

4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1 Tuna

4.1.1 Origen

La familia de las cactáceas (*Cactaceae*) es endémica del Continente Americano, y fue distribuida con relativa facilidad en el mundo, debido a su fácil proliferación en las regiones áridas y semiáridas (Flores – Valdez et al., 1997; Flores – Valdez y Corrales – García, 2003). Se considera a México uno de los centros de origen de la familia *Cactaceae* de los géneros *Opuntia* y *Nopalea*; el nopal tunero pertenece al género *Opuntia* y es de este nopal del cual se obtiene el fruto conocido en México como tuna (*Opuntia spp.*) (Flores – Valdez et al., 1997; Esquivel, 2004; Reyes – Agüero et al., 2004).

Este fruto, se desarrolla de manera natural desde hace miles de años en las zonas áridas y semiáridas de México, en tiempos prehispánicos algunas variedades fueron domesticadas y desde entonces han tenido diversos usos siendo los principales: como alimento de consumo humano, en la preparación de bebidas, uso medicinal y también para forraje de animales (Bravo – Hollis y Sánchez – Mejorada, 1991; ASERCA, 1999a).

Existe gran variedad de subespecies del género *Opuntia* productoras de tuna, pero las de mayor consumo son las pertenecientes a los grupos *Opuntia ficus-indica*, *O. streptacantha*, *O. robusta*, y *O. leucotricha* (Bravo-Hollis y Sánchez-Mejorada, 1991; Bravo-Hollis y Scheinvar, 1995). Los nombres comunes con los que se conocen a estas variedades son: tuna de agua, tuna fina, tuna blanca, tuna de Castilla, tuna taponá, tuna Cardona, tuna memela y tuna cascarona; por mencionar algunos (Bravo-Hollis y Sánchez-Mejorada, 1991).

4.1.2 Características físicas

La tuna presenta diferentes características dependiendo de la subespecie a la cual se esté refiriendo; en general y de acuerdo con un estudio hecho por Reyes – Agüero et al. (2004), donde se evaluaron las variaciones morfológicas de frutos recolectados en 21 plantíos del tipo solar, experimental y comercial, se puede decir que las variedades comercializadas en México se encuentran dentro de los parámetros que se muestran en la Tabla I.

Tabla I. Rango de valores para algunas características físicas de la tuna de diversas variedades.

Característica	Rango de valores
Peso total	40 — 190 g
Peso cáscara	14 — 100 g
Peso pulpa	45 — 130 g
No. de semillas	65 — 480
Diámetro semillas	0.1 — 0.5 cm
Longitud fruto	6.0 — 10.0 cm
Diámetro fruto	3.5 — 6.5 cm
Sólidos solubles pulpa	10.0 — 17.0 °Bx

Adaptada de Reyes – Agüero et al., 2004.

De acuerdo con otros autores (Villarreal et al., 1964; Paredes, 1977), en proporción la cáscara y la pulpa representarían del 40 al 50% cada una y las semillas entre un 5 y un 10%.

4.1.3 Composición

De acuerdo con un análisis realizado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) en el 2006, el valor nutritivo de una porción comestible de tuna de variedad verde se muestra a continuación (Tabla II).

Tabla II. Valor nutritivo de 100g de porción comestible de tuna verde.

Nutriente	Valor	
Agua	87.55	g
Energía	41.00	kcal
Proteínas	0.73	g
Grasa total	0.51	g
Carbohidratos	9.57	g
Fibra dietética total	3.60	g
Cenizas	1.64	g
Minerales		
Calcio, Ca	56.00	mg
Fierro, Fe	0.30	mg
Magnesio, Mg	85.00	mg
Fósforo, P	24.00	mg
Potasio, K	220.00	mg
Sodio, Na	5.00	mg
Zinc, Zn	0.12	mg
Cobre, Cu	0.08	mg
Selenio, Se	0.60	mcg
Vitaminas		
Vit. C, ác. ascórbico	14.000	mg
Tiamina	0.014	mg
Riboflavina	0.060	mg
Niacina	0.460	mg
Vit. B6	0.060	mg
Folato total	6.000	mcg
Ácido Fólico	0.000	mcg
Vit. B12	0.000	mcg
Vit. A	43.000	IU
Retinol	0.000	mcg

Tomada de USDA, 2006.

Para la obtención de estos valores se consideró únicamente la parte comestible, es decir, no se consideraron ni la cáscara ni las semillas. Los valores presentados por la USDA, son similares a los presentados por Bravo – Hollis y Sánchez-Mejorada (1991) para la composición de tuna Cardona, dichos valores porcentuales se muestran en la Tabla III.

Tabla III. Composición porcentual de la tuna Cardona.

Nutriente	Valor porcentual			
	Tuna entera	Cáscara	Pulpa	Semilla
Agua	85.30%	88.54%	87.30%	96.30%
Proteínas	0.82%	0.43%	0.50%	9.30%
Grasa total	0.58%	0.22%	0.50%	13.10%
Carbohidratos	8.78%	1.41%	0.10%	50.30%
Fibra dietética total	3.53%	7.80%	11.50%	13.00%
Cenizas	0.99%	1.60%	0.10%	1.60%

Tomada de Bravo – Hollis y Sánchez-Mejorada, 1991.

4.1.4 Producción

La producción de nopal tunero y por ende de tuna, de acuerdo con Flores – Valdez et al. (1997) y Flores – Valdez y Corrales – García (2003) se ha llevado a cabo en México en tres tipos de cultivos: silvestres, huertos familiares y plantaciones.

- **Nopaleras silvestres.** Se considera que existen tres millones de hectáreas distribuidas en las regiones áridas y semiáridas del país, ubicadas principalmente en los estados de Baja California Norte y Sur, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, norte de Sinaloa, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Jalisco, Guanajuato, Hidalgo y

Querétaro. El uso principal tanto del nopal como de la tuna de estos cultivos ha sido forraje para ganado y en algunos estados la recolección de tuna Cardona (*Opuntia streptacantha*).

- **Huertos familiares.** Su extensión es desconocida y en su mayoría se localizan en los estados de Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Guanajuato y Jalisco; se han dedicado a la producción de nopal y tuna para el autoconsumo y venta en poblaciones aledañas. Los frutos obtenidos en estos huertos son de mejor calidad que los silvestres pero debido al incremento de las demandas, se han ido eliminando las nopaleras de los huertos y dado paso a las plantaciones.
- **Plantaciones.** Este sistema surge a mediados del siglo XX, tras seleccionar las variedades de tuna de mejor calidad de los huertos familiares y cultivarlas en parcelas; siendo los pioneros los estados de Zacatecas, San Luis Potosí, Guanajuato, Jalisco, Aguascalientes y México.

A pesar de que México ha sido considerado como uno de los centros de origen del nopal y la tuna (Flores – Valdez y Corrales – García, 2003), tiene tan sólo alrededor de medio siglo de experiencia en su cultivo en plantíos, mientras que otros países como Italia tienen más de un siglo por lo que tienen mayor experiencia en cuanto al fortalecimiento de la producción (Flores – Valdez et al., 1997).

4.1.5 Manejo poscosecha

Métodos de cosecha para tuna. La cosecha de la tuna aún se efectúa de manera manual, siendo los dos métodos más utilizados el corte usando torción y el corte auxiliado con cuchillo, éste último genera un menor daño al fruto. Una buena práctica al cosechar es utilizar guantes tanto para proteger a la mano de las espinas o gloquídeas, así como al fruto de la presión ejercida por los dedos. Asimismo es preferible realizar la cosecha por la mañana, dado que la temperatura es baja y la humedad relativa alta, favoreciendo la turgencia de los tejidos lo cual facilita el corte (Corrales-García, 2000).

Prácticas poscosecha. De acuerdo con Corrales – García (2000), las principales actividades poscosecha son: el despeinado o remoción de espinas, el encerado, la selección, el empaque, el almacenamiento y el transporte. Existen algunas consideraciones para el almacenamiento entre las cuales se encuentran la temperatura y la humedad relativa óptimas (Kader, 2005):

- **Temperatura óptima.** Se encuentra entre los 6 y 8 °C, teniendo un máximo de almacenamiento de 2 a 5 semanas dependiendo la variedad, la madurez y la temporada de cosecha del fruto.
- **Humedad relativa óptima.** Debe encontrarse preferentemente entre el 90 y 95 % HR, utilizando como empaque bolsas perforadas de plástico para evitar la pérdida de humedad.

Si las condiciones de temperatura en el almacenamiento son menores a 5°C, la fruta sufre daño en la cáscara, lo cual genera depresiones o picado, además de manchas de color pardo en la superficie (Kader, 2005).

Propiedades de las frutas. En el periodo de poscosecha las propiedades de las frutas tienden a sufrir cambios, los cuales se observan principalmente al paso del tiempo en aspectos como: sabor, color, aroma, textura, tamaño y cuerpo. El grado de madurez es un factor importante para la aceptabilidad en el mercado del fruto fresco, mientras que para la generación de productos procesados es de mayor importancia el conocimiento de los cambios experimentados por los frutos desde su cosecha (Eskin, 1990).

- **Cambios de color.** Para muchos de los frutos uno de los primeros cambios que se llevan a cabo es la pérdida de color verde y el desarrollo de los colores característicos de cada fruta (Eskin, 1990). En el caso de la tuna esto va a depender de la variedad seleccionada, ya que como reportan Bravo-Hollis y Sánchez-Mejorada (1991), existen de color verde claro, amarillento, rojizo, rosados, blancos y rosados purpúreos. El color de los frutos durante su almacenamiento y procesado sufre degradación, por lo cual es necesario tener en cuenta las condiciones en las que se den ambos procesos para disminuir la pérdida (Eskin, 1990).
- **Textura.** Las paredes celulares, su estructura y organización, así como los compuestos localizados en interior de las células están fuertemente relacionadas con la textura del alimento. Durante la maduración existe una pérdida de textura ocasionada por el deterioro de los constituyentes de la pared celular (Eskin, 1990).

4.1.6 Producción en México y principales productores a nivel mundial

De acuerdo con la FAO (1995), la tuna es producida en alrededor de veinte países en el mundo, pero en la mayoría es un producto secundario y no proviene de plantaciones especializadas por lo cual su mercado es nacional. Entre esos países se encuentran México, Italia, Sudáfrica, Chile, Israel, Colombia y Estados Unidos cuya producción llega al mercado internacional, de los cuales los tres primeros representan aproximadamente el 96% de la producción mundial (Tabla IV).

Tabla IV. Composición porcentual de la tuna Cardona.

País	Superficie de producción (ha)	Rendimiento promedio (ton/ha)	Producción (ton/año)	Exportación (ton/año)	Consumo per Cápita (kg/persona)
México	72500	6.75	489500	7500	4.38
Italia	2500	20.00	50000	15000	0.61
Sudáfrica	1500	10.00	15000	250	0.40

Tomada de Flores – Valdez et al., 1997; ASERCA, 1999b; Flores –Valdez y Corrales – García, 2003.

México presenta dos grandes ventajas frente a estos países, la superficie de producción y las distintas variedades que se producen ya que en los otros países la producción es casi en su totalidad de una sola variedad. Sin embargo, a pesar de ser el primer productor a nivel mundial presenta el rendimiento promedio más bajo de entre los países que comercian en el mercado internacional. El consumo per cápita en el país es el más alto a nivel mundial y la exportación es de aproximadamente el 2%, principalmente destinadas a satisfacer la demanda de Estados Unidos. (Flores – Valdez et al., 1997; ASERCA, 1999b; Flores –Valdez y Corrales – García, 2003).

Italia por su parte, tiene una la mayor parte de su superficie de producción ubicada en la Isla de Sicilia y el fruto que produce es de la variedad *Opuntia ficus*

– *indica L.* Si bien dicha superficie es en mucho menor a la utilizada en México, el rendimiento promedio que presenta es aproximadamente dos veces mayor. Es el primer exportado a nivel mundial, introduciendo al mercado internacional el equivalente al 30% de su producción, destinada principalmente al mercado de Europa Occidental y Países Árabes (Flores – Valdez et al., 1997; ASERCA, 1999b; Flores –Valdez y Corrales – García, 2003).

Sudáfrica presenta una superficie de cultivo correspondiente al 3% de la superficie de México con un rendimiento casi del doble. Exporta el 2% de su producción siendo sus principales destinos Inglaterra y Francia (Flores – Valdez et al., 1997; Flores –Valdez y Corrales – García, 2003).

Los cuatro países restantes tienen una producción menor a las 8000 ton y sus superficies de cultivo son menores a las 300 hectáreas, exceptuando Chile que tiene 1000 ha. De entre esos países es importante resaltar a Israel ya que es el segundo consumidor de tuna, teniendo un consumo per cápita de 2.98 kg, y además presenta el rendimiento más alto al producir en promedio 25 ton/ha. (Flores – Valdez et al., 1997; Flores –Valdez y Corrales – García, 2003).

4.1.7 Usos

La tuna puede ser utilizada en su totalidad como se muestra a continuación:

- **Productos de la industria extractiva y de la biotecnológica:** espesantes y aglutinantes, obtenidos a partir del mucílago y la cáscara; colorantes de

la cáscara y el jugo; aceite de las semillas, o bien si se mezcla con la cáscara una pasta forrajera.

- **Productos de la industria de bebidas:** jugos, néctares, refrescos, vinos, licores y aguardientes; preparados a partir de la pulpa de la tuna.
- **Productos de la industria alimentaria tradicional y tecnificada:** queso de tuna, jaleas, mermeladas, dulces y recientemente yogurt; elaborados a partir de la pulpa y en ocasiones con cierta proporción de cáscara (Corrales – García y Flores – Valdez, 1996; Flores – Valdez et al., 1997).

4.2 Jugos de fruta

4.2.1 Normatividad para jugo de frutas

En la actualidad existe una gran tendencia a estandarizar los procesos de manufactura de todo tipo de productos y la industria de alimentos no queda exenta de ello. En el caso de jugo de fruta el CODEX Alimentarius (2005) lo define como:

...el líquido sin fermentar, pero fermentable, que se obtiene de la parte comestible de frutas en buen estado, debidamente maduras y frescas o frutas que se han mantenido en buen estado por procedimientos adecuados, inclusive por tratamientos de superficie aplicados después de la cosecha...

...podrán elaborarse junto con sus pepitas, semillas y pieles, que normalmente no se incorporan al zumo (jugo), aunque serán aceptables algunas partes o

componentes [de las mismas]... que no puedan eliminarse mediante las buenas prácticas de fabricación...

4.2.2 Elaboración de Jugos de fruta

En la elaboración de jugo de frutas existen pasos fundamentales, en esencia el proceso no ha cambiado desde hace treinta años pero si han evolucionado los equipos y las técnicas con los que se realiza cada paso. Downes (1990) presenta un esquema general del proceso, considerando las siguientes etapas:

Recepción de la materia prima. La fruta para jugos es generalmente de segundo grado, debido a que no cumple con las especificaciones de tamaño y forma para ser vendida fresca, pero debe encontrarse sin daños severos y estar libre de putrefacción.

Lavado de la fruta. Esta operación tiene la finalidad de limpiar de cualquier suciedad la materia prima y evitar que el jugo se contamine.

Molienda. Este paso se da en frutas duras y tiene la función de reducir a puré las mismas para facilitar la salida del jugo. Algunos de los molinos pueden además separar trozos de tallos u hojas que estuvieran presentes.

Prensado. El jugo se obtiene al generar presión sobre las frutas donde es fácil su extracción o el puré obtenido de la molienda y es depositado en un contenedor.

Pretratamiento con enzimas. Algunas frutas como la frambuesa, la fresa, la ciruela, la grosella y la cereza; el prensado o la molienda no son suficientes para extraer por completo su jugo. Por ello es necesario el uso de enzimas que

destruyan la estructura celular disolviendo las pectinas, liberando de ese modo el jugo.

Clarificado. La finalidad de este paso es eliminar los sólidos suspendidos en el producto, principalmente se da por filtración ya sea simple, por membrana o ultrafiltración con presiones de 1 a 10 bares.

Concentrado. Esta operación se lleva a cabo por tres razones:

- 1) Disminuir el volumen del líquido y por lo tanto los costos de almacenamiento, empaque y transportación.
- 2) Incrementar los sólidos solubles mejorando la conservación del producto.
- 3) Como un paso previo al secado o cristalización.

Los métodos utilizados principalmente para llevar a cabo este proceso son la evaporación y el concentrado por ósmosis inversa.

Pasteurización. Su principal función es la de eliminar microorganismos patógenos del producto.

4.2.3 Normatividad para jugo concentrado de frutas

El CODEX Alimentarius en su norma general para zumos (jugos) y néctares de fruta (2005), establece como definición para jugo concentrado la siguiente:

Por zumo (jugo) concentrado de fruta se entiende el producto que se ajusta a la definición dada anteriormente (de zumo o jugo de fruta), salvo que se ha eliminado físicamente el agua en una cantidad suficiente para elevar el nivel de

grados Brix al menos en un 50% más que el valor Brix establecido para el zumo (jugo) reconstituido de la misma fruta...

...podrán contener componentes restablecidos de sustancias aromáticas y aromatizantes volátiles... todos ellos que deberán obtenerse por procedimientos físicos adecuados y que deberán proceder del mismo tipo de fruta. Podrán añadirse pulpa y células obtenidas por procedimientos físicos adecuados del mismo tipo de fruta.

4.3 Concentración a vacío

La evaporación, de acuerdo con Geankoplis (1998), es la operación por medio de la cual “se elimina el vapor formado por la ebullición de una solución líquida de la que se obtiene una solución más concentrada”. Entre las consideraciones necesarias para seleccionar el tipo de evaporador a utilizar se encuentran: la concentración inicial de sólidos en el líquido, la solubilidad que tienen éstos, si la solución es sensible al calor, la presión y temperatura que se utilizarán y la generación de incrustaciones (Geankoplis, 1998).

Geankoplis (1998) sugiere para la evaporación de jugos de fruta, el uso de velocidades de circulación altas, para evitar que la materia en suspensión se adhiera a las paredes y se quemara deteriorando las propiedades del mismo. Recomienda además utilizar presiones de vacío, permitiendo tener puntos de ebullición más bajos para evitar daño por temperatura.

4.4 Propiedades reológicas de los jugos

4.4.1 Definiciones

De acuerdo con Ibarz et al. (2006) la mayoría de los productos líquidos o semilíquidos obtenidos a través del procesamiento de frutas son comercializados como purés o jugos, pudiéndose encontrar éstos últimos como concentrados, clarificados, despectinizados o no despectinizados.

La determinación de las propiedades reológicas de los jugos de fruta es de gran importancia para generar los cálculos adecuados para su calentamiento, enfriamiento y transporte por bombeo dentro de las plantas procesadoras de alimentos (Chen, 1993). Así mismo dichas propiedades son de gran relevancia para el control de calidad del jugo y además, existe una correlación que las relaciona con la aceptabilidad por parte del consumidor (Vitali y Rao, 1982; Costell, 1997).

La reología de acuerdo con Bolmstedt (2000) “se define como la ciencia de la deformación y el flujo de la materia”, incluyendo desde los gases hasta los sólidos. Este mismo autor, señala que en la ciencia de alimentos, la reología es una herramienta útil para la determinación de la consistencia de diversos productos; ya que esta propiedad se encuentra definida por la viscosidad y la elasticidad.

De acuerdo con Rao (1986), existen diferentes tipos de comportamientos reológicos para los fluidos alimenticios, los cuales se pueden clasificar en dos grandes grupos:

Fluido Newtoniano. Es aquel fluido que presenta una viscosidad constante dependiente de la temperatura pero independiente de la velocidad de deformación que le sea aplicada (Rao, 1986; Bolmstedt, 2000).

Fluido no Newtoniano. Este tipo de fluidos no tienen una sola viscosidad a una temperatura dada, se dice que son dependientes tanto de la temperatura como de la velocidad de deformación y puede ser también dependiente del tiempo (Bolmstedt, 2000). Con base en esta última condición, los fluidos no Newtonianos, explica pueden clasificarse en:

- **Pseudoplásticos**. Para este tipo de fluido la viscosidad decrece conforme se incrementa la velocidad de deformación (Rao, 1986). La razón por la cual se da este comportamiento, explica Bolmstedt (2000), es que al haber mayor velocidad de deformación, las partículas de este tipo de fluidos se reacomodan de tal modo que existe una menor resistencia al flujo y por lo tanto una menor viscosidad.
- **Dilatantes**. La viscosidad de estos fluidos incrementa al mismo tiempo que la velocidad de deformación se acrecienta (Rao, 1986). Este tipo de comportamiento es común en suspensiones de muy alta concentración (Bolmstedt, 2000).
- **Plásticos y plástico de Bingham**. Estos fluidos requieren la aplicación de una fuerza antes de que el material comience a fluir. A dicha fuerza se le conoce como esfuerzo de cedencia (τ_0) (Bolmstedt, 2000).

La viscosidad de los fluidos es la propiedad que establece su resistencia a fluir (Ibarz et al., 2006), para la descripción de esta propiedad explica Steffe (1996), es posible modelar matemáticamente datos experimentales de esfuerzo cortante (τ) y velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$), entre los más conocidos destacan los siguientes modelos matemáticos:

1. Ley de Newton:
$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde: τ es el esfuerzo cortante (Pa)

η es viscosidad aparente (Pa s)

$\dot{\gamma}$ es la velocidad de deformación (1/s)

2. Ley de potencia:
$$\tau = k \dot{\gamma}^n \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde: τ es el esfuerzo cortante (Pa)

k es el coeficiente o índice de consistencia de flujo (Pa sⁿ)

$\dot{\gamma}$ es la velocidad de deformación (1/s)

n es el índice de comportamiento al flujo o índice de flujo

3. Modelo de Bingham
$$\tau = \tau_0 + \eta' \dot{\gamma} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde: τ es el esfuerzo cortante (Pa)

η' es la viscosidad plástica (Pa sⁿ)

τ_0 es el umbral de fluencia (Pa)

$\dot{\gamma}$ es la velocidad de deformación

4. Modelo de Herschel – Bulkley $\tau = \tau_0 + k_H \dot{\gamma}$ (Ec. 4)

Donde: τ es el esfuerzo cortante (Pa)

k_H es el coeficiente o índice de consistencia de flujo (Pa sⁿ)

τ_0 es el umbral de fluencia (Pa)

$\dot{\gamma}$ es la velocidad de deformación (1/s)

Existen además de estas otras muchas ecuaciones matemáticas que pueden utilizarse para modelar fluidos no newtonianos pero éstas son las más prácticas de acuerdo con Ibarz et al. (2006). Este autor señala además, que para fluidos no newtonianos al referirse a la viscosidad, se refiere a la viscosidad aparente la cual se puede obtener con la siguiente ecuación .

Viscosidad aparente $\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$ (Ec. 5)

Donde: η es viscosidad aparente (Pa s)

τ es el esfuerzo cortante (Pa)

$\dot{\gamma}$ es la velocidad de deformación (1/s)

En la siguiente tabla se muestra el comportamiento de algunos fluidos alimenticios (Rha, 1978).

Tabla V. Características de flujo para algunos alimentos líquidos.

Tipo de flujo	Coefficiente de	Índice de flujo	Umbral de fluencia	Ejemplo
Newtoniano	Viscosidad $k > 0$	$n = 1$	$\tau_0 = 0$	Jugos clarificados, aceites leche, jarabes de pastelería
Pseudoplástico	Viscosidad aparente $k > 0$	$0 < n < 1$	$\tau_0 = 0$	Jugos concentrados, cremogenados y purés de fruta, almidón
Plástico de Bingham	Plasticidad constante $k > 0$	$n = 1$	$\tau_0 > 0$	Aderezos de ensalada, salsa de dulce, de chocolate, salsa de catsup
Tipo mixto	Índice de consistencia $k > 0$	$0 < n < 1$	$\tau_0 > 0$	Mermelada, jalea
Dilatante	Índice de consistencia $k > 0$	$1 < n < \infty$	$\tau_0 = 0$	Mantequilla de cacahuete, pasta para salchichas

Adaptada de Rha, 1978.

4.4.2 Efecto de la temperatura en las propiedades reológicas

Considerando que los alimentos líquidos se encuentran bajo diferentes condiciones de temperatura (**T**) desde su procesamiento hasta el consumo por lo cual explica Rao (1986) es necesario conocer sus propiedades reológicas como función de la temperatura. Diferentes modelos matemáticos han sido empleados para expresar tanto la viscosidad aparente (η_a), como el coeficiente de consistencia (**k**) y el índice de flujo (**n**); pero varios autores (Harper y El – Sahrighi, 1965; Vitali y Rao, 1984; Ibarz et al., 2006) coinciden en expresar el efecto de la temperatura a través de una relación tipo Arrhenius (Ec. 6 y Ec. 7).

Efecto de T en la viscosidad $\eta_a = \eta_\infty e^{Ea/RT}$ (Ec. 6)

Donde: η_a es viscosidad aparente (Pa s)

η_∞ es la viscosidad infinita (Pa s)

Ea es la energía de activación (kcal/gmol)

R es la constante universal de los gases (kcal/gmol K)

T es la temperatura (T)

Efecto de T en el coeficiente de consistencia $\tau = k e^{Ea/RT} \dot{\gamma}^{\bar{n}}$ (Ec. 7)

Donde: τ es el esfuerzo cortante (Pa)

k es el coeficiente o índice de consistencia de flujo (Pa sⁿ)

$\dot{\gamma}$ es la velocidad de deformación (1/s)

\bar{n} es el índice de flujo promedio de cada T

Ea es la energía de activación (kcal/gmol)

R es la constante universal de los gases (kcal/gmol K)

T es la temperatura absoluta (K)

El efecto que tiene el incremento en la temperatura es la disminución del coeficiente de consistencia y asimismo de la viscosidad (Ibarz et al., 2006).

4.4.3 Efecto de la concentración en las propiedades reológicas

El efecto de la concentración (**X**) en los fluidos da como resultado el incremento en su viscosidad (Rao, 1986), siendo posible describirla a través de un modelo exponencial (Vitali y Rao, 1984; Vélez – Ruiz y Barbosa – Cánovas, 1998) como se

muestra en la ecuación 8 o por uno de potencia (Harper y El – Sahrigi, 1965) como se puede ver en la ecuación 9.

Efecto de X en el coeficiente de consistencia $k = A_k e^{b_k X}$ (Ec. 8)

Donde: k es el coeficiente o índice de consistencia de flujo (Pa sⁿ)

A_k es una constante de la ecuación

b_k es una constante de la ecuación

X es la concentración (°Bx)

Efecto de X en la viscosidad $\eta_a = a(X)^b$ (Ec. 9)

Donde: η_a es viscosidad aparente (Pa s)

a es una constante de la ecuación

b es una constante de la ecuación

X es la concentración (°Bx)

De acuerdo con varios autores (Harper y El – Salhriqi, 1965; Vitali y Rao, 1984; Vélez – Ruiz y Barbosa – Cánovas, 1998) el efecto de la temperatura y de la concentración pueden ser combinados en una misma ecuación de manera exponencial, tanto para la viscosidad aparente (Rao, 1986) (Ec. 10) como para el coeficiente de consistencia (Ec. 11), o como un polinomio (Ec. 12) (Vélez – Ruiz y Barbosa – Cánovas, 1998). Dichas ecuaciones serán válidas, como explica Rao (1986) dentro de ciertos límites.

Efecto de T y X en la viscosidad $\eta_a = a e^{Ea/RT} X^b$ (Ec. 10)

Donde: η_a es viscosidad aparente (Pa s)

a es una constante de la ecuación

b es una constante de la ecuación

Ea es la energía de activación (kcal/gmol)

R es la constante universal de los gases (kcal/gmol K)

T es la temperatura (K)

X es la concentración (°Bx)

Efecto de T y X en el coef. de consistencia $k = a e^{Ea/RT} b X$ (Ec. 11)

Donde: k es el coeficiente de consistencia (Pa sⁿ)

a es una constante de la ecuación

b es una constante de la ecuación

Ea es la energía de activación (kcal/gmol)

R es la constante universal de los gases (kcal/gmol K)

T es la temperatura (K)

X es la concentración (°Bx)

Efecto de T y X en el coef. de consistencia $\ln k = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{T} \right) + \beta_2 X$ (Ec. 12)

Donde: k es el coeficiente de consistencia (Pa sⁿ)

β_0 es una constante de la ecuación

β_1 es una constante de la ecuación

β_2 es una constante de la ecuación

T es la temperatura

X es el contenido de sólidos (%)