

# PROCESO DE LA INDUSTRIA ALIMENTICIA PARTE II



# CONGELACIÓN EN ALIMENTOS

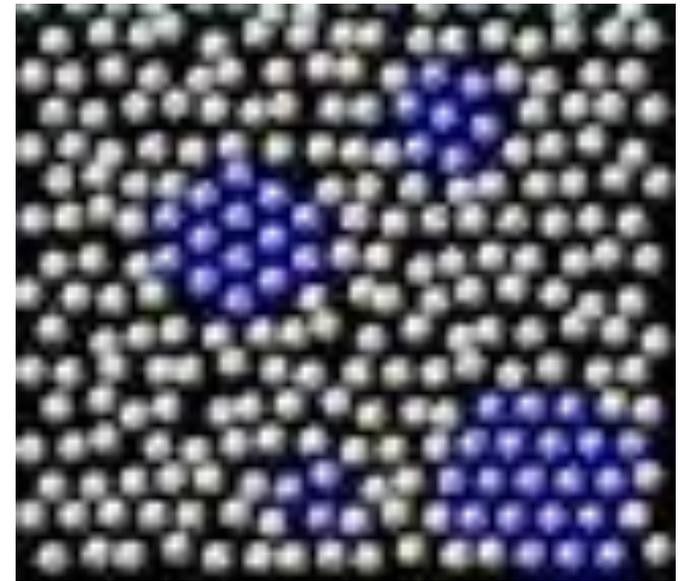
# CONGELACIÓN EN ALIMENTOS: Aspectos tecnológicos.

*En la industria, la congelación es utilizada para la conservación de alimentos, para la obtención de un tipo de estructura en particular y por último para el proceso de fabricación de algunos productos como el helado. Este proceso se lleva a cabo por medio de tres pasos o etapas; el sub-enfriamiento, la nucleación y la propagación de cristales de hielo.*

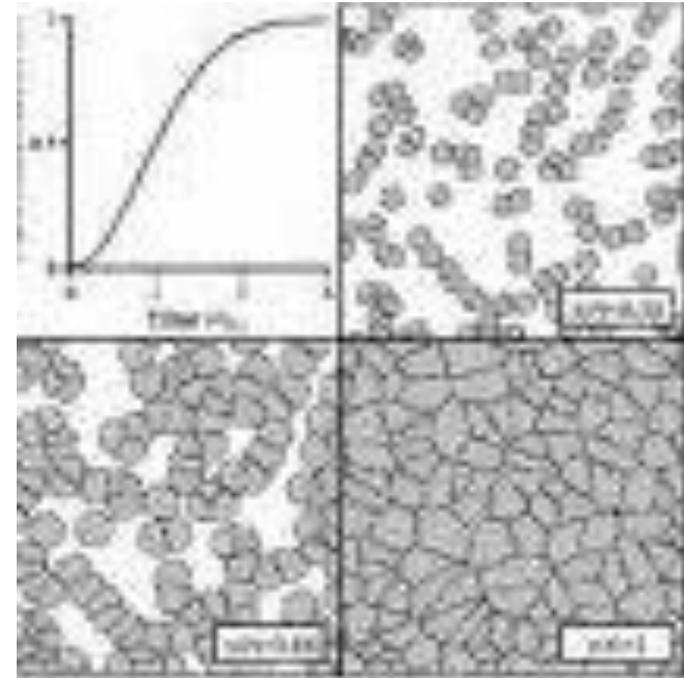
**El proceso de congelación consiste de diferentes etapas:**

- **SUB-ENFRIAMIENTO.** Se debe de pasar una barrera energética antes de que ocurra el proceso de cristalización como punto inicial de congelación (Franks, 1985). El proceso de sub-enfriamiento se observa cuando se retira calor sensible por debajo de 0 °C sin cambio de fase, resultando en un estado termodinámico inestable que inicia la formación de agregados submicroscópicos de agua llegando a una interface conveniente que es necesaria para la transformación de líquido a sólido. El grado de sub-enfriamiento esta dictaminado por el inicio de la nucleación.
- **NUCLEACIÓN.** La nucleación se define como el agrupamiento de átomos en fase líquida en un núcleo estable pequeño. Para un grupo de radio  $r$ , el proceso está gobernado por la energía libre de formación acompañada por una condensación líquido-sólido.
  - Nucleación homogénea.
  - Nucleación heterogénea.

- **Nucleación homogénea.** Las fluctuaciones de densidad en la fase líquida resultan en la formación de un núcleo en un patrón tridimensional puro. Se da en sistemas puros en ausencia de impurezas o cualquier tipo de sustancia que ayude a la nucleación. La probabilidad de que se de este tipo de nucleación en agua a 0 °C es cercana a cero.



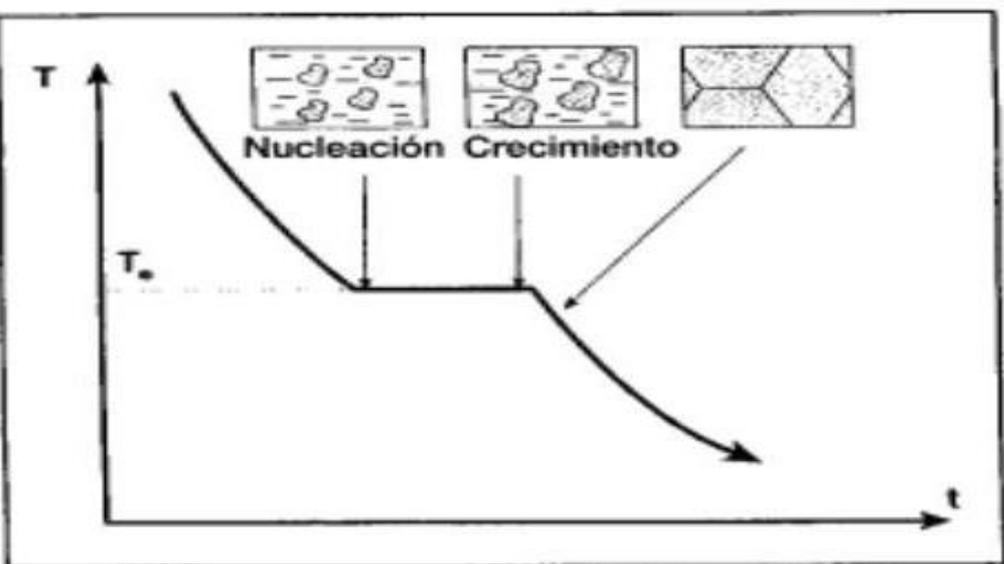
- **Nucleación heterogénea.** Este tipo de nucleación es el más importante en el proceso de congelación de alimentos. Ocurre cuando las moléculas de agua se ensamblan en un agente de nucleación como las paredes del contenedor donde se encuentra, en cuerpos extraños o en material insoluble. La congelación de agua debido a este tipo de nucleación se lleva a cabo en temperaturas más altas, ya que las partículas tienden a incrementar la estabilidad de la agrupación facilitando el proceso.



- **PROPAGACIÓN DE CRISTALES DE HIELO.** Una vez que se inicia la nucleación y el crecimiento de cristales, las moléculas de agua se mueven rápidamente para alcanzar la estabilidad termodinámica como hielo hexagonal, el cual es el arreglo estructural favorecido energéticamente. El crecimiento de los cristales ocurre cuando el número de moléculas de agua se difunden a través de la inter-fase y la orientación hacia un sitio de crecimiento es mayor que el número de moléculas desviadas. El mecanismo y la velocidad de crecimiento de cristales dependen de:
- La concentración y de la morfología de la superficie.
  - También es fuertemente afectado por variables termodinámicas, (propiedades de transferencia de calor),
    - ✓ variables cinéticas (propiedades de transferencia de masa) y
    - ✓ variables propias del alimento

### **Se distinguen tres tipos principales de cristales:**

1. **Cristales regulares hexagonales:** los ejes de cristalización que parten del núcleo de cristalización forman entre sí un ángulo de  $60^\circ$ . Se forman en congelaciones muy lentas.
2. **Dendritas irregulares:** se originan en velocidades de congelación medias y elevadas. De los núcleos de cristalización no sólo salen seis sino muchos más ejes de cristalización que forman entre si diferentes ángulos.
3. **Cristales esférico:** se presentan en congelaciones rápidas y ultrarápidas



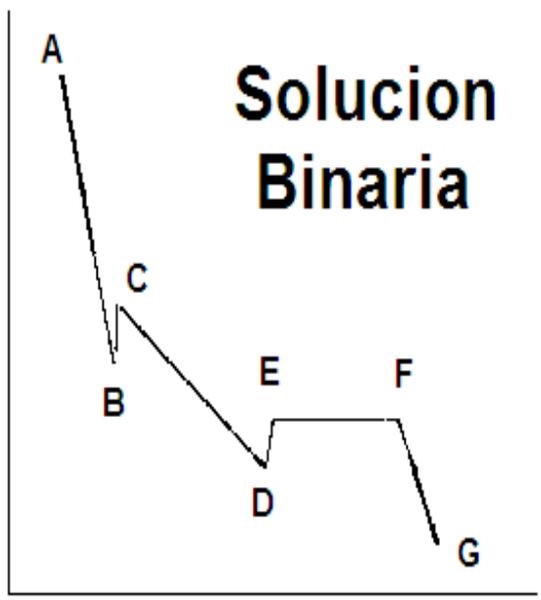
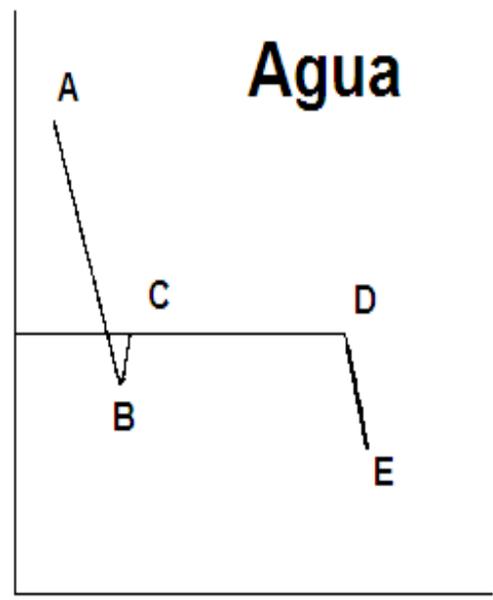
Curva de enfriamiento de un metal puro.

**El proceso de congelación incluye una serie de fases:**

1. Subenfriamiento
2. Nucleación
3. Crecimiento de cristales

Durante la congelación estas dos últimas etapas se solapan en el tiempo, pero es posible controlar la velocidad relativa de cada una de ellas y de esa forma, modificar las características del sistema final.

**CURVAS DE CONGELACIÓN DEL AGUA PURA Y SOLUCIÓN BINARIA**



**LA CONGELACIÓN DE ALIMENTOS** es una forma de conservación que se basa en la solidificación del agua contenida en éstos. Por ello uno de los factores a tener en cuenta en el proceso de congelación es el contenido de agua del producto.

En función de la cantidad de agua se tiene el calor latente de congelación. El calor latente del agua es la cantidad de calor necesario para transformar 1 kg de líquido en hielo, sin cambio de temperatura, en este caso es de 80 kcal/kg.

Otros factores son la temperatura inicial y final del producto pues son determinantes en la cantidad de calor que se debe extraer del producto.

Aproximadamente el 80 % del peso total de un animal e incluso más de una planta corresponde al agua. El agua es el componente mayoritario de los alimentos que derivan de animales y plantas. Al congelar un alimento, el agua se transforma en hielo y se produce un efecto de desecación.

**Cambios de volumen:** El paso de agua a hielo comporta un aumento de volumen cercano al 9 %. Debido a este fenómeno los alimentos más ricos en agua se expanden más que aquellos cuyo contenido es menor. Esto puede dar lugar a fracturas o agrietamientos. Es importante tenerlo en cuenta a la hora de fabricar el envase si este puede ir muy ajustado.

# LA CONGELACIÓN DE ALIMENTOS

**Velocidad de congelación:** La calidad de un producto congelado depende de la velocidad a la que éste es congelado. Dicha velocidad se define como la distancia mínima entre la superficie y el punto crítico partida por el tiempo en el que el punto crítico ha pasado desde 0 °C a -15 °C.

Lenta: < 1 cm/h, por ejemplo un congelador doméstico con el aire inmóvil a -18 °C

Media: 1-5 cm/h, en un túnel de aire frío a 20 km/h y -40 °C

Rápida: > 5 cm/h, en la inmersión en nitrógeno líquido.

**Tiempo de congelación:** El tiempo de congelación de un producto depende de su naturaleza y del procedimiento empleado. El cálculo del tiempo empleado en congelar un producto es muy complejo.

Gracias a la fórmula del tiempo de congelación de Plank, se puede determinar éste tiempo (t).

$$t = \frac{\Delta H * \gamma}{\Delta \zeta} * \frac{1}{N} * D * \left( \frac{D}{4 * \lambda} + \frac{1}{\alpha} \right)$$

DONDE:

D: espesor, medido en paralelo al flujo de calor. (m)

N: coeficiente que caracteriza la forma, siendo N=2 para una placa, N=4 para un cilindro y N=6 para una esfera.

$\Delta H$  {Delta H} : reducción de entalpía que sufrirá el producto. (kJ/kg)

$\gamma$  {gamma} : masa volumétrica del producto congelado (kg/m<sup>3</sup>)

$\lambda$  {lambda} : coeficiente de conductividad térmica en congelación (W/m °C)

$\Delta \zeta$  {Delta zeta} : incremento de temperatura entre el medio refrigerador y la temperatura de congelación. (°C).

$\alpha$  {alpha} : coeficiente superficial de transmisión térmica entre el medio refrigerante y el producto, teniendo en cuenta el embalaje. (W/m<sup>2</sup>°C).

DE ESTA FÓRMULA TEÓRICA SE PUEDEN EXTRAER LAS SIGUIENTES CONCLUSIONES:

$$t = \frac{\Delta H * \gamma}{\Delta \zeta} * \frac{1}{N} * D * \left( \frac{D}{4 * \lambda} + \frac{1}{\alpha} \right)$$

- Para un producto determinado, de forma y tamaño determinados, el tiempo de congelación depende solamente de las características del proceso.
- Para un mismo proceso, el tiempo de congelación depende del espesor, forma y volumen del producto y de su diferencia de entalpía.

**Efecto del almacenamiento:** Se ha demostrado que la temperatura de -18 °C es un nivel adecuado y seguro para conservar los alimentos congelados. Los microorganismos no pueden crecer a esta temperatura y la acción de los enzimas es muy lenta, pero el propio almacenamiento produce alteraciones en el alimento.

**Recristalización:** Durante el almacenamiento hay una tendencia de los pequeños cristales a unirse entre ellos formando otros de mayor tamaño. Esto se debe a que los pequeños cristales resultan más inestables que los grandes al poseer más energía en la superficie por unidad de masa. Este fenómeno es más acentuado si se almacena el producto a temperaturas cercanas a 0 °C. Cuanto más baja es la temperatura, menores son los efectos, considerándose casi despreciables por debajo de -60 °C.

**Quemadura por frío:** Cualquier entrada de aire caliente al interior de la cámara de congelación da lugar a un gradiente de temperatura entre el aire frío interno y el caliente que penetra. Cuando el aire se calienta aumenta su capacidad de absorción de humedad. En una cámara de congelación, la única fuente de humedad disponible es el hielo contenido en los alimentos congelados. El aire caliente toma la humedad de los alimentos protegidos deficientemente, desecándolos. Luego, esta humedad es depositada al enfriarse el aire en las superficies frías del congelador.

La quemadura por frío es una gran desecación superficial en un alimento congelado, producido por la deshidratación anterior. Aparece en la superficie del tejido como manchas de color oscuro al ir concentrándose y oxidándose los pigmentos de las capas más superficiales. También aparecen zonas blanco-grisáceas debidas a los huecos dejados por el hielo después de su sublimación.

Si la quemadura es pequeña, el fenómeno es reversible por exposición a la humedad y rehidratación. Esto se comprueba sometiendo a cocción una zona ligeramente quemada. Si la quemadura ha sido por el contrario más profunda, se han producido oxidaciones, cambios químicos que ya no son reversibles. Es importante, la utilización de un embalaje adecuado; ya que es capaz de reducir entre 4 y 20 veces esta pérdida de agua.

**Bolsas de hielo:** Cuando en un alimento que tiene bolsas de aire, huecos o el envase está deficientemente lleno y hay además un gradiente de temperatura en él, el alimento desprende humedad, se produce la sublimación en el interior de dichos huecos o en la pared interior del envase, formando una capa de escarcha y cristales de hielo denominados bolsa de hielo.

**Modificaciones en los espacios líquidos residuales:** Una de las consecuencias de la congelación es la deshidratación y el aumento de la concentración de solutos en los espacios líquidos de los alimentos.

Cuando se trata de solutos capaces de reaccionar entre sí, la velocidad de reacción aumenta durante la congelación a partir de  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  y hasta unos  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , por debajo de este punto la velocidad de reacción disminuye. Las reacciones que se ven más afectadas por éste fenómeno son las químicas, como la oxidación, hidrólisis, más que las enzimáticas.

Consecuencias de este aumento de concentración y velocidad de reacción son:

- ✓ variaciones del pH.
- ✓ variaciones de la fuerza iónica.
- ✓ alteración en la presión osmótica.
- ✓ variación de la presión de vapor.
- ✓ alteración de la tensión superficial.
- ✓ disminución del punto de congelación.
- ✓ aumento de la viscosidad debido a los coloides.

Todos estos efectos son menores cuanto más rápidamente se produce la congelación y cuanto menor es la temperatura de almacenamiento.

**Desnaturalización proteica:** Cuando el producto se ha congelado lentamente o cuando ha habido fluctuaciones de temperatura durante el almacenamiento, los cristales de hielo que se forman crecen extrayendo agua ligada a las proteínas, de tal forma que estas se desorganizan siendo luego incapaces de recuperar dicha agua durante la descongelación, de manera que esta agua al perderse arrastra los nutrientes hidrosolubles.

**Retracción del almidón:** El almidón está formado por cadenas lineales de glucosa, llamadas amilosa, y por estructuras ramificadas complejas llamadas amilopectina. Los gránulos de almidón en una suspensión fría tienden a hincharse, reteniendo agua, y a una cierta temperatura gelatinizan espesando el líquido.

Cuando este gel se deja reposar, las cadenas lineales de amilosa se agregan como si cristalizaran y liberan parte del agua previamente retenida en su estructura, en un proceso llamado sinéresis.

Por ello conviene seleccionar en los alimentos congelados almidones con muy baja proporción de amilosa. Por ejemplo el arroz tiene una proporción de amilosa del 16 %, el maíz del 24 % y el sorgo no contiene amilosa.

**Contracción de los lípidos:** Un lípido en estado sólido se denomina grasa, mientras que si está líquido se llama aceite. El cambio de estado de sólido a líquido depende de la temperatura de fusión del lípido. Al congelar un alimento los aceites se solidifican y pueden llegar a contraerse.

Todos estos procesos descritos anteriormente dan lugar a tensiones internas que pueden llegar a producir agrietamientos o fracturas del alimento congelado.

# PROPIEDADES FÍSICAS Y TÉRMICAS DEL AGUA Y EL HIELO

| CARACTERÍSTICA                                    | AGUA   | HIELO |
|---|--------|-------|
| Calor específico en KJ/Kg K                       | 4.232  | 2.098 |
| Densidad en Kg/m <sup>3</sup>                     | 1000.0 | 917.0 |
| Coefficiente de conductibilidad calórica, en W/Mk | 0.59   | 2.24  |

**PUNTO EUTÉCTICO:** Punto invariable del diagrama de fases temperatura-concentración de una solución binaria, en la que la solución puede existir en equilibrio tanto con el soluto cristalino como con el solvente cristalino.

En condiciones de equilibrio el enfriamiento hasta la temperatura eutéctica da lugar a la cristalización simultánea de solvente y soluto en proporción constante y a °T constante hasta que ocurre la solidificación máxima.

**Algunos puntos eutécticos:**

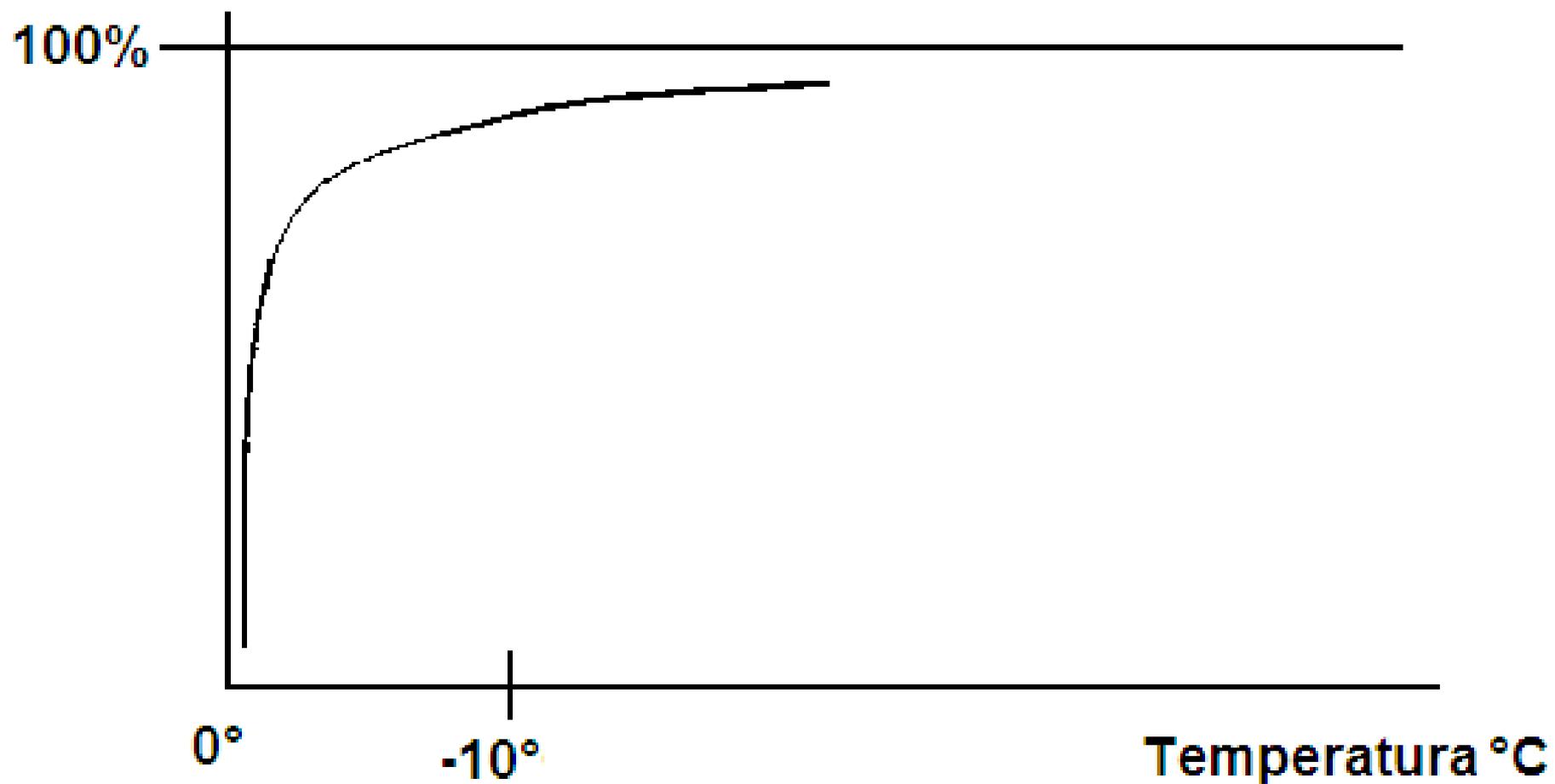
- $\text{CaCl}_2$   $-55^\circ\text{C}$
- $\text{NaCl}$   $-21.13^\circ\text{C}$
- Sucrosa  $-9.5^\circ\text{C}$
- Glucosa  $-5^\circ\text{C}$
- Glycerol  $-46.5^\circ\text{C}$

**Temperatura eutéctica:** La congelación de un alimento se considerará completa cuando su temperatura alcance la de la mezcla eutéctica más baja (temperatura de fin de congelación). Sin embargo esto rara vez se consigue durante la congelación de los alimentos ni siquiera es su objetivo porque requeriría el descenso de la temperatura a valores muy bajos e implicaría costos muy elevados.

**Ejemplo:** helados  $-55^\circ\text{C}$ , carne  $-50$  a  $-60^\circ\text{C}$ , pescado  $-55^\circ\text{C}$  .

La máxima formación de cristales de hielo no se consigue hasta que no se alcanza esta temperatura. Como los alimentos nunca se congelan comercialmente a estas temperaturas tan bajas, siempre contienen cierta proporción de agua no congelada.

# PROPORCIÓN DE AGUA CONGELADA EN LOS ALIMENTOS DURANTE LA CONGELACIÓN



# **MODIFICACIONES QUE SE PRODUCEN EN LOS ALIMENTOS DURANTE SU CONGELACIÓN**

## **1. POR FORMACIÓN DE CRISTALES DE HIELO**

# LOS ALIMENTOS DURANTE SU CONGELACIÓN

- 1) Por formación de cristales de hielo
- 2) Por aumento de la concentración de los solutos en solución
- 3) Por variación del volumen

## 1. POR FORMACIÓN DE CRISTALES DE HIELO

- ❖ La magnitud del daño depende de la velocidad de congelación y de las características del producto.
  - ✓ En la congelación lenta los cristales se forman en el exterior de la célula, el aumento de tamaño de los cristales extracelulares provocan concentración del fluido extracelular y genera deshidratación (osmosis). Si continúa el crecimiento se lesiona a la célula. La deshidratación es irreversible si sobrepasa un límite, al descongelar no se recupera el agua inicial.
- ❖ Alimentos con estructuras con paredes y membranas más afectados, la estructura de los tejidos animales menos afectados que los vegetales.
- ❖ Cambios dependen de la localización de los cristales determinado por la velocidad y permeabilidad del tejido.

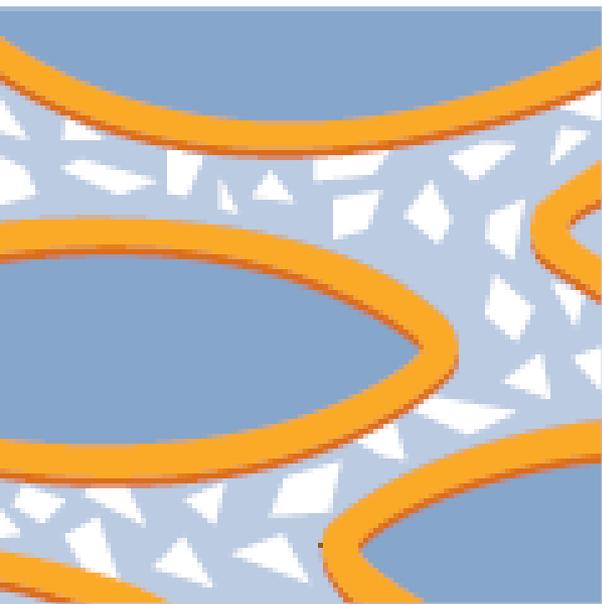
## Efecto de los cristales sobre los alimentos animales:

En el músculo del pescado ocurre lo mismo que en la carne

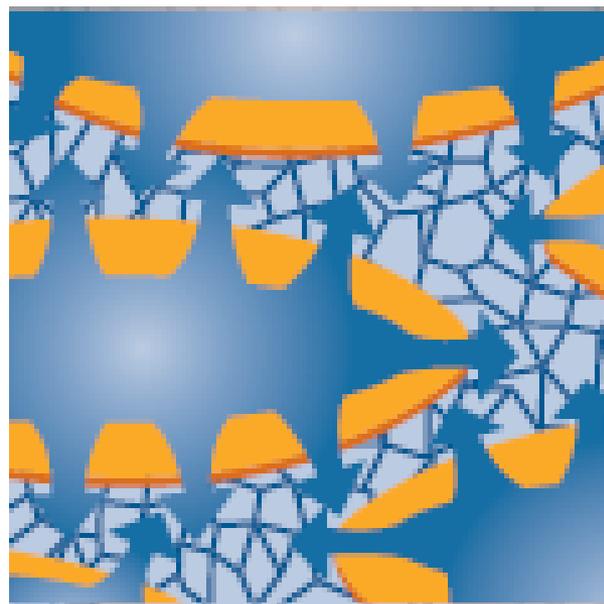


## La congelación lenta puede dañar los productos alimenticios

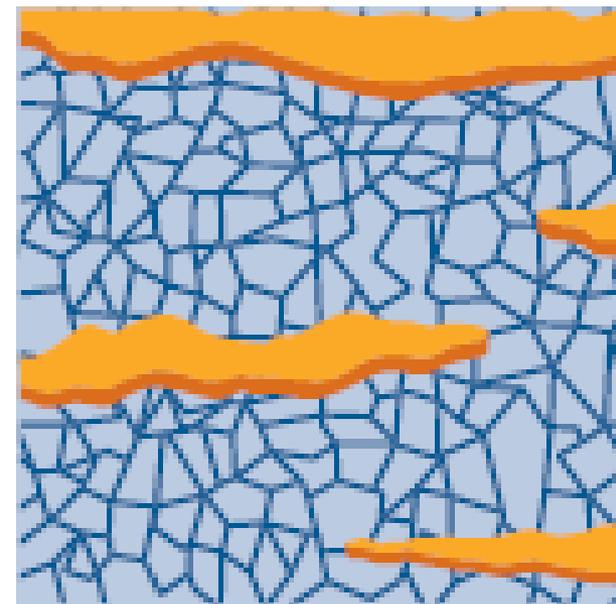
Cuando se congela un alimento, hay tres etapas en el proceso. Primero, la temperatura se reduce hasta el punto de congelación. El agua en el alimento se convierte en hielo (esta fase se llama también la del calor latente). Finalmente, la temperatura se reduce aun más hasta el punto de congelación final (normalmente  $-18^{\circ}\text{C}$ ). La congelación lenta puede dañar los productos alimenticios porque el proceso destruye sus células.



1. El agua libre que rodea las células del alimento es la primera que cristaliza en los métodos de congelación lenta.



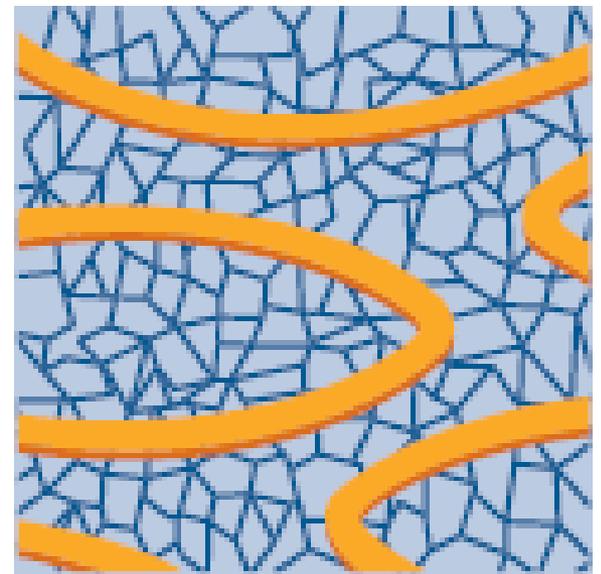
2. En cuanto se destruye el equilibrio del agua, el agua en el interior de las células del alimento empieza a salir de éstas, destruyendo la pared celular. Cuanto más largo es el tiempo de congelación, mayor es la destrucción de las células.



3. Finalmente, los cristales de hielo se hacen tan grandes que las células se rompen completamente, causando -entre otros inconvenientes- un alto grado de pérdida de agua cuando el producto se descongela o se recalienta.

## Mejor calidad mediante una congelación más rápida

Debido a las razones explicadas anteriormente, el proceso de congelación debe transcurrir lo más rápidamente posible para alcanzar una calidad elevada del producto. Utilizando la congelación criogénica rápida, el agua dentro y fuera de las células se congela a la misma velocidad, asegurando que la célula permanece intacta y que el alimento conserva su frescor, sabor y textura -como si no hubiera sido congelado.



La estructura de las células orgánicas permanece prácticamente inalterada cuando se aplica la tecnología de congelación rápida.

**En la congelación lenta los cristales se forman en el exterior de la célula, el aumento de tamaño de los cristales extracelulares provocan concentración del fluido extracelular y genera deshidratación (osmosis). Si continúa el crecimiento se lesiona a la célula. La deshidratación es irreversible si sobrepasa un límite, al descongelar no se recupera el agua inicial**

**En la congelación lenta se produce una Modificación de la textura. Y además, en alimentos que tienen cierta estructura organizada (emulsiones, geles, espuma) la formación de cristales de gran tamaño ocasionan también modificaciones.**

# **MODIFICACIONES QUE SE PRODUCEN EN LOS ALIMENTOS DURANTE SU CONGELACIÓN**

**2. AUMENTO DE  
LA CONCENTRACIÓN  
DE LOS SOLUTOS EN  
SOLUCIÓN**

- **Solutos precipitados, textura arenosa.**
  - ✓ **Ejemplo: lactosa durante la congelación del helado.**
- **Si los solutos no se precipitan sino que permanecen en una solución concentrada pueden "desnaturalizar" las proteínas.**
- **Algunos solutos son ácidos y al concentrarse pueden hacer que el pH baje más allá del punto isoeléctrico (punto de solubilidad mínima de las proteínas), lo cual resultaría en la coagulación de las mismas.**
- **La concentración o precipitación de ciertos iones pueden romper el equilibrio de las suspensiones coloidales.**
- **Los gases en solución también se concentran cuando el agua se separa por congelación.**
  - **Esto puede causar la sobresaturación de los gases y, por último, su expulsión de la solución. La cerveza y la bebidas gaseosas congelados padecen este defecto.**

# **MODIFICACIONES QUE SE PRODUCEN EN LOS ALIMENTOS DURANTE SU CONGELACIÓN**

## **3. VARIACIÓN EN EL VOLUMEN**

- **La variación del volumen que se produce al convertirse el agua pura en hielo es cerca del 9%. (hay expansión)**
- **La variación de volumen de los alimentos como resultado de la formación de hielo es menor, con una expansión cercana al 6%, porque solo una parte del agua presente es congelada y porque algunos alimentos tienen espacios de aire.**
  - **Esta variación de volumen debe ser tomada en cuenta en el diseño del equipo.**
  - **En sistemas de congelación muy rápida (por ejemplo, inmersión de productos en nitrógeno líquido) se pueden producir el aumento de presiones excesivas dentro del producto causando roturas o fracturas.**

**En conclusión, la variación del volumen que se produce durante la congelación varía considerablemente de acuerdo a los siguientes factores:**

- **Contenido de agua.**
- **Disposición celular: los tejidos vegetales poseen unas espacios intracelulares, rellenos de aire, que absorben los incrementos internos de volumen sin que se aprecien cambios importantes en el volumen global.**
- **La concentración de soluto.**
- **La temperatura de la cámara de congelación determina la proporción de agua congelada y por tanto, el grado de dilatación.**
- **Los compuestos cristalizados (el hielo, la grasa y los solutos entre otros) cuando se enfrían, se contraen, con lo que el volumen del alimento se reduce.**

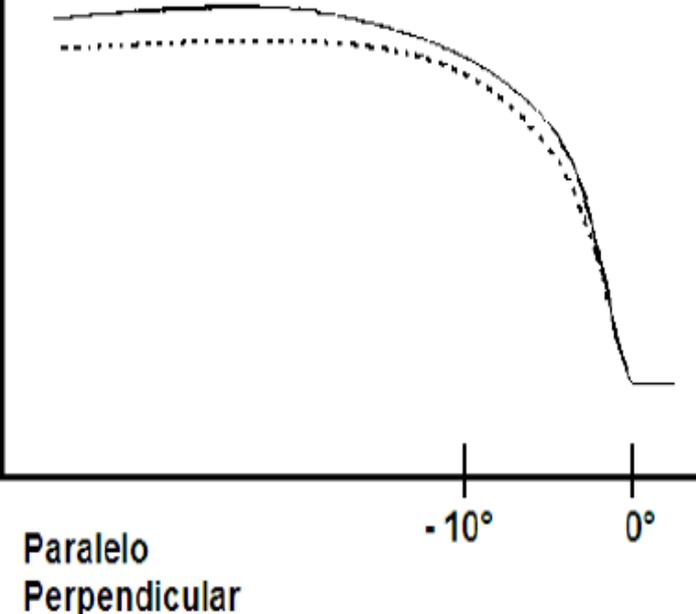
# **PROPIEDADES TERMO-FÍSICAS DE LOS (ALIMENTOS CONGELADOS)**

**Para estimar los tiempos de congelación así como los requerimientos de refrigeración se deben conocer las propiedades termo-físicas de los alimentos que se congelan en todo el rango de las temperaturas de operación.**

**El proceso de congelación produce un drástico cambio en las propiedades térmicas de los alimentos.**

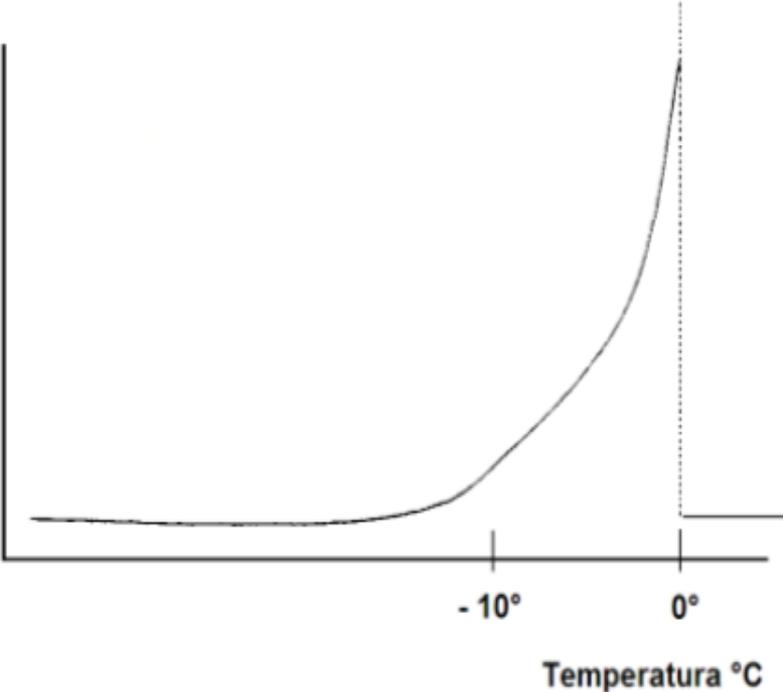
**Las propiedades de los alimentos cambian debido al cambio de fase que se produce en el agua.**

**Conductividad Termica**

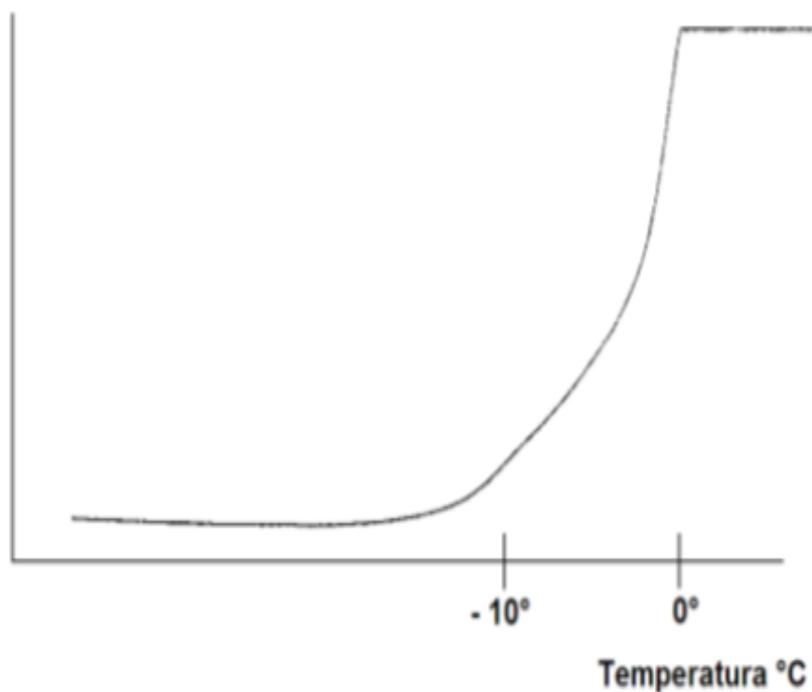


| Producto             | Conductividad Producto Fresco | Conductividad Producto Congelado |
|----------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Fresas               | 0.557                         | 1.95                             |
| Jugos de frutas      | 0.507                         | 2.04                             |
| Pepinos              | 0.577                         | 2.1                              |
| Patatas puré         | 0.517                         | 1.69                             |
| Carne de cerdo grasa | 0.389                         | 0.96                             |
| Carne de cerdo magra | 0.443                         | 0.56                             |
| Carne de vaca        | 0.428-0.522                   | 1.18-1.57                        |
| Filetes de bacalao   | 0.524                         | 1.70                             |
| Salmón               | 0.502                         | 1.16                             |
| Huevos               | 0.479                         | 1.42                             |

**Calor Especifico**



**Densidad**



## **VELOCIDAD DE CONGELACIÓN:**

- **En la calidad de los alimentos congelados influye factores relacionados a la velocidad de congelación.**
- **Muchas características de calidad están vinculadas al tamaño de los cristales de hielo, que a su vez depende de la velocidad de congelación.**
- **La capacidad de producción de un sistema de congelación depende directamente de la remoción de energía térmica del producto siendo el tiempo de congelación el parámetro de diseño requerido.**

## **TIEMPO CARACTERÍSTICO DE CONGELACIÓN:**

- **Corresponde a una medida local expresada como el tiempo que tarda un punto del alimento en pasar desde la temperatura inicial de congelación a otra temperatura, a la cual aproximadamente 80% del agua se halla en forma de hielo.**
  - **En el caso de carne bovina (con un 74% de humedad) dichas temperaturas serían -1 y -7°C respectivamente.**

## **Velocidad media de congelación:**

Es el cociente entre la mínima distancia existente desde la superficie al centro térmico del objeto a congelar y el tiempo transcurrido, entre que la superficie de dicho objeto alcanza  $0^{\circ}\text{C}$  y el centro térmico alcanza una temperatura  $10^{\circ}\text{C}$  más baja que la temperatura inicial de congelación.

Se expresa en  $\text{cm/h}$ . y representa la velocidad promedio de avance del frente de hielo. *(Esta definición corresponde al Instituto Internacional de Refrigeración (IIR, 1972)).*

- ✓ Congelación lenta  $< 1\text{cm/h}$ . (congeladores de aire estático y cámaras de almacenamiento en congelación).
- ✓ Congelación semi-rápida  $1\text{-}5\text{ cm/h}$ .
  - ❖ (congeladores de aire forzado, túneles de congelación y congeladores de placas).
- ✓ Congelación rápida  $5\text{-}10\text{ cm/h}$ .
  - ❖ (congeladores de lecho fluidizado, de superficie de rascada y de inmersión).
- ✓ Congelación ultrarápida  $> 10\text{ cm/h}$ .
  - ❖ (congeladores criogénicos).

**Tiempo nominal de congelación:** Es el necesario para que un producto pase desde una temperatura inicial de  $0^{\circ}\text{C}$  a una temperatura  $10^{\circ}\text{C}$  inferior a la de inicio de congelación en el centro térmico.

# TIEMPOS DE CONGELACIÓN

- El tiempo de congelación, junto con la selección de un adecuado sistema de congelación, es un factor crítico para asegurar la óptima calidad del producto.
- El tiempo de congelación requerido para un producto establece la capacidad del sistema, además de influir de forma directa en la calidad del mismo.
- Generalmente se entiende como tiempo de congelación el requerido para que el producto pase de su temperatura inicial hasta la que se haya establecido como final, midiendo esta temperatura en la localización en la que el enfriamiento se produzca más lentamente.
- El cálculo del tiempo de congelación puede resultar complicado ya que en el proceso va cambiando continuamente la temperatura de congelación del alimento y sus propiedades térmico-físicas.
- La simulación de la congelación no es tarea fácil, ya que como se ha visto, en el proceso completo se encuentran tramos en los que se intercambian calor sensible (en los que se pueden considerar invariables las propiedades termo-físicas del producto), mientras que en otro se intercambia fundamentalmente calor latente, y se produce el consiguiente cambio de estado en el que sufren una sustancial variación las propiedades del producto.
- En general las predicciones del tiempo de congelación se dividen en dos tipos de métodos: **LOS NUMÉRICOS Y LOS APROXIMADOS.**

# Métodos Numéricos:

- Permiten predecir perfiles de temperatura y tiempos de proceso.
- Requieren información detallada de la variación de las propiedades térmicas.
- Pueden considerar condiciones operativas bien definidas (temperatura inicial del alimento, temperatura del medio refrigerante, coeficiente de transferencia calórica, dimensiones del producto, geometría ya sea regular o irregular).

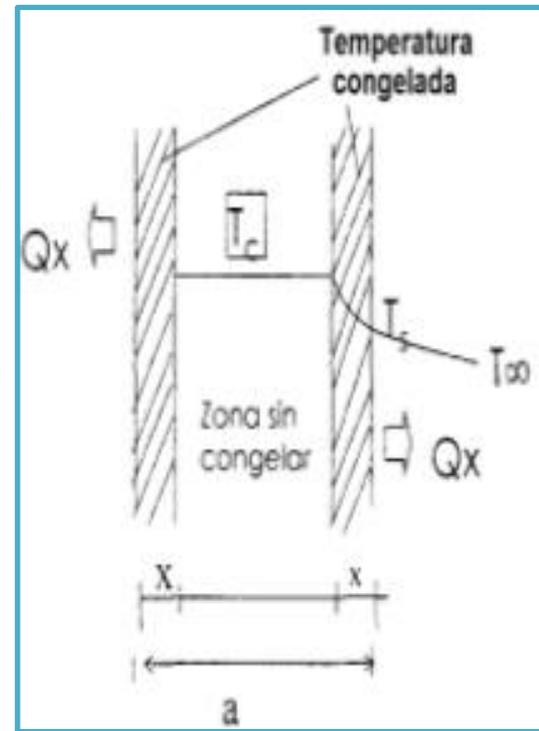
# Métodos Aproximados

- Los métodos aproximados (llamados también analíticos) utilizan simplificaciones en la solución de la ecuación diferencial.
- Generalmente proveen sólo la información del tiempo de procesamiento sin permitir conocer la historia térmica de cada punto.
- Utilizan propiedades térmicas del alimento evaluadas a determinadas temperaturas y los resultados que provee son válidos para un rango establecido de variación de los parámetros de proceso.
- Son dependientes de la forma del alimento y en algunos casos han sido desarrollados para casos particulares.

➤ La Ecuación de Plank:  
 $tc = (\rho L / (Tic - T\alpha)) (Ra^2 / K + Pa / h)$

| GEOMETRIA            | P   | R    | Significado de a |
|----------------------|-----|------|------------------|
| Placa plana $\alpha$ | 1/2 | 1/8  | Espesor          |
| Esfera               | 1/6 | 1/24 | Diámetro         |
| Cilindroco $\alpha$  | 1/4 | 1/16 | Diámetro         |

**Considerado en la deducción de la ecuación de Plank:** Para ello se supone una lamina de dimensiones infinitas pero de espesor finito ( $a$ ) lo que implica que la transmisión de calor es unidireccional. Este cuerpo se halla inicialmente a la temperatura  $T_{ic}$  y es introducido en un congelador en el que la temperatura externa  $T_{\infty}$ . En el transcurso de la congelación se forma un frente de congelación que va avanzando desde la superficie a temperatura  $T_s$  hacia el centro de la lámina (distancia  $x$ ). El calor se transmite a través de la capa congelada por conducción, y desde la superficie hacia el exterior por convección.



## LIMITACIONES DE LA ECUACION DE PLANK

- Asume que la congelación se produce a temperatura constante.
- Considera que la temperatura inicial es la de congelación con la cual desprecia el tiempo necesario para remover el calor sensible por arriba de  $T_{ic}$ .
- La temperatura final del producto congelado no aparece en la ecuación, lo cual indica que no se ha considerado el tiempo requerido para remover calor.
- Considera constantes el calor latente de fusión y la conductividad térmica durante el proceso de congelación.
- Dificultad de evaluar el valor de  $L$ , generalmente se considera en función del calor de fusión del agua y el % de agua en el alimento, pero ello supone que todo el hielo se ha formado a la temperatura de inicio de congelación, que evidentemente es falso.

# **MODIFICACIONES DE LOS ALIMENTOS DURANTE SU ALMACENAMIENTO EN CONGELACIÓN**

**a) Recristalización.**

**b) Sublimación.**

**c) Modificaciones químicas.**

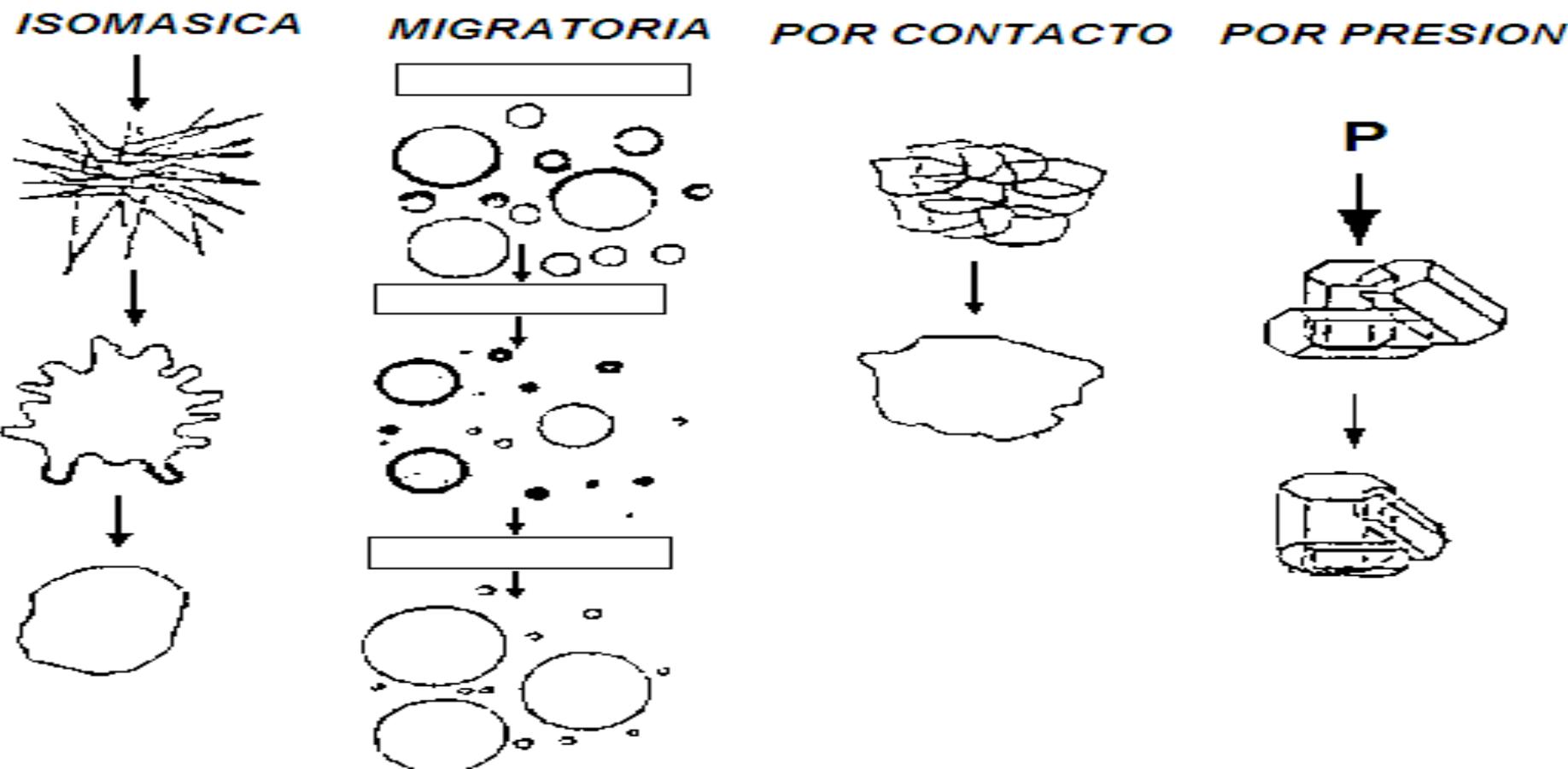
## a) RECRISTALIZACIÓN:

- Es un fenómeno muy frecuente que consiste en cambios no deseables en forma, tamaño y número de los cristales de hielo.
- Este proceso puede producirse a temperatura constante o a temperatura variable. A temperatura constante se produce la unión de cristales adyacentes como resultado de que el sistema tiende a reducir su superficie para incrementar su estabilidad.
- Si la temperatura fluctúa en el momento en que se incrementa se producirá la fusión de los cristales pequeños y cuando vuelva a descender el agua cristalizará sobre la superficie de los cristales incrementando su tamaño.

## TIPOS DE RECRISTALIZACIÓN

1. **Recristalización Isomásica:** cristales de forma irregular y relación  $A/V$  elevada tienden a asumir una estructura más compacta con una relación menor que es más estable.
2. **Recristalización Migratoria:** la de mayor importancia en los alimentos congelados, tendencia de los cristales de gran tamaño de crecer a expensas de los de menor tamaño por diferencias en la energía superficial (Los cristales pequeños mantienen unidas sus moléculas superficiales con menor intensidad). Se intensifica con las fluctuaciones de temperatura.

- 3. **Recristalización por contacto o acretiva:** tiene lugar cuando los cristales que están en contacto se unen para formar uno de mayor tamaño y menor energía. Este tipo de recristalización no se puede evitar, aunque su lentitud le resta importancia.
- 4. **Recristalización por presión:** Cuando se aplica una fuerza a un grupo de cristales de hielo con distinta orientación , aquellos que tienen su eje principal paralelo a la dirección de la fuerza aplicada crecerán a expensas de los otros, siendo el crecimiento proporcional a la fuerza aplicada. Evitar que los alimentos estén sometidos a presión.



# **IMPORTANTE:**

- 1. LA MAYOR CALIDAD DE LOS ALIMENTOS CONGELADOS RÁPIDAMENTE PUEDE DESAPARECER DURANTE SU ALMACENAMIENTO, IGUALÁNDOSE CON LOS DE LOS CONGELADOS A VELOCIDADES MÁS LENTAS.**
- 2. PARA CONSERVAR LA CALIDAD DE LOS PRODUCTOS CONGELADOS ES FUNDAMENTAL MANTENER LA TEMPERATURA CONSTANTE Y EVITAR EL APILAMIENTO EXCESIVO.**

## **b) SUBLIMACIÓN**

- Pérdida de humedad es un serio problema.
- La pérdida de humedad depende de la temperatura promedio del ambiente y la temperatura del evaporador, así como de las fluctuaciones de temperatura.
- La excesiva deshidratación aparte de una indeseable pérdida de peso, puede causar la aceleración de los cambios químicos (oxidación) y cambios en la consistencia (áreas deshidratadas no vuelven a reabsorber agua en igual medida durante la descongelación).

### **❖ QUEMADURA POR CONGELACIÓN:**

- ✓ La quemadura por congelación obedece a una deshidratación local que se produce al sublimarse los cristales de hielo de las capas superficiales, es irreversible y afecta al sabor y aroma de los productos cuyos tejidos se enrancian más fácilmente antes que los normales. Las sustancias aromáticas típicas van desapareciendo. La consistencia se vuelve esponjosa, correosa y pajiza.
- ✓ Algunos casos típicos en que se presenta esta alteración es en el pescado donde la superficie se vuelve seca, rugosa y en algunos casos presenta cambios de coloración (tono gris pardo). En el caso de las aves la piel pierde transparencia en algunos puntos adquiere una apariencia poco grata y empieza a volverse amarillo grisácea, simultáneamente a estos cambios, o poco después aparecen manchas blancas pequeñas en principio y que luego van aumentando cada vez de tamaño.

## **RECURSOS PARA EVITAR LA DESHIDRATACIÓN:**

- El envasado al vacío en materiales impermeables al vapor de agua. La aplicación de vacío es importante para evitar que se produzcan condensaciones en el interior del envase.
- El mantenimiento de una adecuada humedad relativa de la atmósfera de almacenamiento, que normalmente tiende a disminuir por la condensación de humedad en los evaporadores.
- Evitar velocidades excesivamente grandes del aire.
- La formación de una capa de glaseado de hielo sobre el alimento.

## c) MODIFICACIONES QUÍMICAS:

- Oxidación lipídica.
- Pardeamiento enzimático.
- Insolubilización de proteínas.
- Degradación de clorofila.
- Pérdida de vitaminas.

# EQUIPOS:

1. EQUIPOS QUE UTILIZAN EL AIRE COMO MEDIO DE ENFRIAMIENTO.
  - Cámaras de congelación.
  - Túnel de congelación.
  - Congeladores de cinta (congeladores en banda transportadora, congeladores en espiral).
  - Congeladores del lecho fluidizado.
2. SISTEMAS QUE UTILIZAN EL CONTACTO CON PLACAS METÁLICAS.
3. CONGELACIÓN POR INMERSIÓN.
4. CONGELACIÓN CON FLUIDOS CRIOGÉNICOS.
5. CONGELADORES DE SUPERFICIE DE RASCADA.
6. CONGELADORES DE TAMBOR

# 1. EQUIPOS QUE UTILIZAN EL AIRE COMO MEDIO DE ENFRIAMIENTO

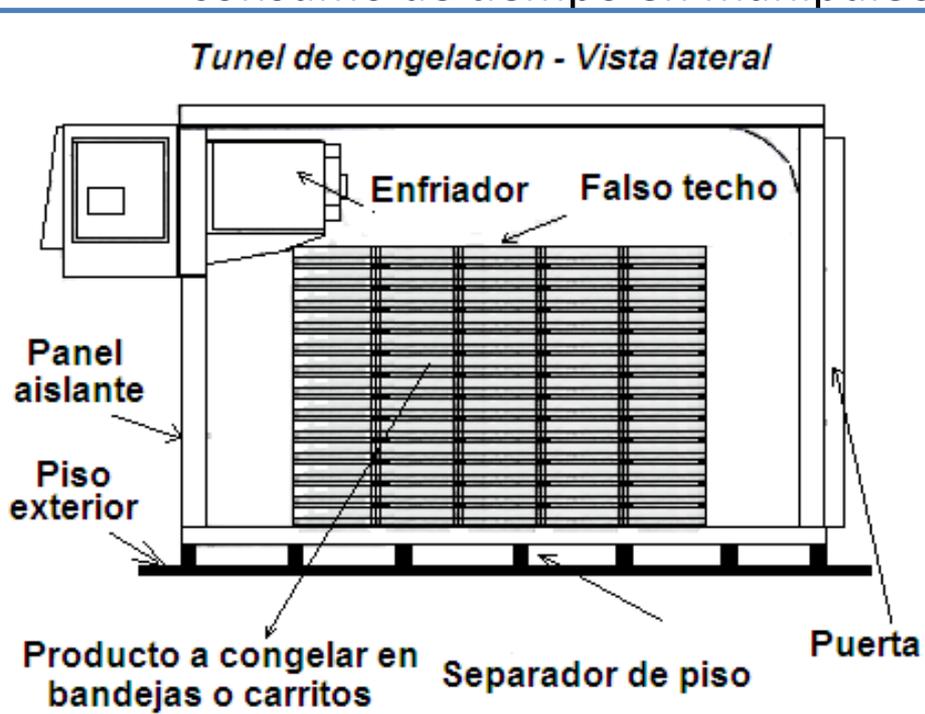
## A. CÁMARAS DE CONGELACIÓN:

- Una cámara de conservación por congelación no debe considerarse un sistema de congelación.
- Con y sin circulación de aire:
- Velocidad de congelación de 0.2 cm/h.
- No depende de la forma y tamaño.
- Velocidad de congelación lenta la pérdida de calidad es significativa

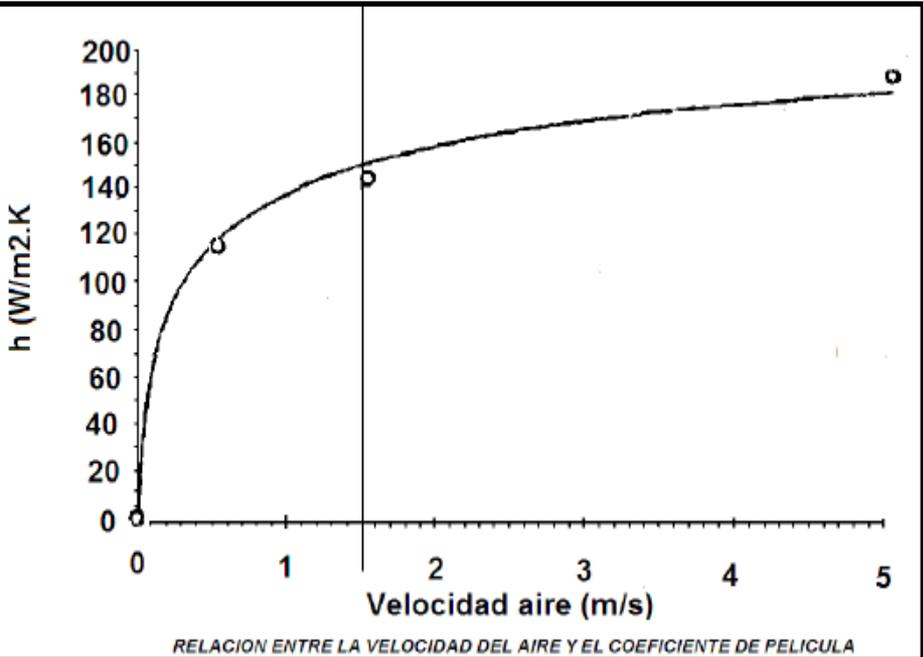


## B. TÚNELES DE CONGELACIÓN:

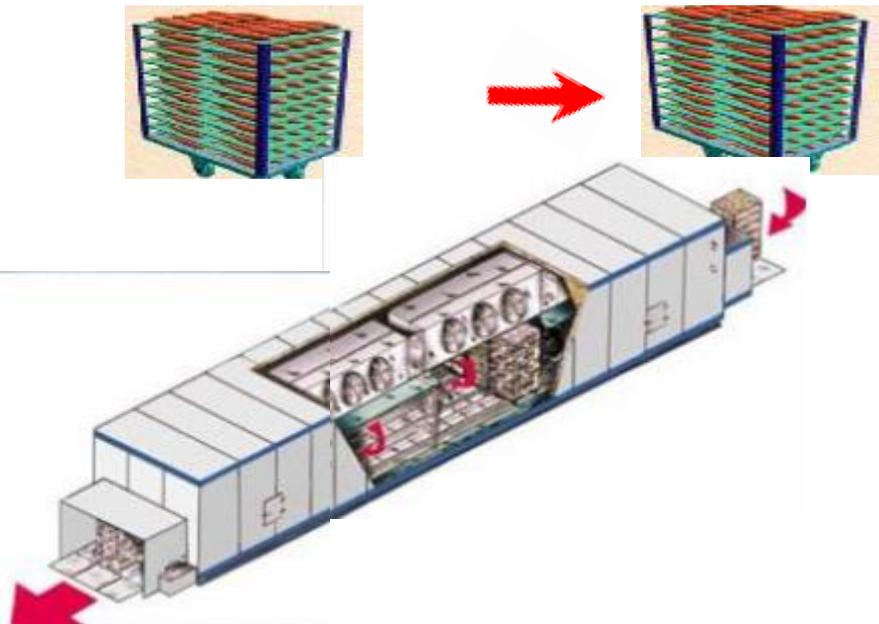
- Tienen sistemas de impulsión de aire (-30- -40°C).
- El producto se coloca en bandejas sobre racks o carritos unos al costado de otros, fijos o continuos.
- El movimiento del aire puede ser en paralelo o perpendicular.
- **Inconveniente:** Alimentos no envasados pueden sufrir quemaduras por frío (por la elevada velocidad, baja HR y diferencia de temperatura).
  - ✓ En algunos casos transportadores con ganchos (cuartos de res).
  - ✓ Velocidad de congelación 0.5- 3 cm/h.
  - ✓ Productos descubiertos tienden a pegarse en las bandejas, pérdida de peso, consumo de tiempo en manipuleo, limpieza v transporte.



# Variación del coeficiente convectivo con la velocidad:



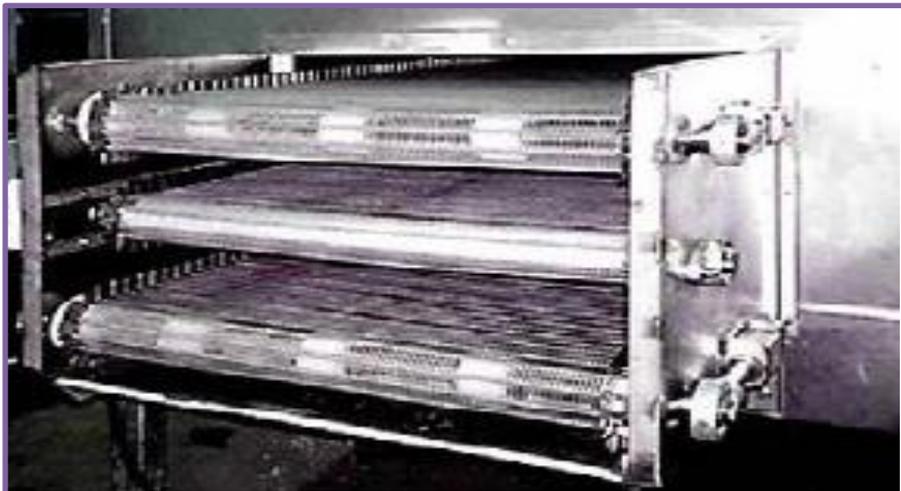
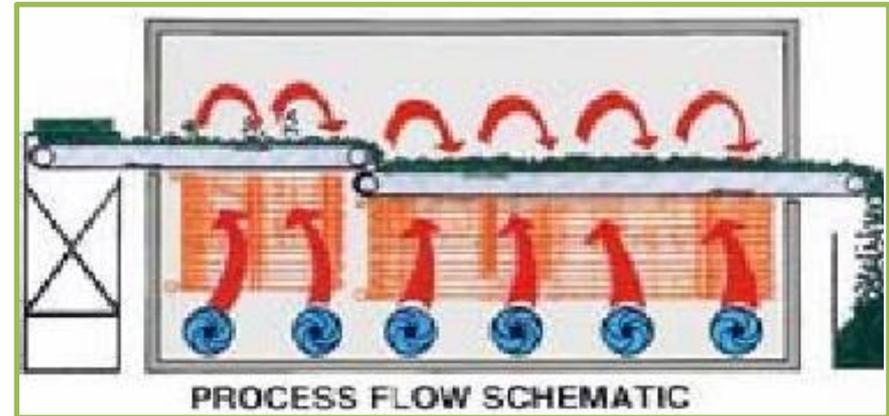
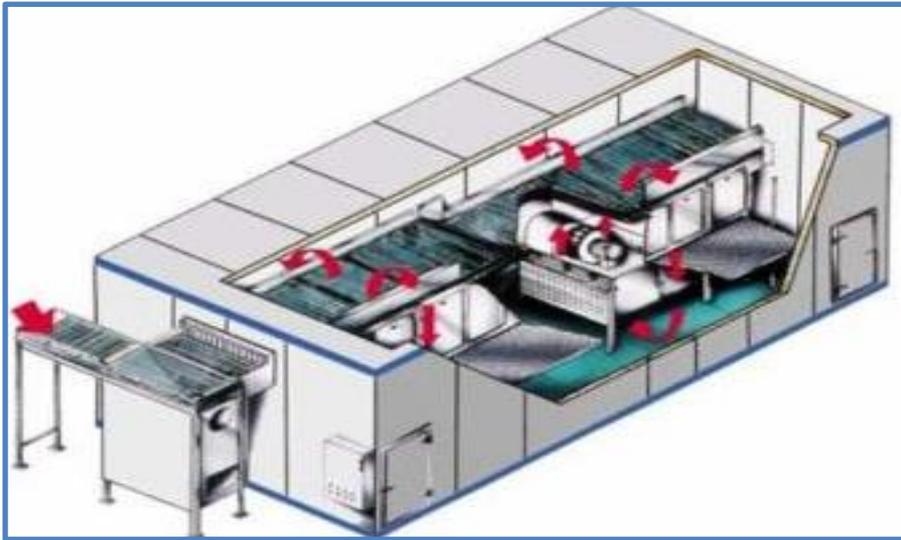
|  | h (W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ) |
|--|---|
| Congelación en camara                              | 6                                       |
| sin aire en movimiento                             | 10-17                                   |
| Con débil corriente de aire                        | 12-50                                   |
| Congelación en túnel con alta velocidad de aire    | 35-60                                   |
| Congelación en lecho fluizado                      | 90-130                                  |
| Congelación en placas múltiples                    | 600-1.200                               |
| Congelación por pulverización de nitrógeno liquido | 1.200-2.400                             |
| Congelación por inmersión en nitrógeno liquido     | 6.000                                   |



## C. CONGELADORES DE CINTA:

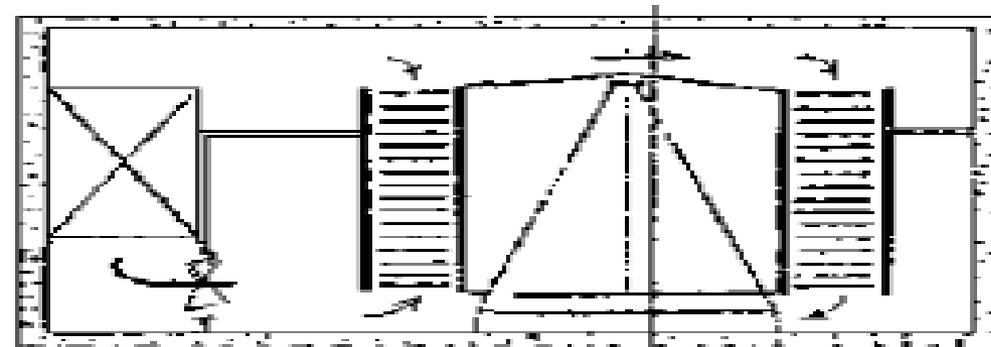
### 1. Congeladores de banda transportadora:

- ✓ Congeladores continuos.
- ✓ Banda de enrejado metálico.
- ✓ En la mayoría el movimiento del aire es vertical.

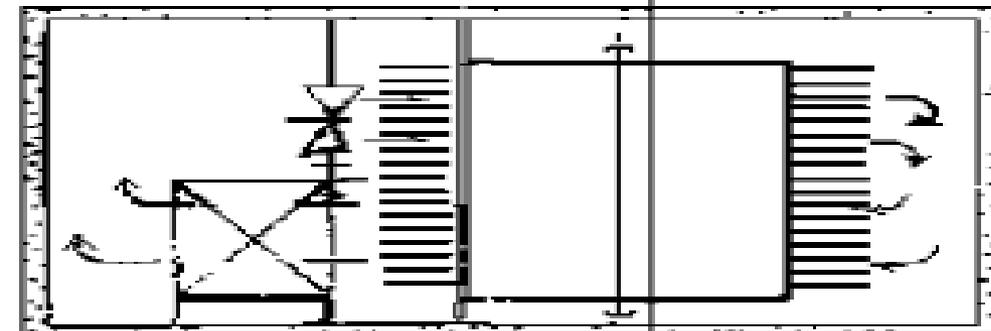


## 2. Congeladores en espiral

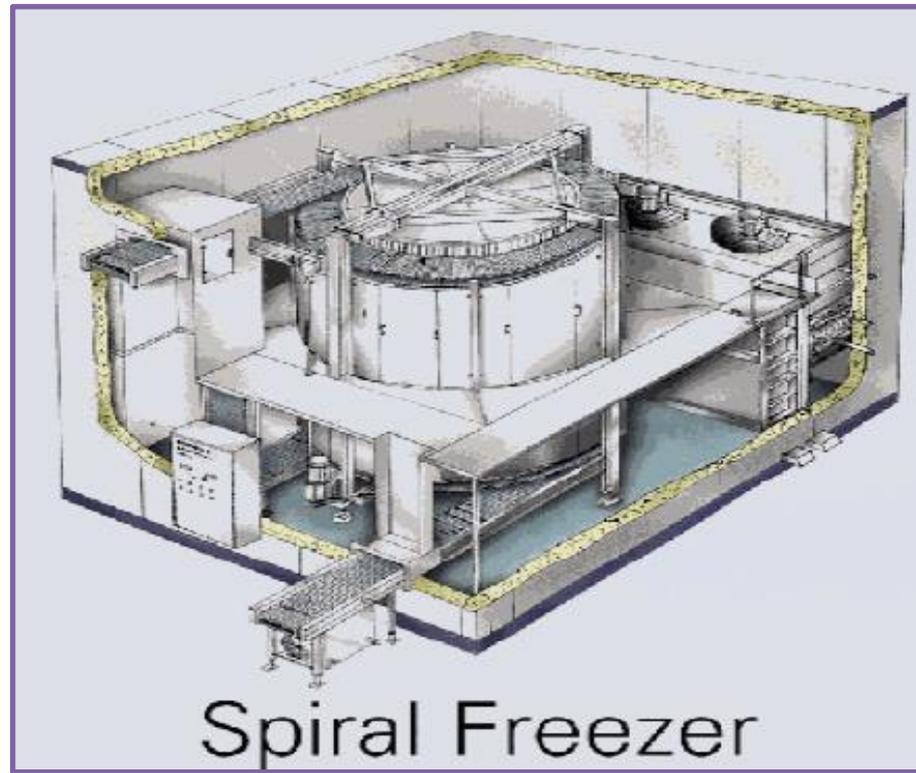
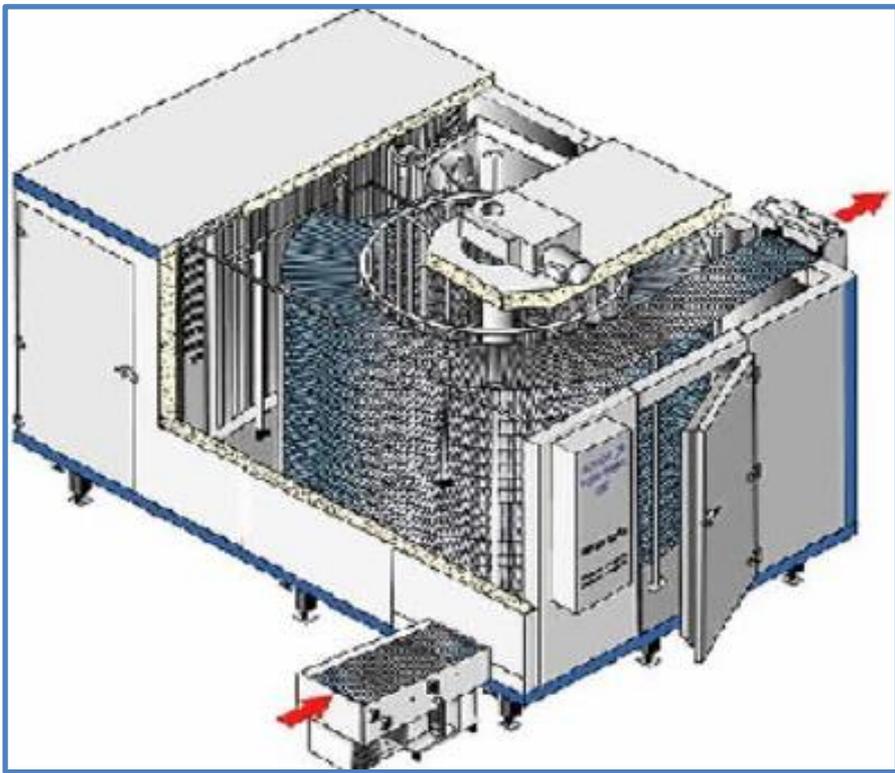
- **CINTA TRANSPORTADORA** metálica flexible y apilable que se enrolla en un tambor en espiral.
- **EL AIRE PUEDE FLUIR** horizontal o verticalmente.
- **MOVIMIENTO HORIZONTAL** para alimentos empacados para evitar que el aire choque con la superficie superior en el fondo zona muerta.
- **MOVIMIENTO EN CONTRACORRIENTE:** la diferencia de temperatura y humedad existente entre el aire y el alimento se reducen por lo que hay menos pérdidas.
- **IMPORTANTE** distribución uniforme del producto para el congelamiento efectivo, ya que el aire evita los lugares de mayor concentración donde en consecuencia no se enfría adecuadamente.



**En vertical a la superficie de la cinta.**



**Paralelo a la superficie de la cinta**

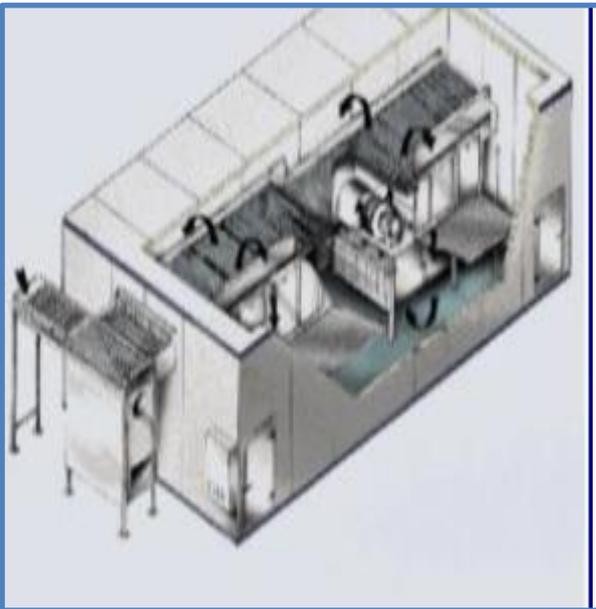


Spiral Freezer



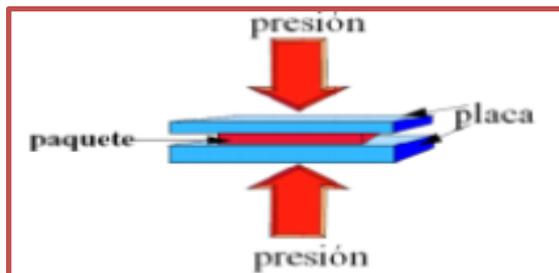
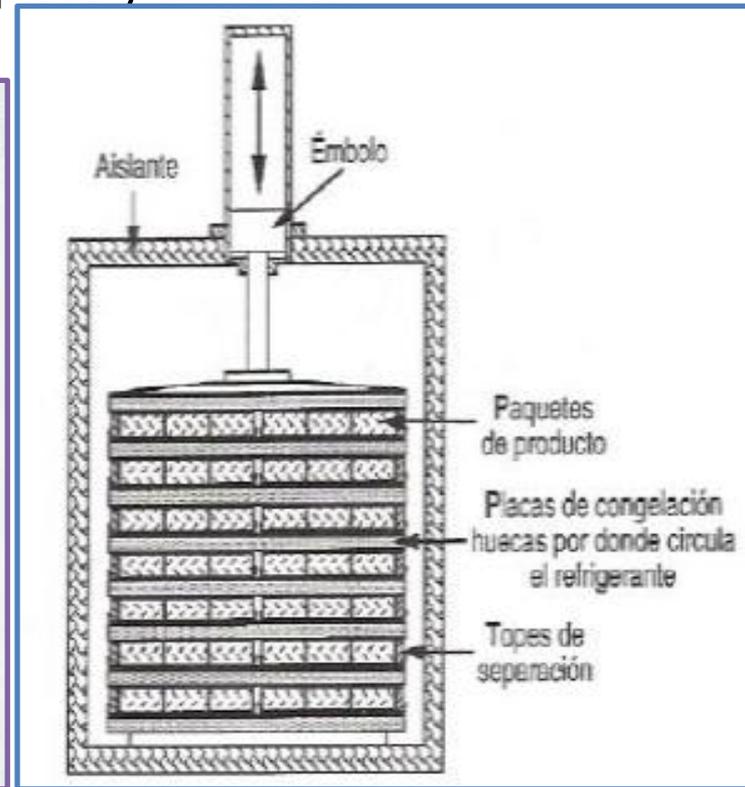
### 3. Congeladores de Lecho fluidizado

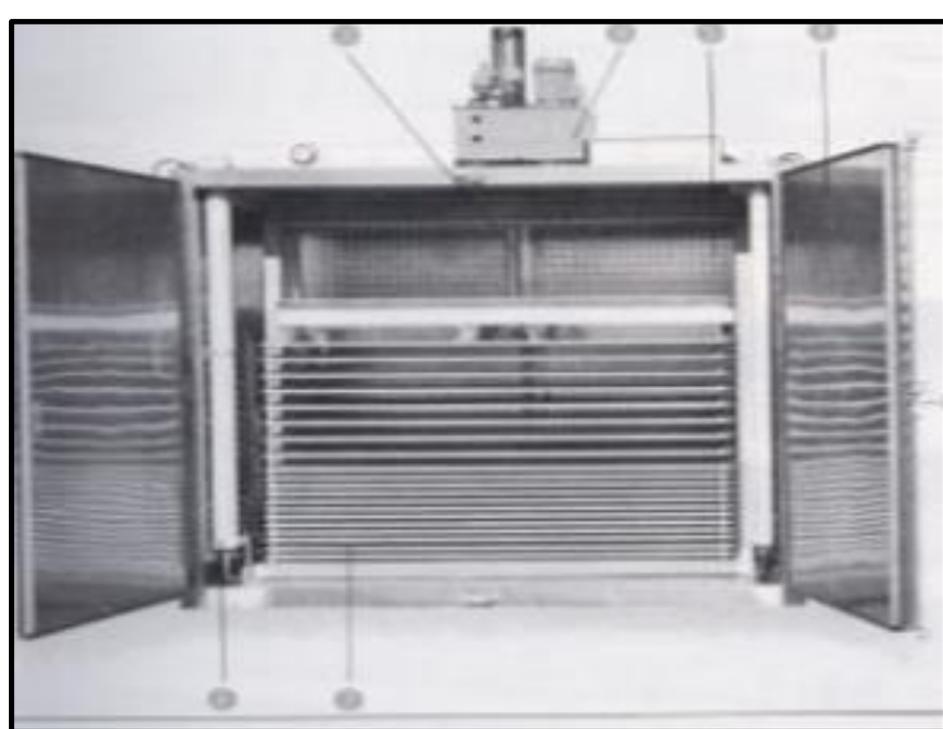
- Para productos que pueden flotar por acción de una corriente de aire inyectada en sentido vertical.
- Cada partícula es congelada de manera individual.
- La velocidad del aire equilibra el peso de los productos.
- Producto que retiene las características de flujo libre
- Deshidratación baja por la gran velocidad de congelación
- Velocidad de congelación de 5-10 cm/h.
- El coeficiente de transferencia calórico desde el aire frío al producto está limitado por la velocidad del gas que debe ser la adecuada para fluidizar, por lo que la única manera de incrementarla es bajando la temperatura.
- $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , vel  $\Rightarrow$  2 a 5 m/S.



## D. SISTEMAS QUE UTILIZAN EL CONTACTO CON PLACAS METÁLICAS.

- Serie de placas planas huecas dispuestas en vertical u horizontalmente por donde circula el refrigerante (-40°C).
- Funcionamiento continuo, discontinuo, semi-continuo.
- Se adapta a alimentos de formas plana, dispuestos en capa única luego un sistema hidráulico las aproxima presionando suavemente logrando un buen contacto.
- Recomendable para alimentos de consistencia firme para que resistan sin daño la compresión.
- Calor extraído por conducción.
- Efectividad depende del grado de contacto entre placa y alimento.
- Deshidratación mínima

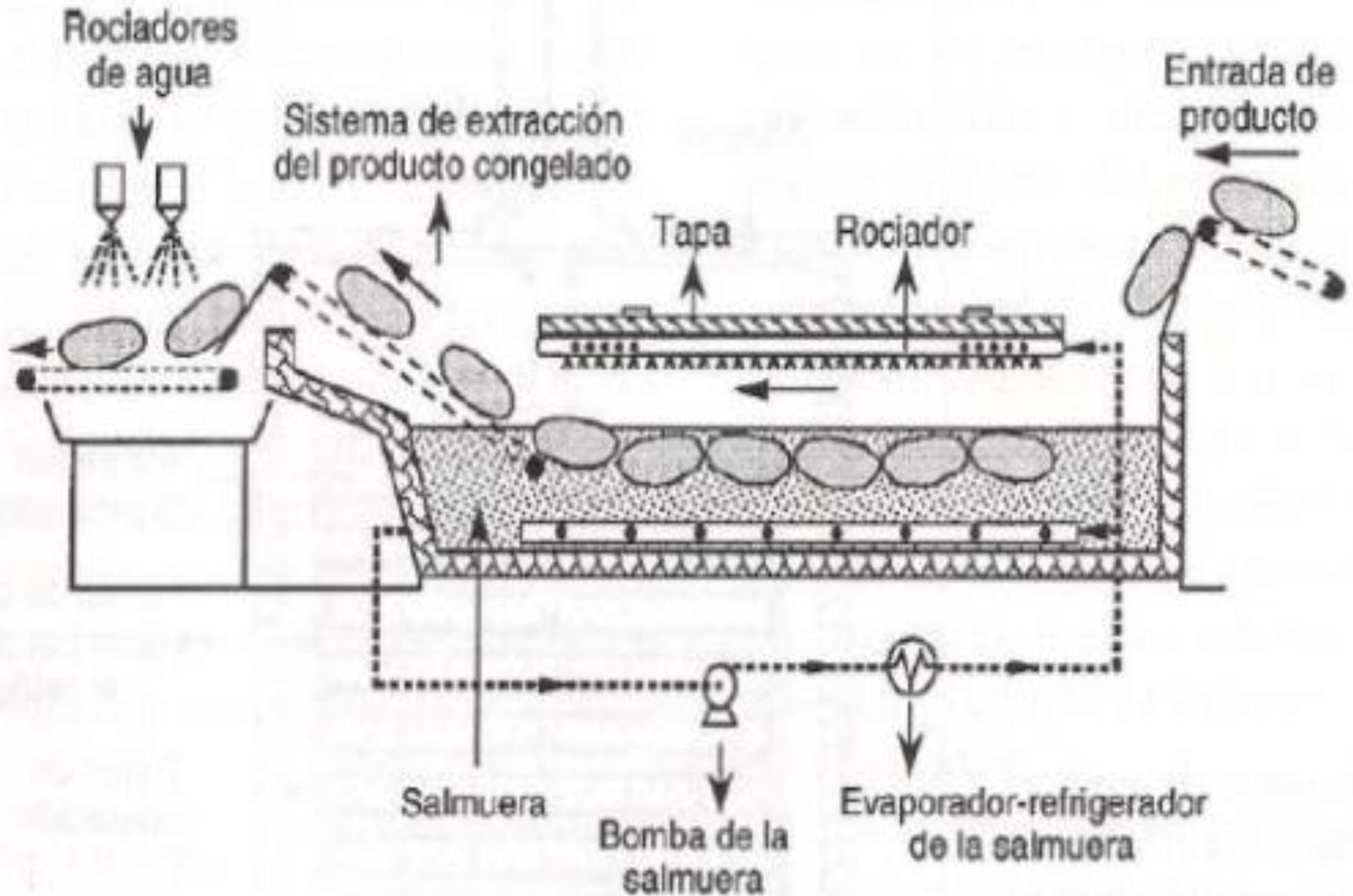




## **E. CONGELACIÓN POR INMERSIÓN:**

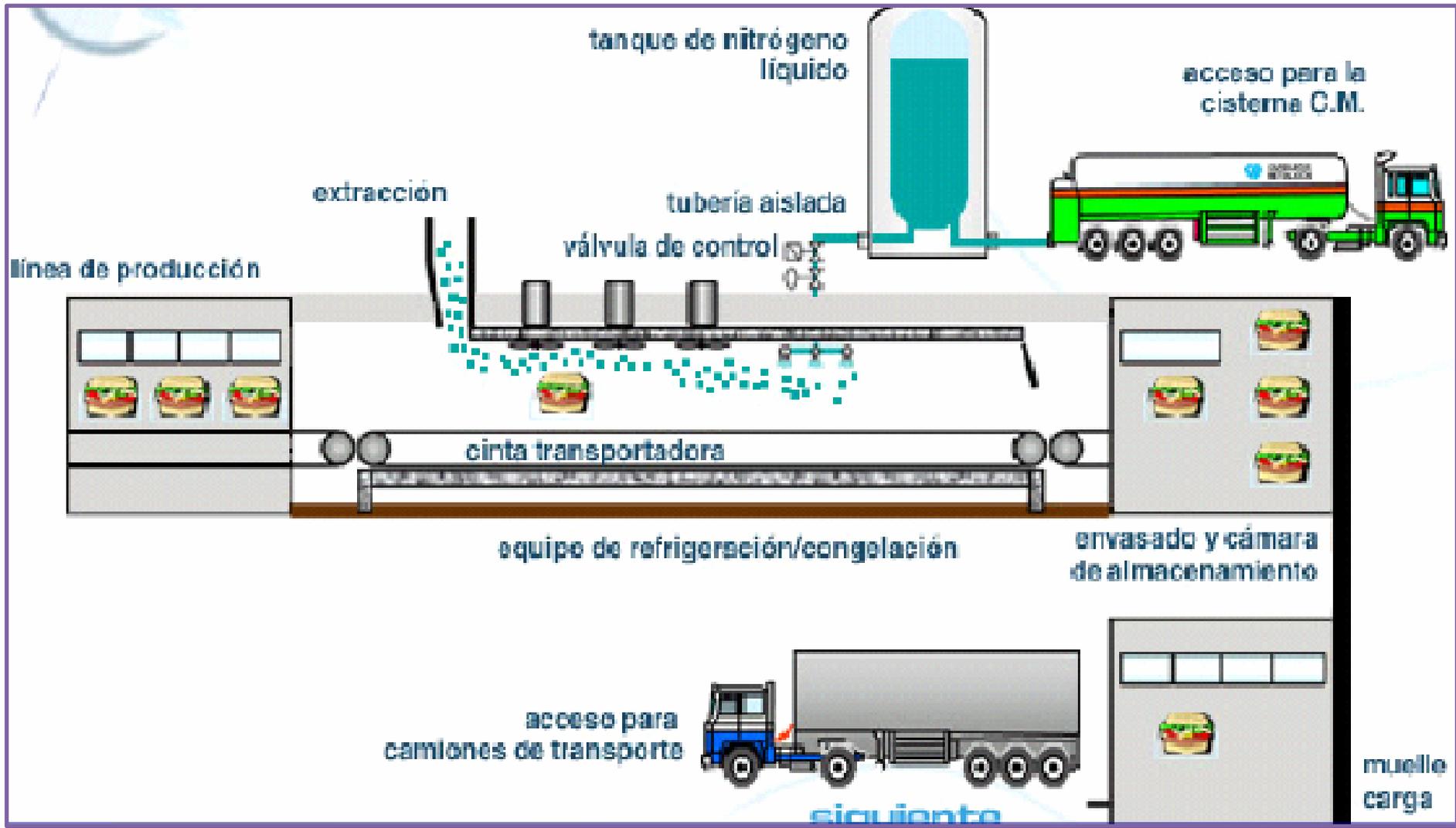
- Alimento circula por una cinta sin fin, atraviesa un tanque que contiene un líquido (propilenglicol, etilenglicol, salmuera).
- El líquido no cambia de fase.
- Una aplicación es la pre-congelación rápida de aves envasadas a vacío.
- Condición de los refrigerantes: no tóxicos, puros, limpios, ausencia de olores y sabores extraños, baja penetración en el alimento, baja viscosidad, baja corrosividad.
  - **DESVENTAJAS**
    - ✓ Mucho tiempo de exposición pierde su aspecto y puede adquirir sabores.
    - ✓ La sal provoca corrosión y deteriora instalaciones.
    - ✓ Prescripciones higiénicas.
  - **VENTAJAS**
    - ✓ Contacto íntimo, reduce la resistencia.
    - ✓ Unidades sueltas de formas regulares e irregulares pueden congelarse individualmente.

# CONGELACIÓN POR INMERSIÓN



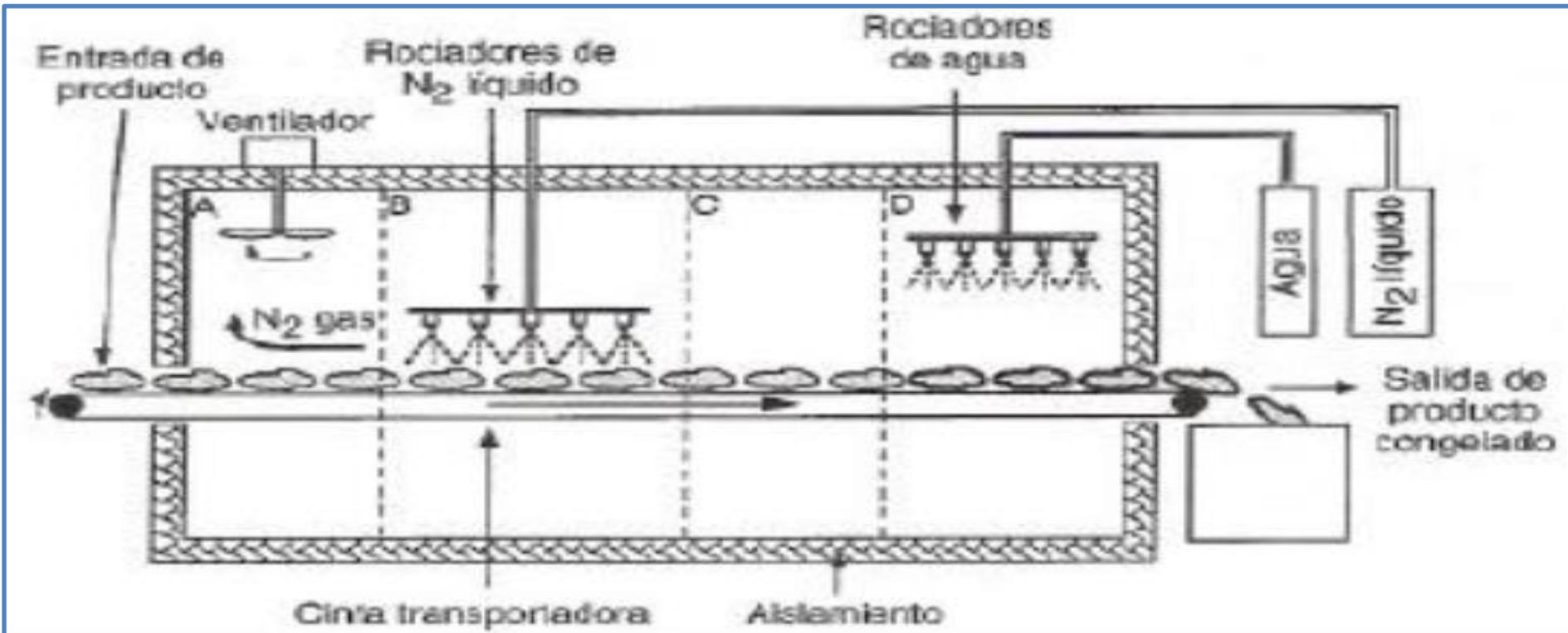
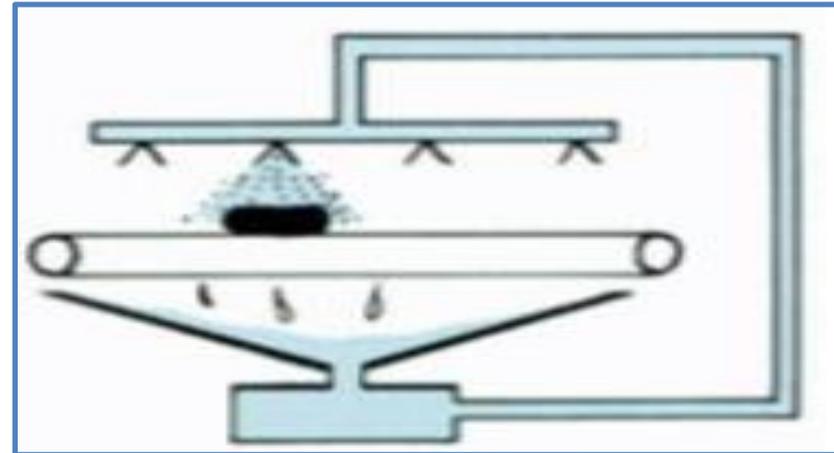
# F. CONGELACION CON FLUIDOS CRIOGENICOS:

- El refrigerante cambia de estado a merced del calor que absorbe del producto, entra en contacto intimo con el alimento.
- Principal desventaja: costo relativamente elevado de refrigerante.
- Se reserva a casos muy específicos, productos de alto valor añadido, estacionales.



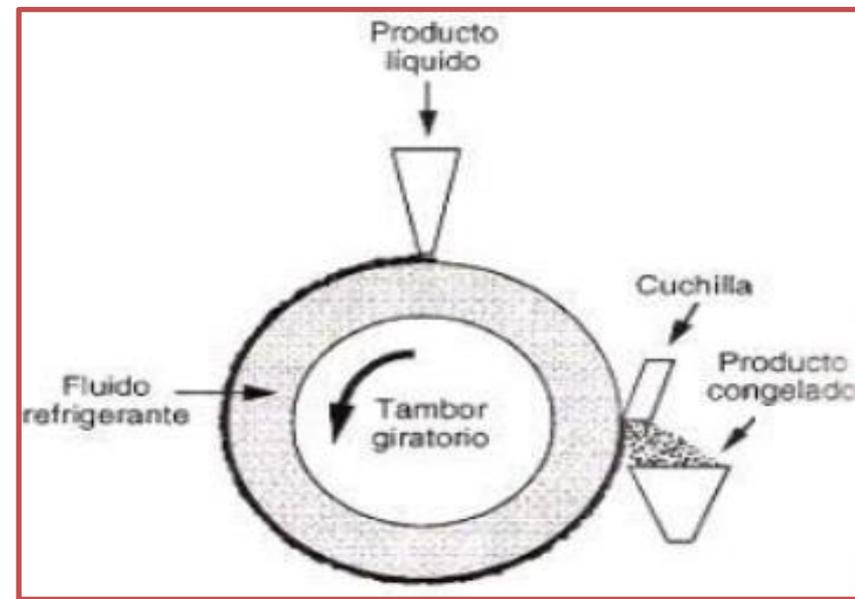
# CONGELACIÓN POR NITRÓGENO LIQUIDO:

Enfriamiento por pulverización con fluidos criogénicos



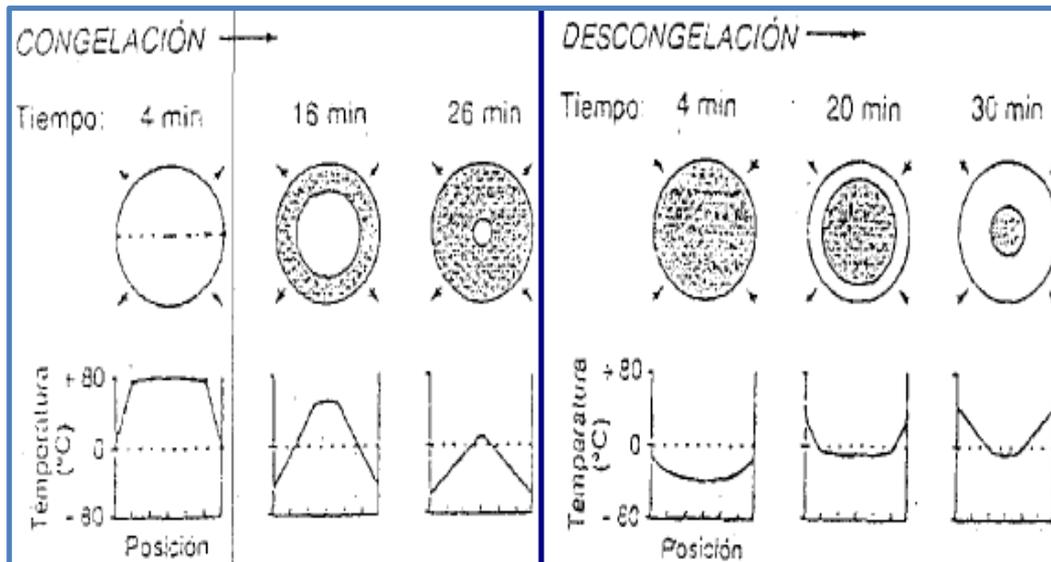
## G. CONGELADORES DE SUPERFICIE DE RASCADA:

- Alimentos líquidos y semipastosos (HELADO).
- El rotor giratorio desprende la mezcla de la superficie e incorpora aire.
- Tambor que gira sobre un eje horizontal cuya parte inferior pasa por un depósito que contiene el producto a congelar. Un cuchillo raspador permite recoger el alimento congelado.



## DESCONGELAMIENTO:

- Por múltiples razones la descongelación es una etapa crítica desde el punto de vista microbiológico.
- El exudado compuesto por agua y sustancias nutritivas aparece en primer lugar en la superficie del producto en la zona en que la temperatura es menos fría y donde la contaminación inicial es más elevada.



- La descongelación debe estar diseñada de manera de minimizar los siguientes fenómenos:
  - ✓ crecimiento microbiano,
  - ✓ pérdida de líquido,
  - ✓ pérdida por evaporación, y
  - ✓ reacciones de deterioro.
  
- La descongelación requiere tiempos más largos que la congelación en situaciones comparables de fuerza impulsora ya que la transferencia calórico se produce a través del alimento descongelado cuya conductividad y difusividad térmica son mucho menores que las correspondientes al congelado.
  
- Resulta desfavorable el mantenimiento prolongado a una temperatura ligeramente inferior a 0°, por tres motivos:
  - El producto queda expuesto a concentraciones relativamente altas de solutos.
  - Los cristales de hielo se agrandan.
  - Se favorece el desarrollo de los microorganismos psicrófilos, debido a que el exudado se enriquece en compuestos nutritivos.

- En alimentos con estructura tisular, la magnitud de la pérdida del jugo es el índice más importante de la reversibilidad del tratamiento congelador. La salida de jugo se considera como una manifestación externa de la desnaturalización de las proteínas aún cuando no pueda estimarse esta última como la causa directa y única de aquel fenómeno.
- El componente principal del jugo es agua que no vuelve a ser adsorbida por el tejido. La salida de jugo puede motivar considerable pérdidas de sustancias solubles (vitaminas, enzimas, sales minerales, aminoácidos libres, proteínas del sarcoplasma).

