiento teórico.

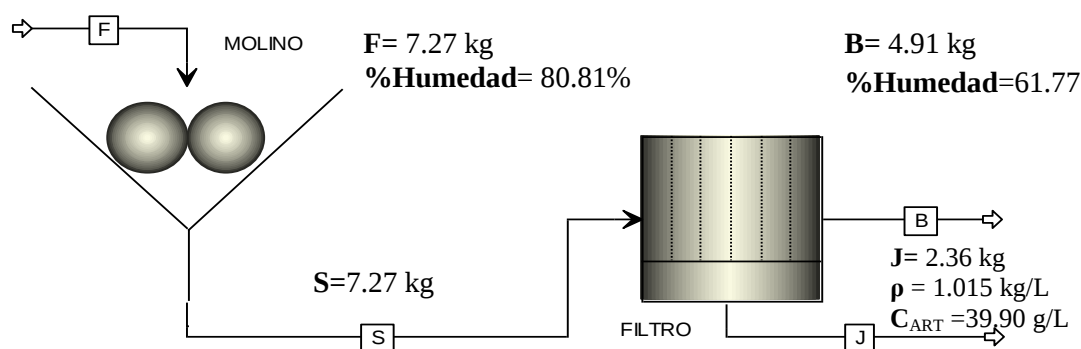
## 8.10 BALANCES DE MASA

El resultado de los balances de masa realizados se condensa en las Figuras 56 y 57 donde podemos determinar que el **62.08%** del peso de la piña corresponde al bagazo (fibra) siendo el **37.92%** restante el jugo que se obtiene, cuya densidad es de **1.1319 kg/L**



**Figura 55** Diagrama con los resultados del proceso de extracción de los jugos de la piña Agave Tequilana Weber

Mientras que, para las hojas se determinó que el **67.54%** del peso de las pencas corresponde al bagazo de las mismas siendo el **32.46%** del peso el jugo obtenido a partir de ellas, con una densidad de **1.015 kg/L**.

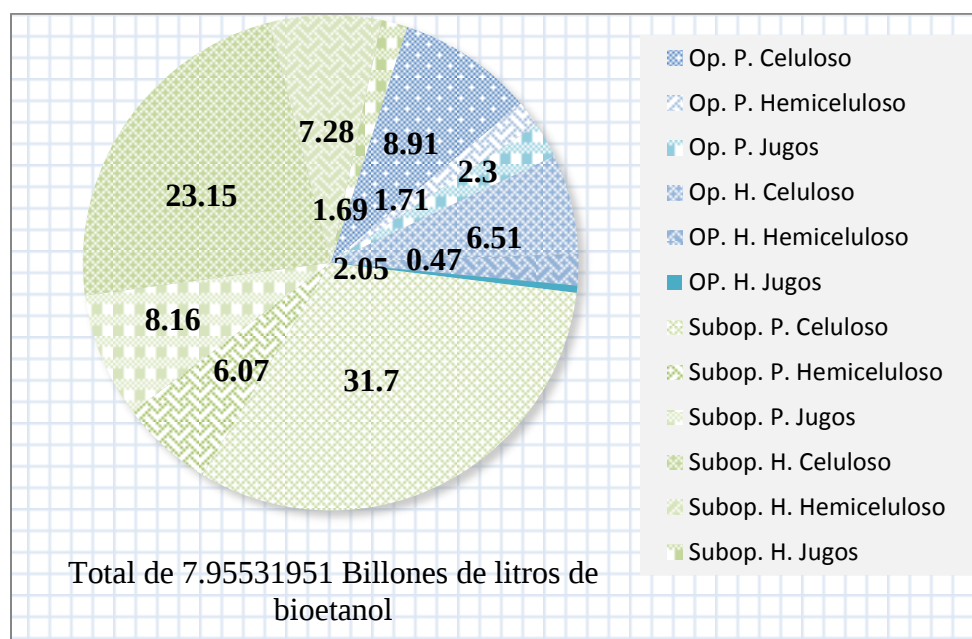


**Figura 56** Diagrama con los resultados del proceso de extracción de los jugos de las pencas Agave Tequilana Weber

Conforme al estudio realizado tomando en cuenta un peso de 100kg por planta se determinó que el territorio disponible de los estados con características óptimas para el cultivo de agave produciría un total de 1.74551535 billones de litros de bioetanol. Lo cual cubriría un periodo de un poco más de 25 años tomando como referencia datos publicados por PEMEX donde declara un consumo de gasolina de 191,105,980L por día. Si además de considerar los estados óptimos consideramos la producción de los estados con características subóptimas el periodo aumenta a 115 años y medio.

Los datos anteriores fueron estimados tomando en cuenta el uso integral de la planta en regiones aptas para su crecimiento. Sin embargo, no podemos dejar de lado los residuos generados por la industria tequilera que representan el 44.93% del peso total, mismos que no tienen un uso aparente y son catalogados como residuos de la industria. De acuerdo a datos reportados por el CRT los últimos 5 años, se emplearon 3651 mil toneladas de materia prima (piña) para la producción del tequila, mismos que representan 2978.743962 mil toneladas de pencas.

Tomando en cuenta la cifra anterior se estima una producción de etanol de 2 057 794.99 mil litros, siendo el 79.06% de éste obtenido a partir de la celulosa, el 18.56% de la hemicelulosa y el resto a partir del jugo. Tal producción cubriría alrededor de 10 días y medio del uso de combustibles.



**Figura 57** Contribución de la producción de bioetanol de las áreas óptimas y subóptimas

En la Figura 58 se analizan los porcentajes con los cuáles contribuirían los estados con características óptimas de color azul y subóptimas representado de color verde, en la producción de bioetanol. El 21.95% de la producción total lo conforman el territorio óptimo del cual el 12.33% se obtiene a través de las piñas y el resto de las hojas. Y en ambos casos

se puede observar que el mayor porcentaje de producción es a partir de la celulosa que contienen dichas fracciones.

De igual manera para el caso de la producción en territorios con características subóptimas como es de esperarse el mayor porcentaje de producción recae en las piñas y hablando en términos de composición la producción otorgada por la celulosa es mayor.

## 9. CONCLUSIONES

Las expectativas puestas en la producción de combustible para el transporte a partir de biomasa se basan en que estas producciones puedan permitir un bajo requerimiento neto de energía fósil y una reducción en la emisión de gases efecto invernadero, y con ello reducir la dependencia de la economía global en los recursos energéticos no renovables.

La producción de biocombustibles de primera generación impulsada por el alza de los precios del petróleo y apoyada por las regulaciones que apoyan el uso biocombustibles ha mostrado un importante crecimiento a lo largo de los últimos años. Sin embargo éstos enfrentan algunos obstáculos. Entre los temas en cuestión se encuentran la disponibilidad de biocombustible, la seguridad alimentaria y la competencia por el uso del suelo. Materias primas de biomasa que crece en tierras semiáridas como el agave *Tequilana Weber* son una respuesta sostenible a la creciente demanda de combustibles renovables que no entren en conflicto con los alimentos y los piensos de producción, ya que es un cultivo de alto rendimiento que requiere un mínimo de aportes de agua y nutrientes que puede ser cultivado en tierras marginales, reduciendo con ello la competencia de uso de suelo, a pesar de ello éste cultivo no se limita a tierras semiáridas, ya que también es productiva en áreas con alta precipitación y buena retención de agua del suelo.

Con base a los resultados obtenidos en este estudio se determinó que el agave *Tequilana Weber* se encuentra conformado por dos fracciones, la primera de ellas constituida por las hojas da lugar a la parte aérea de la planta y representa el 44.93% del peso total, mientras que la segunda fracción mejor conocida como piña representa el 55.07%.

El peso promedio de la planta es de 100kg, sin embargo se han registrado pesos de hasta 120kg y 150kg, dicha variabilidad se atribuye a factores tales como la edad de la planta, temperatura, humedad, precipitación pluvial, altitud y tipo de suelo. Del estudio se determinó que las plantas cuentan con un promedio de  $90 \pm 10$  hojas, cuyas dimensiones promedio son las siguientes:  $1.007 \pm 0.187$ m de largo,  $5.8 \pm 1.641$ cm de ancho, espesor

máximo de  $3\pm 1.414\text{cm}$  y un peso de  $0.260\pm 0.01\text{ kg}$ . Por otro lado las dimensiones promedio de la piña son: diámetro máximo de  $2.330\pm 0.177\text{m}$ , altura de la planta de  $1.440\pm 0.194\text{m}$ , diámetro máximo de la piña de  $0.350\pm 0.045\text{m}$  y una altura de la misma de  $0.46\pm 0.057\text{m}$ .

Los resultados obtenidos de la caracterización química de la planta indican que el contenido de humedad de la materia es muy elevado siendo del  $80.81\pm 0.369\%$  para las hojas y  $61.62\pm 2.196\%$  para la cabeza de la planta previo al acondicionamiento de la materia. La operación del prensado redujo una cuarta parte el contenido de humedad de las hojas y una tercera parte la de las piñas, logrando porcentajes de humedad en el bagazo del  $61.77\pm 0.006\%$  y  $41.95\pm\%$  respectivamente.

Así mismo, del análisis de ART se observó que su contenido en los extractos de la materia cruda resultaron bajos de acuerdo a lo esperado,  $86.39\text{ g/L}$  para el extracto de la piña y  $36.9\text{ g/L}$  extracto de la hoja. No obstante, al realizar el cocimiento del jugo de la piña se observó que el contenido de azúcares se triplicó, esto como resultado del desdoblamiento de la inulina por efecto de la temperatura durante la hidrólisis, mientras que para las hojas se duplicó.

Del estudio realizado para la identificación de azúcares en la piña únicamente se pudo observar la presencia de fructosa con una concentración de  $20.59\text{ g/L}$ , aunque se registró la presencia de una gran cantidad de inulina, misma que dio origen a diversos azúcares después de la cocción, siendo los azúcares detectados sacarosa, glucosa, y fructosa cuyas respectivas concentraciones fueron de  $19.49\text{ g/L}$ ,  $6.57\text{g/L}$  y  $206.05\text{g/L}$ . Éste último valor confirma que el pico localizado a un tiempo de retención de  $4\text{ min}$  corresponde a la inulina que es el azúcar característico del agave *Tequilana Weber*. Respecto a las hojas en ellas se pudo observar una mayor cantidad de picos en los cromatogramas, a pesar de ello sólo fue posible identificar tres de los azúcares presentes. Glucosa  $10.18\text{g/L}$ , manosa  $13.56\text{g/L}$  y fructosa  $19.49\text{g/L}$ .

Finalmente los estudios demostraron que el bagazo de la piña el cual representa el 62.08% del peso de la piña contiene un 55.11% de celulosa y un 10.31% de hemicelulosa mientras que el bagazo de las hojas está formado por el 67.54% en peso de las mismas, se encuentra formado por un 45.34% de celulosa y 13.95% de hemicelulosa. De lo anterior se determina que la planta de agave *Tequilana Weber* es un cultivo que presenta un alto potencial para su uso integral como materia prima en la producción de bioetanol.

Si bien es cierto que dicho cultivo se adapta a zonas que resultan con características marginales, existen características geográficas y climatológicas que favorecen su crecimiento y desarrollo. El estudio realizado determinó que los estados con características óptimas para el crecimiento del cultivo son, Aguascalientes, Edo. México, Hidalgo, Morelos, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, San Luis Potosí, Sinaloa, y Tlaxcala, cuya producción de bioetanol a partir de tierras de agostadero, sin actividad agropecuaria o forestal y sin vegetación haciendo uso integral del cultivo sería de 1.74551535 billones de litros, que tomando en cuenta la demanda de gasolina por día cubriría un periodo de poco más de 25 años. Obteniendo la mayor producción del estado de Nuevo León con 627884.01 millones de litros. Ahora bien, si se toma en cuenta la producción de los estados con características subóptimas dicho periodo aumenta a 115 años y medio.

Lo anterior indica que el empleo del agave *Tequilana Weber* como materia prima en la producción de bioetanol, representa una oportunidad relevante para la producción de éste biocombustible a bajos costos, además de contribuir con la solución a la problemática ambiental generada por los desechos agroindustriales. Sin embargo, las posibilidades de que sea adoptada por la industria dependen del ingenio e implementación del mejor y más viable pre-tratamiento de la biomasa, considerado el punto clave de la producción. Así como un eficiente proceso de hidrolizado y purificación del producto final. Por tanto, la inversión en este tipo de investigaciones es de vital importancia no sólo para el avance científico sino también para el desarrollo económico, ambiental, social y humano.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

Adler E. (1977). Lignin chemistry: past, present and future. *Wood Sci. Technol.* 11: 169-218

AIE (Agencia Internacional de Energía). (2004). Biofuels for transport: an international perspective. 9 rue de le Fédération, 75739 París Cedex 15, France. Disponible desde [www.iea.org](http://www.iea.org).

Alén, R., (2000). Structure and chemical composition of Wood. In: Stenius,P. Ed., *Forest Products Chemistry*. Fapet Oy, Helsinki, pp. 12-57

Ariza, L., Caparros, S., Jiménez, L. (2005). Subproductos en la fabricación de pastas. *Autohidrólisis de hemicelulosas*. Ed. Gráficas Sol. ISBN: 84-96302-10-5.

Aro N., Pakula T. & Penttila M. (2005).Transcriptional regulation of plant cell wall degradation by filamentous fungi.*FEMS Microbiol. Rev.* 29: 719–739.

Ballesteros I., Oliva J. M., Saez F., & Ballesteros M. (2001). Ethanol production by simultaneous saccharification and fermentation of olive oil extraction.*Appl. Biochem. Biotechnol.* 91/93: 237-252.

Biofields. (2010). Energía Renovable y Sustentable. Disponible desde <http://www.biofields.com>

Borland AM, Griffiths H, Hartwell J, Smith JAC (2009). Exploiting the potential of plants with crassulacean acid metabolism for bioenergy production on marginal lands. *Journal of Experimental Botany*, 60, 2879–2896. *Campaniflorae, Umbelliflorae*. *Proc. California Acad. Sci.* 41: 371-387.

Carpita, N. C., Gibeaut, D.M., (1993). Structural models of primary-cell walls in flowering plants- consistency of molecular-structure with the physical properties of the walls during growth. *Plant L.* 3 (1),1-30.

Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO). [www.conabio.gob.mx](http://www.conabio.gob.mx).

Consejo Regulador del Tequila, (CRT). [www.crt.org.mx](http://www.crt.org.mx)

Dunnet, A. J., Shah, N. (2007). Prospects for bioenergy.*Journal of biobased materials and bioenergy.*1:1-18.

- Esau, K. (1977). *Anatomy of Seeds Plants*. 2nd Ed. John Wiley & Sons, New York, 550 pp.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación). (2008). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Biocombustibles: perspectivas, riesgos y oportunidades*. Viale delle Terme di Caracalla 00153 Roma, Italia. Disponible desde [www.fao.org](http://www.fao.org). ISSN 0251-1371
- FAO. (1994). *ECOCROP 1. The adaptability level of the FAO crop environmental requirements database. Versión 1.0. AGLS*. FAO. Rome, Italy
- FAO (1996). *Zonación agroecológica: Guía general*. Boletín de Suelos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.
- FAO. (2010). Statistics Division. Available at: <http://faostat.fao.org>
- Fengel, D., Wegener, G. (1984). *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*. Walter de Gruyter & Co., Berlín.
- Fernández J. (1995). *La biomasa como fuente de energía y productos no alimentarios., La biomasa como fuente de energía y productos para la agricultura y la industria. Serie ponencias*. Editorial CIEMAT. Madrid.
- Flores y Valdés (1988). *Regiones Áridas y Semiáridas*. pp. 11-17
- Flores L., H. E. (2000). *Informe final del Proyecto CONACYT Análisis agroecológico del Agave Tequilana Weber, con énfasis en problemas fitosanitarios*. INIFAP-Universidad de Guadalajara. Documento de circulación interna. Tepatitlán, Jalisco. 153 p.
- Flores L., H. E., K. F. Byerly M., J. J. Aceves R., y J. A. Ruiz C. (2002). *Diagnóstico del sistema de producción de agave con énfasis en problemas fitosanitarios*. pp. 63-95. In *Análisis agroecológico de Agave tequilana Weber var. Azul con énfasis en problemas fitosanitarios en Jalisco*. Publicación Especial Núm. 1. INIFAP-CIRPAC-Campo Exp. Altos de Jalisco. Tepatitlán, Jalisco, México.
- Flores L., H. E., J. A. Ruiz C., R. A. Martínez P., D. R. González E. y L. Nava V. (2003). *Determinación del potencial productivo de especies vegetales para el estado de Jalisco: Distrito de Desarrollo Rural 066 Lagos de Moreno. Folleto Técnico Núm. 2*. INIFAP-CIRPAC-C.E. Altos de Jalisco. Tepatitlán, Jal. México. 54 p.
- Garcia-Reyes BR, Rangel-Mendez JR. (2009). *Contribution of agrowaste material main components (hemicelluloses, cellulose, and lignin) to the removal of chromium (III) from aqueous solution*. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 84, 1533–1538.

GBEP (Asociación Mundial de la Bioenergía). (2007). A review of the current state of bioenergy develops in G8+5 countries. Roma, Secretaría de la GBPE, FAO.

Gentry, H. S: and J. R. Sauck. (1978). The stomatal complex in Agave: groups deserticolae.

Gentry, A. H. (1982). Patterns of neotropical plant species diversity. In: Wallace, B. & G. T. Prance (eds.) Evolutionary Biology.- Plenum Press, New York.

Gibson, A. C., and P. S. Nobel. (1986.) The Cactus Primer. Harvard University Press. Cambridge. 286 p. López S., J. L., J. A. Ruiz C., J. J.

González-César, R., (2002). Sustentabilidad de la producción e introducción de alcohol como carburante para uso en automotores en la Ciudad de México. Masters thesis. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), México.

Hernández M. (1997). Decoloración de efluentes alcalinos de industrias papeleras por *Strptomycesspp.*: aspectos químicos y enzimáticos. Tesis doctoral. Universidad de Alcalá de Henares.

Hernández Ma. Teresa (2007). Tendencias actuales en la producción de bioetanol.

Hernández-Salas JM, Villa-Ramírez MS, Veloz-Rendón JS, Rivera-Hernández KN, González-César RA, Plascencia-Espinosa MA, Trejo-Estrada SR. (2009). Comparative hydrolysis and fermentation of sugar cane and agave bagasse. *BioresTechnol* 100:1238–1245

Higuchi T. (1990). Lignin biochemistry: biosynthesis and biodegradation. *Wood Sci. Technol.* 24: 23-63.

Hill, J., Nelson, E., Tilman, D., Polasky, S., Tiffany, D., (2006). Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. *PNAS* 103 (30), 11206–11210.

Homme C. L., Peschet J. L., Pulgserver A., Biagini A. (2001). Evaluation of fructans in various fresh and stewed fruits by high-performance anion-exchange chromatography with pulsed amperometric detection. *Journal of Chromatography*; 90; 291-997

Hutchinson, J. (1979). The families of flowering plants Third ed. Oxford University Press, West Germany. 968 p.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2013). Perspectivas Estadística de los estados de: Aguascalientes, Baja California, Baja California Sur, Campeche, Coahuila, Colima, Chiapas, Chihuahua, Estado de México, Durango, Guerrero, Hidalgo, Morelos,

Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Quintana Roo, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tabasco, Tlaxcala, Veracruz, Yucatán. Diciembre.

Iñiguez-Covarrubias, G., Lange, S., Rowell, R., (2001). Utilization of byproducts from the tequila industry. Part 1: Agave bagasse as a raw material for animal feeding and fiberboard production. *Bioresource Technology* 77 (ER1), 25–32.

Jeffries TW. (1994). Biodegradation of lignin and hemicelluloses. In: *Biochemistry of microbial degradation*. Ratledge C (ed.) Kluwer, Dordrecht, pp. 233–277.

Joseph Jr., H. Ethanol fuel: vehicular application technology. São Paulo: Anfavea, Energy and Environment Division, (2005). Flex fuel technology in Brazil. São Paulo: Anfavea, Energy and Environment Division, 2007.

Lawrence, H.M.G. (1951). *Taxonomy of vascular plants*. McMillan Publishing., Co; Inc. New York.

Lynd L, van Zyl W, McBride J, Laser M (2005) Consolidated bioprocessing of cellulosic biomass: an update. *Curr Opin Biotechnol* 16:577–583

Lynd, L., Cushman, J., Nichols, R., Wyman, C., (1991). Fuel ethanol from cellulosic biomass. *Science* 51, 1318–1323.

Maruyama, K., Goto, C., Numata, M., Suzuki, T., Nakagawa, Y., Hoshino, T., Uchiyama, T., (1996). O-acetylated xyloglucan in extracellular polysaccharides from cell suspension cultures of *Mentha*, *Phytochemistry* 41(5), 1309-1314.

Mosier N. Wyman C. et al., (2005). Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresour Technol* 673-686.

Nobel PS. (1994). *Remarkable agaves and cacti*. New York: Oxford University Press.

Nobel, P. S., and S. D. Smith. (1983). High and low temperature tolerance and their relationships to distribution of agaves. *Plant Cell and Environment*. 6:711-719.

Nobel, P. S., and T. I. Hartsock. (1984). Physiological responses of *Opuntia ficusindica* to growth temperatures. *Physiologia Plantarum* 60: 98-105.

Nobel, P. S. (1988). *Environmental Biology of Agave and Cacti*. Cambridge University Press, New York, 270p.

Nobel, P. S. (1994). *Remarkable Agaves and Cacti*. Cambridge University Press. New York. 166 p.

Nobel, P. S. (1998). Los incomparables Agaves y Cactus. La. Edición en español. Editorial Trillas, S. A. de C. V. México, D.F. pp. 37, 39,46-49.

Nobel, P.S. (Ed.), (1988). Environmental Biology of Agaves and Cacti. Cambridge University Press, New York, pp. 270.

Nobel, P.S., Castañeda, M., North, G., Pimienta, B.E., Ruiz, A., (1998). Temperature influences on leaf CO<sub>2</sub> exchange, cell viability and cultivation range for Agave tequilana. J. Arid Environ. 39, 1±9.

Oliver R. Indervildi, et. al,( 2011). Energy and Environmental Science, núm. 9

PEMEX, (2013). Anuario estadístico

Pimentel, D., (2003). Ethanol fuels: energy balance, economics, and environmental impacts are negative. Natural Resources Research 12 (2), 127–134.

Pimentel, D., Moran, M.A., Fast, S., Weber, G., Bukantis, R., Balliett, L., Boveng, P., Cleveland, C., Hindman, S. and Young, M. (1980). Biomass Energy from Crop and Forest. Residues Science: 212: 1110-1115.

Pimienta B., E., and P. S. Nobel. (1998). Vegetative, reproductive, and physiological adaptations to aridity of pitayo (*Stenocereus queretaroensis*) Cactaceae Economic Botany. 52: 401-411.

Pimienta B., E., C. Robles M., J. A. Ruiz C., P. S. Nobel y J. García G. (1999). Regiones térmicas óptimas y marginales para el cultivo de Agave tequilana en el Estado de Jalisco. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco, México. 47 p.

Pimienta B., E., J. Zañudo, E. Yopez, E., and P.S. Nobel. (2000). Seasonal variation of net CO<sub>2</sub> uptake for cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) and pitayo (*Stenocereus queretaroensis*) in a semiarid environment. Journal of Arid Environments 44: 73-83.

Potter, M., & Wiggert, D. (2006). Mecánica de Fluidos. México D.F.: Thompson

Prasad, S., Singh, A., Joshi, H. C. (2007). Ethanol as an alternative fuel from agricultural, industrial and urban residues. Resources, Conservation and Recycling. 50: 1-39.

Rosa, M., A. Vieira y M.L. Bartolomeu, (1986). Production of high concentration of ethanol production found. Biotechnol. Industr. Ferm. Res., 4, 63-79.

Rubin EM. (2008). Genomics of cellulose biofuels. Nature4: 841-845.

Ruiz C., J. A., Flores L. H. E., Martínez R. A. P. (1997b). Determinación del potencial productivo de especies vegetales para el distrito de desarrollo rural de Zapopan Jalisco. Folleto Técnico Núm. 5. INIFAP-CIRPAC-C.E. Centro de Jalisco. Tlajomulco de Zúñiga, Jal. México. 60p.

Ruiz C., Byerly K. F., Martínez R. A., González D. R., Nava E. L., De la Paz S., Alemán P., Aceves J. y Flores H. E. L. (1998). Determinación del potencial productivo de especies vegetales para el distrito de desarrollo rural de Ameca, Jalisco. Folleto Técnico Núm. 6. INIFAP-CIRPAC-C.E. centro de Jalisco. Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco México. 60 p.

Ruiz C., J. A., G. Medina, I. J. González, C. Ortiz, H. E. Flores L., R. A. Martínez y K. F. Byerly. (1999). Requerimientos agroecológicos de cultivos. Libro Técnico Núm. 3. INIFAP-CIRPAC. Ed. Conexión Gráfica. Guadalajara, Jalisco, México México. 362 p.

Ruiz C., J. A., I. J. González A., J. R. Regalado R., J. Anguiano C., I. Vizcaíno V. y D. R. González E. (2003a). Recursos edafo-climáticos para la planeación del sector productivo en el Estado de Jalisco. Libro Técnico Núm. 2. INIFAP-CIRPAC. Ed. Conexión Gráfica. Guadalajara, Jalisco. 172 p.

Saldaña, R. A.; Serwatowski, H. R.; Saldaña, R. N.; Gutiérrez, V. C.; Cabrera, S. J. M. y García, B. S. (2011). Determinación de algunas propiedades físicas de Agave tequilana Weber para mecanizar la cosecha. Rev. Mex. Cienc. Agríc. 3(3):45- 465.

Sánchez Yáñez Juan Manuel et. al Manual de Técnicas de Microbiología Aplicada

Santiago DI, Rodríguez De Garcia N, Mogollan G. (2002). Potential for pulp and paper of agave plant fibers. Revista Forestal Venezolana, 46, 19–27.

Sistema de información Agroalimentaria de Consulta (SIACON)

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), (2013). [www.siap.gob.mx](http://www.siap.gob.mx)

Sims, I.M., Munro, S.L.A., Currie, G., Craik, D., Bacic, A., (1996). Structural characterization of xyloglucan secreted by suspension-cultured cells of *Nicotiana glauca*. Carbohydr. Res. 293 (2), 147-172.

Smith AM (2008) Prospects for increasing starch and sucrose yields for bioethanol production. The Plant Journal, 54, 546–558.

Somerville C (2007) Biofuels. Current Biology, 17, 115–119.

Stuart R. Paul, El-Halwagi Mahmoud M., (2012). Integrated Biorefineries, Design, Analysis and Optimization Ed. A Chapman all book. Pp.461

Szarek SR (1979) Occurrence of Crassulacean acid metabolism – asupplementary list during 1976-1979. *Photosynthetica*, 13, 467–473.

Szarek SR, Ting IP (1977) Occurence of Crassulacean acid metabolism among plants. *Photosynthetica*, 11, 330–342.

Wattendorff J. and P.J. Holloway. (1980). Studies on the ultrastructure and histochemistry of plant cuticles: The cuticular membrane of *Agave americana* L. in situ: *Ann. Bot.* 46:13-28.

Vargas T., V. M. (2004). Evaluación del potencial agroecológico del cultivo de *Agave tequilana* Weber en el Estado de Jalisco. Tesis de Licenciatura. Universidad de Guadalajara, Facultad de Agronomía. Zapopan, Jalisco. 46 p

Vries R. P., Visser J. (2001). *Aspergillus* Enzyme Involved in Degradation of Plant Cell Wall Polysaccharides. *Microbiol. Molec. Biol.* 65:497-522.

Wheals, A. E., Basso, L. C., Alves, D. M., Amorim, H. V. (1999). Fuel ethanol after 25 years. Elsevier Science. Volumen (17): 482-487.