

**Centro de Investigación en
Alimentación
y Desarrollo, A. C.**

**ESTUDIO DIFUSIONAL DE NaCl, KCl Y
COMBINACIONES DE AMBAS EN CARNE DE RES
Y PUERCO**

por

ETNA AIDA PEÑA RAMOS

Tesis aprobada por la

DIRECCION DE CIENCIA Y TECNOLOGIA DE AUMENTOS

Como Requisito Parcial para
Obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS ESPECIALIDAD
EN NUTRICION Y ALIMENTOS**

HERMOSILLO, SONORA

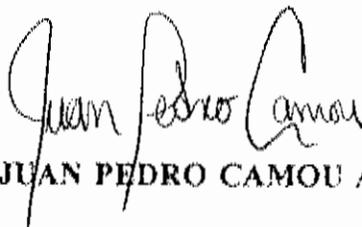
JULIO DE 1993

APROBACION

Los miembros del comité designado para revisar la tesis de Etna Aida Peña Ramos, la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS, con especialidad en NUTRICION Y ALIMENTOS dentro del Programa de Maestría en Ciencias, de la Dirección de Ciencia y Tecnología de Alimentos.



DRA. NATALIA F. GONZALEZ MENDEZ



DR. JUAN PEDRO CAMOU ARRIOLA

M.C. MARIA ISABEL GRIJALVA HARO

DECLARACION DEL AUTOR

Se permiten citas breves del material contenido en esta tesis sin permiso especial del autor, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente. Para citas y consultas mas amplias o para la reproducción íntegra de este documento con fines académicos, se podrá solicitar permiso al Director del Centro, al Jefe del Departamento de Alimentos de Origen Animal o al Director de la Tesis en el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. con dirección en Carretera a la Victoria Km. 0.6, Apartado Postal 1735. Hermosillo, Sonora. México. Bajo cualquier otra circunstancia, deberá solicitar permiso al autor.

Firma

ETNA AIDA PEÑA RAMOS

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más amplio agradecimiento al Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C., por haberme brindado la oportunidad de realizar mis estudios de Maestría en Nutrición y Alimentos y continuar al mismo tiempo con mi labor como Técnico Académico en esta Institución. Especialmente agradezco a la Dirección General, a la Dirección Administrativa y al Departamento de Tecnología de Alimentos de Origen Animal por proporcionar en forma adecuada los recursos necesarios para esta investigación.

A la Secretaría de Educación Pública (SEP) que a través de la Subsecretaría de Educación Superior e Investigación Científica y la Dirección General de Investigación Científica y Superación Académica (DGICSA), por aportar el apoyo financiero en 1991 y 1992, para llevar a cabo este trabajo dentro del proyecto intitulado: "PRODUCTOS CARNICOS HIPOSODICOS. Estudio de la difusión de los ingredientes de curado y de la factibilidad técnica de elaboración".

Deseo dar mi más sincero agradecimiento a mi Comité de Tesis integrado por la Dra. Natalia F. González M., el Dr. Juan Pedro Camou A. y la M.C. Ma. Isabel Grijalva H., por su guía, apoyo y dirección brindada durante la realización de este trabajo. Así como también a la Dra. María Isabel Silveira por su valiosa asesoría estadística para la planeación y análisis de resultados experimentales.

A los maestros que impartieron sus conocimientos en los cursos del programa de Maestría que tomé, especialmente a la M.C. Ana María Calderón, la Dra. María Isabel Silveira, el Dr. Ramón Pacheco A., la M.C. Martha Díaz C., el Dr. Juan Pedro Camou A. y la Dra. Natalia F. González M. GRACIAS POR SU AYUDA Y AMISTAD.

Al personal que labora en el Area de Carnes del CIAD: T.I.C. Germán Cumplido B., I.Q. Gastón Torrescano y Q.B. Armida Sánchez E.; sobre todo quiero agradecer a los tesisistas de licenciatura: pQ.B. Sonia García A., Q.B. Ma. de la Cruz Paredes, pQ.B. Luis Enrique González S. y Q.B. Martín Valenzuela, por su apoyo y la amistad que me brindaron.

También quiero hacer patente mi agradecimiento a la M.C. Ana Isabel Valenzuela y al pM.C. Javier A. Ojeda Contreras por la ayuda incondicional que me otorgaron en el inicio de este trabajo; así como también a la M.C. Luz de Carmen Montoya, Q.B. Oscar Fraijo y M.C. Evelia Acedo.

Por último, quiero agradecer de una manera muy especial al pQ.B. José Antonio Martínez L. por su invaluable ayuda, apoyo y amistad brindada durante la realización de todo este trabajo de tesis. MUCHAS GRACIAS.

Y a todas aquellas personas que de alguna u otra manera contribuyeron a la elaboración del presente trabajo.

DEDICATORIA

A ti Dios mio porque me has dado la vida, la salud y las fuerzas para continuar superándome

A mis Hijas: Etna y Sarita con todo mi amor, por cada uno de esos momentos de convivencia que se perdieron para que yo lograra terminar mis estudios. PERDON.

A todos y cada uno de los niños que nacen con el Síndrome de Down (especialmente a tí Sarita), ya que su presencia en este mundo nos muestra a la mayoría de la personas que tenemos la dicha de convivir con ustedes, el verdadero significado del AMOR y de la palabra HUMANIDAD. TE AMO HIJITA, BIENVENIDA Y SEGUIMOS ADELANTE.

A mi Manina por su apoyo en el momento justo y por el cariño incondicional que siempre me ha brindado. GRACIAS.

A Gustavo por su amor, cariño, y paciencia, y por haberme suplido en casa cuando mis hijas me necesitaron y no estuve.

A mis Padres, Hermanos y Sobrinos

A mis amigos, en especial a Toño, Sonia y Mary.

GRACIAS A CADA UNO DE USTEDES POR TODO LO QUE ME HAN DADO

DIOS LOS BENDIGA

AIDA

CONTENIDO

| | Página |
|---|--------|
| CONTENIDO | i |
| INDICE DE CUADROS | v |
| INDICE DE FIGURAS | viii |
| RESUMEN | xiii |
| INTRODUCCION | 1 |
| ANTECEDENTES BIBLIOGRAFICOS | 5 |
| Métodos de Conservación de Productos Cárnicos | 5 |
| Método de Salado | 5 |
| Método de Curado | 6 |
| Salado y Curado en Seco | 6 |
| Salado y Curado Húmedo | 7 |
| Importancia de la Reducción del Contenido de Sal | |
| en Alimentos | 8 |
| Sodio Dietario y la Hipertensión | 9 |
| Relación Sodio:Potasio | 10 |
| Sal y Productos Cárnicos | 11 |
| Funciones de la Sal | 11 |
| Métodos de Reducción de Sal | 13 |
| Adición de Fosfatos | 14 |
| Utilización de Otras Sales Cloradas | 15 |

CONTENIDO (Continuación)

| | Página |
|---|--------|
| Difusión de Solutos en Carne | 17 |
| Métodos para Determinar el Coeficiente de Difusión | 18 |
| Método de Capa Gruesa | 19 |
| Celda de Difusión | 25 |
| Factores que Influyen sobre el Coeficiente de Difusión | 32 |
| Concentración de Solute | 34 |
| Temperatura | 34 |
| Orientación de las Fibras Musculares | 35 |
| Procesos de Congelación/Descongelación | 35 |
| MATERIALES Y METODOS | 38 |
| Materiales | 38 |
| Carne | 38 |
| Sales | 38 |
| Mezclas NaCl/KCl | 39 |
| Dispositivos para difusión | 39 |

CONTENIDO (Continuación)

| | Página |
|--|--------|
| Métodos | 41 |
| Selección del Material Cárnico | 41 |
| Carne de Puerco | 41 |
| Carne de Res | 42 |
| Preparación del Material Cárnico | 43 |
| Salado | 44 |
| Preparación de las Muestras | 46 |
| Determinación de Humedad | 46 |
| Determinación de Sodio y Potasio | 47 |
| Determinación de Cloro | 48 |
| Cálculo del Coeficiente de Difusión Aparente | 50 |
| Modelo de Regresión Lineal | 51 |
| Modelo de Regresión No-Lineal | 52 |
| Diseño Experimental | 52 |
| Análisis Estadístico | 53 |
| RESULTADOS Y DISCUSION | 55 |
| Contenido de Humedad | 55 |

CONTENIDO (Continuación)

| | Página |
|--|--------|
| Contenido de Sodio, Potasio y Cloro | 58 |
| Determinación del Coeficiente de Difusión Aparente | 59 |
| Regresión Lineal | 59 |
| Comparación entre Mezclas | 66 |
| Comparación entre Estado de Carne | 71 |
| Comparación entre Tipo de Carne | 71 |
| Regresión No-Lineal | 74 |
| Comparación entre Mezclas y Estado de Carne | 82 |
| Comparación entre Tipo de Carne | 93 |
| Diferencias entre Sodio y Potasio | 98 |
| CONCLUSIONES | 107 |
| RECOMENDACIONES | 110 |
| APENDICE A | 111 |
| Nomenclatura | 112 |
| APENDICE B | 114 |
| Figuras: Perfiles de Concentración | 115 |
| BIBLIOGRAFIA | 127 |

INDICE DE CUADROS

| | Página |
|---|--------|
| 1. Contenido de Sodio de la Carne Rojas y de sus Productos Procesados | 12 |
| 2. Coeficientes de Difusión aparente ($\times 10^9 \text{ m}^2/\text{seg}$) de diferentes Iones en carne de res y puerco a 2°C | 31 |
| 3. Coeficientes de Difusión aparente ($\times 10^9 \text{ m}^2/\text{seg}$) del ion Cloro en carne de res y puerco a 2°C | 33 |
| 4. Mezclas utilizadas para la Determinación de los Coeficientes de Difusión de Sodio, Potasio y Cloro | 39 |
| 5. Condiciones Empleadas en el Proceso de Salado, Congelación y Descongelación | 45 |
| 6. Condiciones Instrumentales Empleadas para la Determinación de Sodio y Potasio | 49 |
| 7. Coeficientes de Difusión Aparente ($\text{Da} \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{seg}$) y de Regresión (R^2) obtenidos para Puerco Fresco a partir del modelo lineal para cada mezcla (M) estudiada | 60 |
| 8. Coeficientes de Difusión Aparente ($\text{Da} \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{seg}$) y de Regresión (R^2) obtenidos para Puerco Congelado/Descongelado Lento a partir del modelo lineal para cada mezcla (M) estudiada | 62 |

INDICE DE CUADROS (Continuación)

| | Página |
|--|--------|
| 9. Coeficientes de Difusión Aparente ($D_a \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{seg}$) y de Regresión (R^2) obtenidos para Res Fresca a partir del modelo lineal para cada mezcla (M) estudiada | 63 |
| 10. Coeficientes de Difusión Aparente ($D_a \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{seg}$) y de Regresión (R^2) obtenidos para Res Congelada/Descongelada Lento a partir del modelo lineal para cada mezcla (M) estudiada | 65 |
| 11. Comparación entre mezclas (M) en carne de Puerco Fresco y C/DL por medio de polinomios ortogonales ($p < 0.05$) | 67 |
| 12. Comparación entre mezclas (M) en carne de Res Fresca y C/DL por medio de polinomios ortogonales ($p < 0.05$) | 69 |
| 13. Efecto del Estado de Carne (Fresco o C/DL) en los perfiles de concentración lineales de cloro, sodio y potasio dentro de un mismo tipo de carne (especie animal) en las mezclas (M) estudiadas | 72 |
| 14. Efecto del Tipo de Carne en los perfiles de concentración lineales de cloro, sodio y potasio dentro de un mismo estado de carne en las mezclas (M) estudiadas | 73 |
| 15. Coeficientes de Difusión Aparente ($D_a \times 10^9 \text{ cm}^2/\text{seg}$) y de Regresión (R^2) obtenidos para Puerco Fresco a partir del modelo no-lineal para cada mezcla (M) estudiada | 76 |

INDICE DE CUADROS (Continuación)

| | Página |
|--|--------|
| 16. Coeficientes de Difusión Aparente ($D_a \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{seg}$) y de Regresión (R^2) obtenidos para Puerco Congelada/Descongelado Lento a partir del modelo no-lineal para cada mezcla (M) estudiada | 77 |
| 17. Coeficientes de Difusión Aparente ($D_a \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{seg}$) y de Regresión (R^2) obtenidos para Res Fresca a partir del modelo no-lineal para cada mezcla (M) estudiada | 79 |
| 18. Coeficientes de Difusión Aparente ($D_a \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{seg}$) y de Regresión (R^2) obtenidos para Res Congelada/Descongelado Lento a partir del modelo no-lineal para cada mezcla (M) estudiada | 81 |

INDICE DE FIGURAS

| | Página |
|--|--------|
| 1. Dispositivo utilizado en el Método de Capa Gruesa | 20 |
| 2. Solución Gráfica de las Ecuaciones 4 y 9 | 24 |
| 3. Dispositivo utilizado en el Método de Celda de Difusión desarrollado por Fox (1980) | 26 |
| 4. Dispositivo utilizado en el Método de Celda de Difusión desarrollado por Djelveh <i>et al.</i> (1989) | 29 |
| 5. Dispositivos utilizados en la Determinación de Coeficientes de Difusión de Sodio, Potasio y Cloro | 40 |
| 6. Contenido de Humedad (%) en carne de res en los diferentes tratamientos (Mezcla M) | 56 |
| 7. Contenido de Humedad (%) en carne de puerco en los diferentes tratamientos (Mezcla M) | 57 |
| 8. Comparación entre valores de D_a para cloro en diferentes mezclas (M) y estado de carne en Puerco | 83 |
| 9. Comparación entre valores de D_a para sodio en diferentes mezclas (M) y estado de carne en Puerco | 85 |
| 10. Comparación entre valores de D_a para potasio en diferentes mezclas (M) y estado de carne en Puerco | 87 |
| 11. Comparación entre valores de D_a para cloro en diferentes mezclas (M) y estado de carne en Res | 89 |

INDICE DE FIGURAS (Continuación)

| | Página |
|--|--------|
| 12. Comparación entre valores de Da para sodio en diferentes mezclas (M) y estado de carne en Res | 90 |
| 13. Comparación entre valores de Da para potasio en diferentes mezclas (M) y estado de carne en Res | 92 |
| 14. Comparación por tipo de carne entre valores de Da de cloro en carne Fresca y para cada mezcla (M) estudiada | 94 |
| 15. Comparación por tipo de carne entre valores de Da de cloro en carne Congelada/Descongelada Lento y para mezcla (M) estudiada | 95 |
| 16. Comparación por tipo de carne entre valores de Da de sodio en carne Fresca y para cada mezcla (M) estudiada | 96 |
| 17. Comparación por tipo de carne entre valores de Da de sodio en carne Congelada/Descongelada Lento y para mezcla (M) estudiada | 97 |
| 18. Comparación por tipo de carne entre valores de Da de potasio en carne Fresca y para cada mezcla (M) estudiada | 98 |
| 19. Comparación por tipo de carne entre valores de Da de potasio en carne Congelada/Descongelada Lento y para mezcla (M) estudiada | 99 |
| 20. Comparación entre Da para sodio y potasio en la mezcla 2 (80% NaCl, 20% KCl) | 101 |

INDICE DE FIGURAS (Continuación)

| | Página |
|--|--------|
| 21. Comparación entre D_a para sodio y potasio en la mezcla 3 (60% NaCl, 40% KCl) | 102 |
| 22. Comparación entre D_a para sodio y potasio en la mezcla 4 (40% NaCl, 60% KCl) | 103 |
| 23. Comparación entre D_a para sodio y potasio en la mezcla 5 (20% NaCl, 80% KCl) | 104 |
| 24. Comparación entre D_a para sodio y potasio cuando no se encuentran mezclados (100% NaCl; 100%KCl) | 105 |
| 25. Perfiles de Concentración en función de la distancia de penetración de iones en la mezcla 1 para carne de Puerco Fresca y C/DL | 115 |
| 26. Perfiles de Concentración en función de la distancia de penetración de iones en la mezcla 1 para carne de Res Fresca y C/DL | 116 |
| 27. Perfiles de Concentración en función de la distancia de penetración de iones en la mezcla 2 para carne de Puerco Fresca y C/DL | 117 |
| 28. Perfiles de Concentración en función de la distancia de penetración de iones en la mezcla 2 para carne de Res Fresca y C/DL | 118 |

INDICE DE FIGURAS (Continuación)

| | Página |
|--|--------|
| 29. Perfiles de Concentración en función de la distancia de penetración de iones en la mezcla 3 para carne de Puerco Fresca y C/DL | 119 |
| 30. Perfiles de Concentración en función de la distancia de penetración de iones en la mezcla 3 para carne de Res Fresca y C/DL | 120 |
| 31. Perfiles de Concentración en función de la distancia de penetración de iones en la mezcla 4 para carne de Puerco Fresca y C/DL | 121 |
| 32. Perfiles de Concentración en función de la distancia de penetración de iones en la mezcla 4 para carne de Res Fresca y C/DL | 122 |
| 33. Perfiles de Concentración en función de la distancia de penetración de iones en la mezcla 5 para carne de Puerco Fresca y C/DL | 123 |
| 34. Perfiles de Concentración en función de la distancia de penetración de iones en la mezcla 5 para carne de Res Fresca y C/DL | 124 |
| 35. Perfiles de Concentración en función de la distancia de penetración de iones en la mezcla 6 para carne de Puerco Fresca y C/DL | 125 |

INDICE DE FIGURAS (Continuación)

| | Página |
|---|--------|
| 36. Perfiles de Concentración en función de la distancia de penetración de iones en la mezcla 6 para carne de Res Fresca y C/DL | 126 |

RESUMEN

Se estudió en músculo Longissimus dorsi de puerco y res, el comportamiento difusional del cloruro de sodio (NaCl), cloruro de potasio (KCl) y sus mezclas con el objeto de determinar su velocidad a través de su coeficiente de difusión aparente (D_a). Se utilizó el método de difusión en capa gruesa para un medio semi-infinito. El salado se realizó durante 8 días a 2°C usando las siguientes mezclas: 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80 y 0:100 de NaCl:KCl respectivamente. Estas mezclas se aplicaron tanto en carne fresca como congelada/descongelada lenta (C/DL). Las concentraciones de sodio y potasio se determinaron utilizando la técnica de emisión atómica y las de cloro se analizaron por medio de un clorohidrómetro. Los valores de D_a se calcularon por dos modelos: lineal (regresión simple) y no-lineal (iteración matemática).

El modelo no-lineal fue más confiable para la determinación de D_a en carne. Los resultados obtenidos para el no-lineal muestran que los iones sodio, potasio y cloro siguen el comportamiento descrito por la Ley de Fick ($R^2 > 0.85$). Se encontraron además diferencias significativas entre los valores de D_a dependiendo de la mezcla para los tres iones ($p < 0.05$) y que la velocidad de difusión de cloro y potasio se ve afectada por el estado de carne (fresca y C/DL) y por el tipo de carne (puerco y res); teniéndose velocidades más altas en carne C/DL y en res ($p < 0.05$). En cambio la velocidad de sodio no se ve afectada ni por el estado ni por el tipo de carne ($p > 0.05$) en la mayoría de los casos. También se encontraron valores más altos de D_a ($p < 0.05$) de sodio y potasio cuando estos se encontraban mezclados. En particular para potasio el valor de D_a aumenta (para todos los tratamientos) a medida que aumenta la concentración de sodio en la mezcla. Además se pudo notar que el potasio se difunde más rápido en aquellas mezclas (80:20 y 60:40) que comúnmente se emplean en la elaboración de productos cárnicos hiposódicos.

INTRODUCCION

En la última década se ha puesto énfasis en la influencia de la alimentación sobre la salud y dentro de ésta, se ha subrayado la importancia de relación entre la alta ingesta de sodio, principalmente a través del consumo de sal (NaCl) y el desarrollo de la hipertensión particularmente en individuos con predisposición genética (McCarron, 1985; Sebranek *et al.*, 1983; Grijalva *et al.*, 1990). Aunque la relación sodio/hipertensión no es de simple causa y efecto, numerosas fuentes validan que la ingesta de sodio debería ser reducida. Los alimentos como las carnes rojas, pescado y aves contribuyen aproximadamente con 15-25% del sodio en una dieta promedio (Andres, 1982; Fregley, 1981; Sebranek *et al.*, 1983). Además estos alimentos en la forma procesada tales como los embutidos, salchichas pueden llegar a contener más de 300 mg de sodio por porción (AMA, 1983). Estos contenidos hacen a los productos procesados principales candidatos para su reducción en el consumo diario. Sin embargo, al hacer esta reducción se disminuye con ello la ingesta de nutrientes tan importantes como el hierro y las vitaminas del complejo B.

Los métodos de salado y curado que se emplean para conservar la carne, utilizan cantidades que van del 2 al 100% de sal o cloruro de sodio dependiendo del método de conservación que se utilice. Pero, una reducción de los niveles de sal empleados no puede llevarse a cabo en una forma arbitraria, ya que la sal además de proporcionar el

sabor característico a los productos cárnicos (propio del ion sodio) (Gillett, 1985), confiere la calidad sanitaria y es fundamental para la extracción de las proteínas miofibrilares. La extracción y solubilización de estas proteínas promueven el enlace entre los componentes de la carne, proporcionando las características de textura y firmeza: el ion cloro es el responsable de estas propiedades funcionales (Maurer, 1983; Sebranek *et al.*, 1983).

Se han evaluado diversos métodos para disminuir el contenido de NaCl de las carnes procesadas sin alterar su calidad. Entre estos métodos está: la adición de fosfatos, la reducción de los niveles de sal empleados y el uso de otras sales cloradas (Sofos, 1986; Knipe *et al.*, 1990; Barbut y Findlay, 1991; Hand *et al.*, 1982; Sofos, 1983). La sustitución parcial de cloruro de sodio por cloruro de potasio en una proporción de 70/30 respectivamente, se ha propuesto como una alternativa viable para la reducción del contenido de sodio en productos enteros como el jamón, pues mantiene las características físicas y organolépticas, eliminándose el sabor amargo que proporciona la sustitución completa. (Pinedo *et al.*, 1987; Leak *et al.*, 1987; Pasin *et al.*, 1989; Barbut y Findlay, 1991).

Si se quiere obtener un jamón hiposódico de buena calidad, ya sea salado ó curado, mediante la sustitución parcial del NaCl por KCl, es conveniente conocer en principio la velocidad con que se difunden estas sales. Puesto que en estos procesos de conservación de productos enteros, la difusión de los ingredientes del salado y curado

es el factor más importante que se debe tomar en cuenta y que define el tiempo necesario para que se lleve a cabo una distribución uniforme de estos ingredientes. (Fox, 1980; González-Mendez *et al.* 1985).

La determinación de los coeficientes de difusión de los ingredientes del salado y curado, es necesaria en el conocimiento del proceso de difusión. La Primera Ley de Fick de la Difusión no puede ser rigurosamente aplicada a la difusión de sales en el tejido muscular, porque este último no es un disolvente simple. Se han determinado experimentalmente los coeficientes de difusión para cloruro, nitrato, nitrito y glucosa en carne de puerco y res fresca (Dussap y Gros, 1980; Fox, 1980; González-Méndez, 1981; Gros *et al.*, 1984; Djelveh y Gros, 1987). Sin embargo no se encontró información en la literatura acerca de estudios realizados para determinar los coeficientes de difusión aparente de los iones sodio y potasio, ya sea solos ó en mezcla. Por todo lo expuesto anteriormente, el presente trabajo se plantean los siguientes objetivos:

Objetivo General

Determinar el comportamiento difusional de las sales de sodio y potasio, solas y en mezclas, en carne de res y puerco.

Objetivos Particulares:

- Determinar los coeficientes de difusión de los iones sodio, potasio y cloro en diferentes mezclas de NaCl:KCl (100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80 y 0:100 % en peso) en el músculo *Longissimus dorsi* de res y puerco.
- Determinar el efecto del tipo de carne y de las diferentes mezclas sobre el comportamiento difusional de estos iones.
- Determinar el efecto del proceso congelación/descongelación lenta (C/DL) sobre la velocidad de difusión de los iones sodio, potasio y cloro en cada tipo de carne.
- Determinar si existen diferencias en la velocidad de difusión de sodio y potasio cuando se encuentran puros o en mezcla.
- Evaluar los efectos del salado con diferentes mezclas de NaCl:KCl y de la aplicación del proceso C/DL sobre las pérdidas de humedad de los dos tipos de carne.

ANTECEDENTES BIBLIOGRAFICOS

Métodos de Conservación de Productos Cárnicos.

Desde épocas remotas el hombre ha buscado la forma de conservar sus alimentos. Hace miles de años se hizo la observación empírica de que la salazón conservaba la carne sin necesidad de mantenerla en condiciones de refrigeración (Lawrie, 1974).

Aunque la sal fue utilizada para conservar el pescado desde el año 3,500 A.C., el origen de este uso se pierde en la antigüedad. En el siglo V A.C., la conservación de productos cárnicos por salazón llegó a ser común. El hombre primitivo estuvo conciente de la acción conservadora de la sal, la cual fue encontrada posiblemente por accidente. También es probable que las propiedades de color y conservación impartidas por el salitre (nitritos) fueron descubiertas como un resultado de su presencia en forma de impurezas en la sal (Kramlich, 1980). En base al empleo de estos dos compuestos (sal y nitritos) los métodos de conservación de la carne (por acción química) se dividen en Salado y Curado.

Método de Salado.

El salado consiste en la adición de sal a la carne con el fin de conservarla. Esta sal destruye ó inactiva a los microorganismos y a las enzimas perjudiciales que se

encuentran presentes en la carne. La sal impide el crecimiento de bacterias debido al aumento de la presión osmótica en la carne, lo que trae como consecuencia una disminución en la actividad acuosa (Pearson y Tauber, 1984).

Algunas bacterias, levaduras y mohos (halofílicos) pueden desarrollarse en concentraciones salinas muy altas, que llegan a alcanzar el punto de saturación. Afortunadamente la mayoría de los microorganismos indeseables que comúnmente se desarrollan en la carne ó productos cárnicos ven inhibido su crecimiento a concentraciones relativamente bajas de sal (Soto Pablos, 1986).

Método de Curado.

En el curado, además de utilizar sal, se emplean sales de nitrito ó nitrato a veces en combinación con diferentes especias y azúcares a fin de obtener un producto conservable y con características agradables de textura, color, aroma y sabor.

Los métodos de curado y salado se clasifican de acuerdo a la técnica empleada en la introducción de la sal y los demás ingredientes de curado (Mohler, 1982).

Salado y Curado en Seco . Poco ha variado en el curso de los siglos la más antigua forma de conservación de grandes piezas de carne mediante salazón. La salazón en seco consiste en frotar sobre la superficie de la pieza a conservar, 95% de sal (en base a la cantidad de ingredientes no cárnicos empleados). Las diferencias de sabor obedecen

principalmente a la adición de azúcar, especias y condimentos. Como sustancia curante sirve con preferencia el nitrito (Mohler, 1982).

La duración del curado y salado en seco depende de dos factores. El primer factor es la penetración de la sal, la cual se lleva a cabo con mayor rapidez cuanto más delgada es la pieza y la capa de grasa que la recubre. Por ello, las piezas grandes se cortan con frecuencia y se extienden sobre superficies planas y por separado. El segundo factor en importancia es la temperatura. La velocidad de todas las reacciones participantes en el curado (formación del pigmento y la difusión de sales) aumenta a medida que lo hace la temperatura. Pero debe tomarse en cuenta que a temperaturas relativamente altas, existe el peligro de la proliferación de microorganismos indeseables. Para la práctica se ha propuesto la temperatura de 6-8°C como óptima (Pearson y Tauber, 1984; Mohler, 1982).

El curado en seco tiene algunas ventajas como son: 1) es seguro ya que hay pocos casos de putrefacción, 2) es fácil y sencillo de realizar. Aunque presenta las siguientes desventajas: 1) el tiempo de curado es muy largo, 2) existen problemas de encogimiento (pérdidas de peso), 3) presenta un alto riesgo de acidificación de la carne alrededor de los huesos y 4) tiene un alto riesgo de que se presente rancidez de la grasa superficial (Mohler, 1982).

Salado y Curado en Húmedo. Este sistema consiste en utilizar el agua como vector de las sustancias curantes, sumergiendo las carnes a curar en una salmuera. Las ventajas

del curado húmedo incluyen una completa disolución de los ingredientes solubles, dando como resultado una distribución uniforme y una reducción del tiempo de curado. Este proceso cuando se efectúa por simple inmersión de las piezas en la salmuera, tiene el riesgo de acidificación alrededor de los huesos debido a la lenta migración de las sustancias curantes (Paltrinier y Meyer, 1983).

La salmuera curante se prepara por lo regular, disolviendo sal con nitrito en agua en una relación de sal en la salmuera entre el 15 y 20%. Debido a la necesidad de que la salmuera curante se distribuyera en el músculo de manera uniforme y lo más rápidamente posible, se dió origen al curado por inyección. Este método puede llevarse a cabo en diversas formas (arterial ó muscular; con agujas sencillas ó múltiples) y se realiza como tratamiento previo al curado en depósitos ó tanques de salmuera (inmersión) (Paltrinier y Meyer, 1983; Muller, 1990).

Importancia de la Reducción del Contenido de Sal en Alimentos

En las últimas décadas el público consumidor a tomado conciencia sobre el efecto nocivo que puede tener sobre su salud, la alta ingestión de ciertos nutrimentos que forman parte de los alimentos como pueden ser grasas y sal.

Como se puede observar en la revisión anterior sobre los métodos de conservación de la carne las cantidades de cloruro de sodio empleado es alto,

independientemente del método de salado ó curado que se emplee en la elaboración de los diferentes productos cárnicos.

Sodio Dietario e Hipertensión

Durante los últimos 20 años diversos investigadores mostraron que la ingesta de sodio (en forma de cloruro de sodio ó sal común) tiene influencia en la presión arterial (Dahl, 1972; Tobian, 1979; Sebranek *et al.*, 1983; Grijalva *et al.*, 1990). Además, señalan que un elevado consumo de este nutrimento se encuentra entre los factores determinantes en el desarrollo de hipertensión y en particular, cuando los individuos tienen predisposición genética.

El sodio es un nutrimento indispensable para el mantenimiento de funciones fisiológicas en el organismo y que no se almacena en el cuerpo cuando existe un consumo alto. Los requerimientos mínimos de sodio para adultos son de alrededor de 500 mg por día (equivalentes a 1250 mg de cloruro de sodio) para mantener el balance fisiológico (Gardenswartz y Schrier, 1982). Sin embargo, el reporte publicado por la Recommended Dietary Allowances (RDA) (NAS, 1989) indica que el consumo promedio de sal en Estados Unidos supera hasta 20 veces el límite recomendado.

En México y en particular el Estado de Sonora no es la excepción en cuanto a la alta ingestión de sodio. Grijalva (1987) en un estudio sobre la dieta promedio del

Estado de Sonora reporta una ingesta de 2.03 a 8.66 g sodio/día, subrayando que el 81 % de los individuos que participaron en el trabajo sobrepasaron la cantidad mínima recomendada dada por RDA (NAS, 1989).

Relación Sodio/Potasio. El sodio es el ión que ha recibido más atención en relación a hipertensión. Se han realizado diversos estudios que demuestran el efecto que tienen otros iones, como calcio y potasio sobre la presión arterial. Existen algunos trabajos en los que se ha encontrado una relación inversa entre la ingesta de calcio y presión arterial en la población de Estados Unidos (McCarron, 1985; McCarron, 1984).

En cuanto al ion potasio, se ha encontrado que la hipertensión es altamente prevalente en poblaciones en las cuales se tienen ingestas altas en sodio pero una dieta baja en potasio. Resultando en una dieta desproporcionada en la relación Na:K la cual tiene más importancia clínica en el desarrollo de hipertensión que el ion sodio solo (Wyatt, 1984; Fregly, 1983).

Una dieta que tiene una relación Na:K de 0.5 ha demostrado tener una reducción en los niveles de hipertensión. Las dietas típicas americanas tienen una relación en el rango de 1.5 - 6 (Wyatt, 1984) y para las dietas sonorenses es de 2.67 a 3.32 (Grijalva, 1987). En ambas dietas la relación Na:K está por encima de la recomendación que es de 0.58 (NAS, 1989).

Sal y Productos Cárnicos.

Aunque la relación sodio e hipertensión no es de simple causa y efecto, numerosas fuentes validan que la ingesta diaria de sodio debe ser reducida (Fregly, 1981; Andres, 1982; Sebranek *et al.*, 1983). Los alimentos en forma natural, como las carnes rojas, pescado y aves contribuyen aproximadamente con el 15 - 25% del sodio de una dieta promedio (Maurer, 1983; Terrell, 1983; Sebranek *et al.*, 1983; Sofos, 1986). En su forma procesada, estas carnes pueden llegar a contener más de 300 mg de sodio por porción, como se muestra en el Cuadro 1. Como se puede observar en este cuadro la cantidad de sodio en estos productos es elevada, lo cual los hace unos candidatos ideales para la reducción del contenido de sal en la dieta (AMA, 1983).

Sin embargo, una reducción de los niveles de sal en la elaboración de los diferentes productos cárnicos no puede realizarse de una forma arbitraria, ya que la sal juega un papel esencial durante el procesamiento de estos productos.

Funciones de la Sal. Es muy importante entender las funciones de la sal en el procesamiento de productos cárnicos, antes de intentar llevar a cabo una reducción de los niveles empleados. La sal a parte de proporcionar el sabor característico de los diferentes productos cárnicos (debido principalmente al ion sodio) (Gillette, 1985), también es fundamental en la extracción y solubilización de las proteínas miofibrilares (Pearson y Tauber, 1984).

Cuadro 1 : Contenido de sodio de las carnes rojas y de sus productos procesados.

| Producto | Contenido de sodio (mg/100g) |
|-----------------------------|------------------------------|
| Carnes cocidas | |
| Res | 65 |
| Borrego | 68 |
| Puerco | 69 |
| Ternera | 81 |
| Víceras | |
| Corazón (res) | 104 |
| Riñón (res) | 254 |
| Hígado (cabra) | 118 |
| Hígado (puerco) | 50 |
| Productos procesados | |
| Bologna (res) | 1,000 |
| Salchicha | 1,121 |
| Jamón (puerco) | 1,361 |
| Peperoni | 2,033 |
| Salchicha viena | 950 |

Fuente: Sebranek *et al.*, 1983.

La extracción y solubilización de éstas proteínas musculares promueve el enlace entre los componentes de la carne, aumenta la capacidad de retención de agua (CRA) y la capacidad emulsificante, confiriendo las características de textura al producto. El ión cloro es el responsable de estos aspectos funcionales (Sebranek *et al.*, 1983; Terrell, 1983; Wirth, 1990). Otra propiedad, ampliamente reconocida de la sal en los productos cárnicos, y que ya fue presentada en los métodos de curado es la de preservación ó conservación microbiológica (Maurer, 1983).

Métodos de Reducción de NaCl.

Debido a las propiedades funcionales antes mencionadas de la sal en la elaboración de productos cárnicos, el considerar una disminución o sustitución del cloruro de sodio puede traer como consecuencia una disminución drástica en los parámetros de calidad de éstos productos (Maurer, 1983; Terrell, 1983; Sebranek *et al.*, 1983; Wirth, 1990).

Se han propuesto diversos métodos para llevar a cabo una reducción o sustitución de la sal en los productos cárnicos, que tratan de mantener la calidad final de estos. Los métodos propuestos son: adición de fosfatos y la utilización de otras sales cloradas.

Adición de Fosofatos. El uso de fosfatos para la reducción del contenido de sodio en carnes procesadas emulsionadas ha sido permitido por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) desde 1982 en una concentración en el producto final no mayor de 0.5% (Knipe *et al.*, 1990). Los fosfatos que se emplean principalmente en la elaboración de productos cárnicos son: tripolifosfato de sodio y pirofosfato de sodio. Estos aditivos se han utilizado principalmente para mantener las propiedades físicas y funcionales (CRA y capacidad emulsificante) en los productos bajos en sodio. Los fosfatos tienen la propiedad de aumentar el pH de la carne a partir de su punto isoeléctrico, de incrementar la fuerza iónica y tienen además la habilidad de secuestrar iones metálicos divalentes (Sofos, 1986; Barbut y Mittal, 1989).

Es debido a estas propiedades que los polifosfatos aumentan la capacidad de retención de agua y el porcentaje de proteína extraída, independientemente del tipo de polifosfato (tripolifosfato de sodio ó pirofosfato de sodio) ó del estado físico en que se agregan a la mezcla cárnica (Sofos, 1986; Knipe *et al.*, 1990).

Sofos (1986) en su revisión sobre el uso de polifosfatos en productos bajos en sodio, reporta que existe mucha controversia entre las diferentes investigaciones sobre el efecto antimicrobiológico de los polifosfatos que se agregan en productos cárnicos hiposódicos. Algunos estudios demuestran que los polifosfatos bajo ciertas condiciones de pH y concentraciones de NaCl y nitrito, sí tienen un efecto inhibitor de los microorganismos.

El uso de fosfatos para mejorar las propiedades organolépticas de los productos cárnicos emulsionados hechos con contenido de NaCl mas bajo de lo normal (1-1.5% de NaCl), fue investigado por Keeton *et al.* (1984). Estos investigadores concluyeron que los fosfatos pueden realzar la salinidad de las carnes procesadas con bajos contenidos de sal al mismo tiempo que mantienen la intensidad del sabor y que mejoran la jugosidad del producto final.

En el caso de productos enteros no se tiene mucha información en cuanto al efecto de los fosfatos sobre los atributos sensoriales en productos bajos en sal. Sin embargo se ha encontrado que los fosfatos mejoran física y sensorialmente el jamón elaborado con contenidos normales de sal (Vollmar y Melton, 1981).

Utilización de otras Sales Cloradas. Otra alternativa viable para reducir el contenido de sodio de productos curados enteros como el jamón es sustituyendo la sal común por otras sales cloradas. Hand *et al.* (1982) evaluaron el efecto de la sustitución parcial (50%) o total del cloruro de sodio, en base a la fuerza iónica, por diferentes sales cloradas como cloruro de litio y cloruro de potasio sobre las propiedades sensoriales de jamón entero con hueso. En este estudio se concluyó que el cloruro de litio es la sal clorada que más se asemeja a las características sensoriales que confiere el cloruro de sodio, pero su uso no ha sido aceptado por el comite GRAS (Generally Recognized as Safe) para la elaboración de alimentos por ser un compuesto tóxico.

Por otro lado al realizar un remplazo total del cloruro de sodio por cloruro de potasio, los productos obtenidos no fueron aceptables ya que el ion potasio confiere un sabor astringente al producto, este hecho concuerda con lo reportado por Gillett (1985).

En el estudio anterior se recomienda realizar un reemplazo parcial menor al 50% de cloruro de sodio por cloruro de potasio para obtener productos sensorialmente aceptables.

Se han realizado diversos trabajos en los últimos años sobre el efecto de la sustitución parcial o total del cloruro de sodio por cloruro de potasio, en las características físicas y sensoriales del jamón salado en seco, estilo Serrano ó "Country", (Frye *et al.*, 1986; Pinedo *et al.*, 1987; Leak *et al.*, 1987) y de la carne de res y puerco (Pasin *et al.*, 1989; Barbut y Findlay, 1991; Lin *et al.*, 1991).

Estos estudios concluyeron que la combinación de NaCl/KCl y la sustitución de los ingredientes y aditivos conteniendo sodio por otros derivados de potasio y el uso de técnicas como el masajeado, son alternativas viables en la disminución del contenido de sodio en dichos productos. Respecto a la combinación NaCl/KCl, se reportó que usando una relación de 70/30 (% en peso) de estas sales respectivamente, el jamón seco estilo "Country" no presentó diferencias organolépticas en comparación con el 100% de NaCl (Keeton, 1984).

En el proceso de curado ó salado de productos enteros ó troceados como el jamón, la operación unitaria importante a considerar ya que define el tiempo necesario

para que se lleve a cabo una distribución uniforme de los ingredientes de curado, es la difusión de las sales (y demás ingredientes) en los tejidos de la carne. Por lo que si se desea obtener un jamón, ya sea salado ó curado, sustituyendo parcial ó totalmente el cloruro de sodio por cloruro de potasio, es conveniente conocer la velocidad con que se difunden estas sales.

Difusión de Solutos en Carne

La difusión de solutos en la carne, ya sea en condiciones de flujo continuo ó en estado no-estable, se rige por la Ley de Fick. Esta teoría matemática de difusión de sustancias isotrópicas esta basada en la hipótesis de que la velocidad de transferencia de la sustancia que se difunde a través de una unidad de área es proporcional al gradiente de concentración. La ecuación de la primera ley de Fick se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$F = -D \delta C / \delta x \quad (1)$$

donde F es la velocidad de transferencia por unidad de área, C es la concentración de la sustancia que se difunde, x es el espacio en el eje coordenado perpendicular al área de difusión y D es una constante llamada coeficiente de difusión (Crank, 1979).

Si se desea determinar la velocidad de difusión de un soluto en particular, se debe conocer primeramente su coeficiente de difusión. Sin embargo, la carne, al igual que otros alimentos, tiene una estructura muy heterogénea por lo que es difícil tener una idea precisa del volumen en el cual el soluto puede difundirse ó del comportamiento difusional que toma. Debido a ésto, el coeficiente de difusión de los solutos en carne no puede ser calculado matemáticamente a partir de la ecuación de la primera ley de Fick. Otra alternativa es determinarlo a partir de mediciones experimentales obteniéndose un coeficiente de difusión "aparente" ó "efectivo".

Los procedimientos experimentales que se utilizan generalmente para obtener los coeficientes de difusión aparentes (D_a) de solutos en los alimentos, consiste en medir la concentración de los solutos en la misma dirección del gradiente de concentración; es decir, determinar los perfiles de la cinética de difusión a través de la distancia a un tiempo determinado. De esta manera, el perfil y el correspondiente modelo matemático son utilizados para estimar D_a .

Métodos Para Determinar el Coeficiente de Difusión Aparente

Se utilizan principalmente dos métodos para calcular D_a y son los siguientes:

- 1) Difusión en estado no-estable a través de una capa gruesa de carne.
- 2) Difusión a través de una membrana en una celda de Difusión.

Ambos sistemas se rigen por la Segunda Ley de Fick que se expresa matemáticamente de la siguiente forma:

$$\frac{\delta C}{\delta t} = Da \frac{\delta^2 C}{\delta z^2} \quad (2)$$

La solución de esta ecuación depende de las condiciones experimentales expresadas en términos de condiciones frontera de cada método.

Difusión a través de una capa gruesa. En este primer método se coloca la carne dentro de unos dispositivos que pueden ser de vidrio y tener forma cilíndrica (Wistrieck *et al.*, 1960; Wood, 1966; Dussap y Gros, 1980) ó de acrílico con forma de paralelepípedo (Dussap y Gros, 1980; González-Méndez, 1981). En estos modelos experimentales la punta descubierta de la carne se pone en contacto directo con el soluto, ya sea en estado seco ó en solución como se indica en la figura 1.

Cuando el material sólido (la carne), inicialmente libre de soluto, se pone en contacto repentinamente con el soluto, y se mantiene constante la concentración en la interfase (C_i), las condiciones frontera son las siguientes:

Figura 1. Dispositivo utilizado en el Método de Capa Gruesa

$$\begin{array}{lll}
 t = 0 & C = C_0 & \forall z \\
 z = 0 & C = C_i & \forall t > 0 \\
 z \rightarrow \infty & C = C_0 & \forall t > 0
 \end{array} \quad (3)$$

La tercera condición corresponde al hecho que la duración de los experimentos es tal, que el soluto no alcanza el extremo de la carne, teniéndose por lo tanto un medio semi-infinito. La condición que debe satisfacerse para considerar este tipo de medio es que el número de Fourier (Fo) Da/L^2 sea menor de 0.05, donde L es la longitud del sólido (carne) a lo largo del eje z.

La solución de la ecuación (2) bajo las condiciones frontera (3) es:

$$M = 2 C_i \left(\frac{Da t}{\pi} \right)^{0.5} \quad (4)$$

Si $Fo > 0.05$, es decir, que la hipótesis de un medio semi-infinito no se puede seguir manteniendo, la última condición frontera debe cambiarse. Las condiciones frontera que a continuación se expresan son las que se presentan durante el curado y salado, donde la sal alcanza cada parte de la carne (Gros *et al.*, 1984).

$$\begin{array}{lll}
 t = 0 & C = C_0 & \forall z \\
 z = 0 & C = C_i & \forall t > 0 \\
 z = L & \frac{\delta C}{\delta z} = 0 & \forall t > 0
 \end{array} \quad (5)$$

La solución de la ecuación (2) con las condiciones (5) es:

$$\frac{C - C_0}{C_i - C_0} = 2 \sum \frac{(-1)^n}{(n + 1/2)\pi} \exp\left[-(n + 1/2)^2 \pi^2 \frac{D_0 t}{L^2}\right] \cos\left[-(n + 1/2)\pi \frac{z}{L}\right] \quad (6)$$

La solución de esta ecuación se obtiene gráficamente (Crank, 1979).

Las condiciones experimentales son diferentes cuando la carne y una cantidad fija de soluto M_0 se ponen en contacto. Entonces las condiciones frontera son (Dussap y Gros, 1979).

$$\begin{array}{lll}
 t = 0 & C = C_0 & \forall z > 0 \\
 z \rightarrow \infty & C = C_0 & \forall t > 0 \\
 M = M_0 = \int C dz & & \forall t > 0
 \end{array} \quad (7)$$

al comienzo del proceso de difusión, en otras palabras, cuando el medio puede ser considerado como semi-infinito. Sin embargo, cuando esto ya no es posible, la segunda relación de las condiciones frontera (7) se reemplaza por:

$$z = L \quad \frac{\delta C}{\delta z} = 0 \quad t > 0 \quad (8)$$

La solución de la ecuación (2) con las condiciones (7) es la siguiente (Crank, 1979):

$$C = \frac{M_0}{(\pi Da t)^{0.5}} \exp(-z^2/4Dat) \quad (9)$$

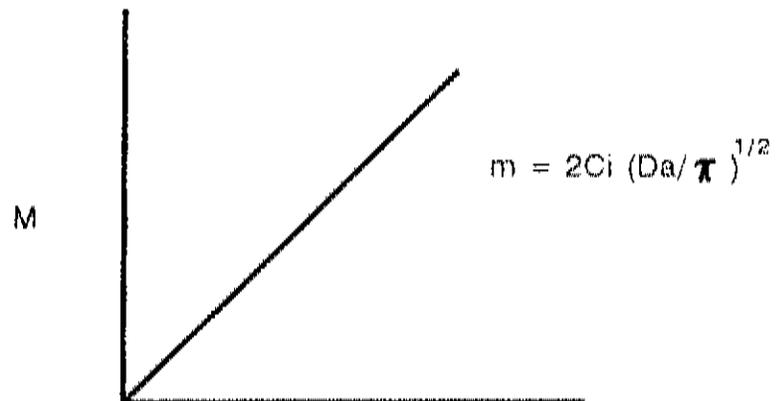
y la solución a las ecuaciones (2) y (8) (Dussap y Gross, 1979) es:

$$C = \frac{M_0}{\pi Da t} \left\{ \exp(-z^2/4Dat) + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\exp\left(\frac{-(2nL+z)^2}{4Dat}\right) + \exp\left(\frac{-(2nL-z)^2}{4Dat}\right) \right] \right\} \quad (10)$$

El Da es calculado en forma diferente de acuerdo con las condiciones experimentales usadas en las ecuaciones (4), (9) y (10). En el caso de los experimentos que corresponden a las ecuaciones (4) y (9), es posible dar un solución simple por medio de gráficas.

Para determinar el valor de Da en la ecuación (4) se homogeniza la muestra y se determina la cantidad de soluto M que penetró. La concentración de M se grafica contra t^h , obteniéndose una línea recta que pasa por el origen con una pendiente igual a $2 C_i (Da/\pi)^h$. A partir del valor de la pendiente se puede calcular Da (Figura 2) (Wood, 1966).

Ecuación 4.



Ecuación 9.

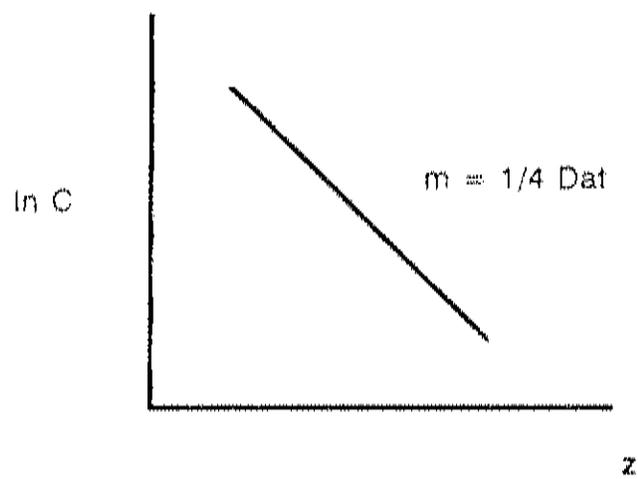


Figura 2. Solución Gráfica de las Ecuaciones 4 y 9.

En el caso de un medio semi-infinito (ecuación 9), la muestra de carne es cortada en rebanadas delgadas que se suponen homogéneas, a las cuales se les mide la concentración del soluto. Para un tiempo dado, se grafica el logaritmo de la concentración de soluto (C) contra la distancia de penetración al cuadrado (z^2), donde el valor de la pendiente es igual a $-\frac{1}{4} Da^2$ (Figura 2) (Gros *et al.*, 1984; González-Méndez *et al.*, 1985).

El cálculo de Da utilizando la ecuación (10), se realiza a partir de perfiles de concentración, minimizando la suma de cuadrados de las desviaciones entre los valores de concentración obtenidos experimentalmente (C_{exp}) y los valores calculados utilizando el modelo matemático (C_{cal}) (Dussap y Gros, 1979).

La determinación de Da empleando el método de capa gruesa tiene las siguientes ventajas y desventajas:

a) Ventajas.

- Es sencillo pues no requiere de equipos complicados.
- Es el método que mejor simula las interacciones que pueden ocurrir entre los solutos y la carne durante el tiempo de salado.

b) Desventajas.

- Los coeficientes de variación en la determinación de Da son relativamente altos, aproximadamente 30%.
- El tiempo de determinación es largo (una semana ó más).
- Es difícil evitar las fluctuaciones de temperatura que pueden darse durante un tiempo de determinación tan largo (ya que depende del equipo que se utiliza).

Celda de Difusión. Este segundo método experimental utilizado para la medición de los coeficientes de difusión fue desarrollado por Fox (1980) mediante una celda de difusión (Figura 3).

En este método se coloca una capa delgada de carne en medio de dos celdas perfectamente mezcladas con concentraciones iniciales diferentes. La capa de carne funciona como una membrana porosa, que permite el paso de él o los solutos a través de ella. Suponiendo un régimen estable de difusión a través de la capa, el balance entre las celdas 1 y 2 está dado por:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_2 \frac{dC_2}{dt} = \frac{Da S(C_1 - C_2)}{h} \\ V_1 \frac{dC_1}{dt} = \frac{Da S(C_1 - C_2)}{h} \end{array} \right. \quad (11)$$

Cuando $C_{2,0}$ (concentración de soluto a $t = 0$) es igual a cero y cuando V_1 es igual a V_2 , la concentración en la segunda celda esta dada por :

$$\log \left(\frac{C_{1,0} - 2C_2}{C_{1,0}} \right) = \frac{2}{V_2} \frac{DaS}{h} t \quad (12)$$

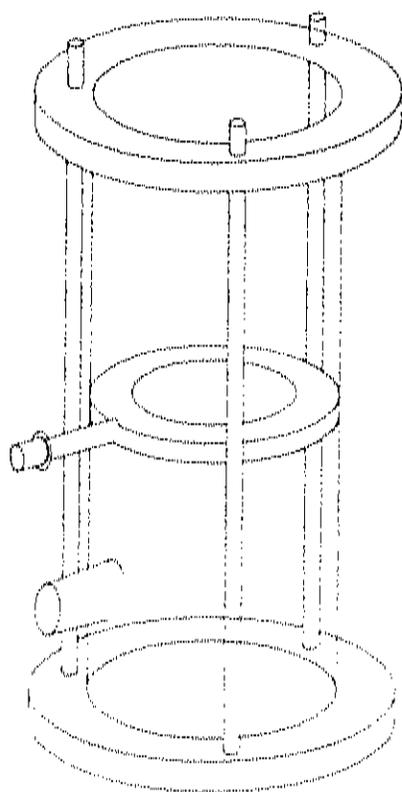


Figura 3. Dispositivo utilizado en el Método de Celda de Difusión desarrollada por Fox (1980).

Cuando la duración del experimento es tal que la concentración C_2 permanece baja, la ecuación anterior se reduce a:

$$C_2 = \frac{Da C_{1,0} S}{V_2 h} t \quad (13)$$

la cual resalta la cantidad de materia m que pasa a través del disco ó capa de carne, y que esta determinada por:

$$m = \frac{Da C_{1,0} S}{h} t \quad (14)$$

esta ecuación es muy fácil de determinar graficamente (Fox, 1980).

El método de celda desarrollado por Fox tiene las siguientes ventajas:

a) Ventajas:

- El tiempo de determinación es más rápido (horas).
- Requiere poca muestra.

b) Desventajas:

- Se tiene un alto riesgo de fugas.

- Los coeficientes de variación en la determinación de Da son relativamente altos, y de 8 a 32% dependiendo de la naturaleza del soluto.
- No se pueden predecir los cambios que se pueden originar en el medio de difusión por su interacción con el soluto.

Con el fin de evitar algunas de las desventajas del método de celda anterior, Djelveh *et al.*, (1989) desarrollaron una nueva celda de difusión que se muestra en la figura 4.

Las condiciones fronteras e iniciales para este modelo experimental son las siguientes:

$$\begin{array}{lll}
 t=0 & C_2 = C_{2,0} & \forall x \\
 x=0 & C_1 = C_{2,0} & \forall t=0 \\
 x=L & -SD \frac{\delta C_1}{\delta x} \Big|_{x=L} = V_2 \frac{\delta C_2}{\delta t} & \forall t > 0
 \end{array} \quad (15)$$

La segunda condición (al inicio del experimento) asume que a $x=0$, la concentración del soluto en la capa de alimento es igual a la que se encuentra en solución. La tercera condición frontera de la ecuación 15, significa que a $x=L$ el soluto proveniente de la superficie de alimento es inmediatamente mezclado dentro del segundo tanque.

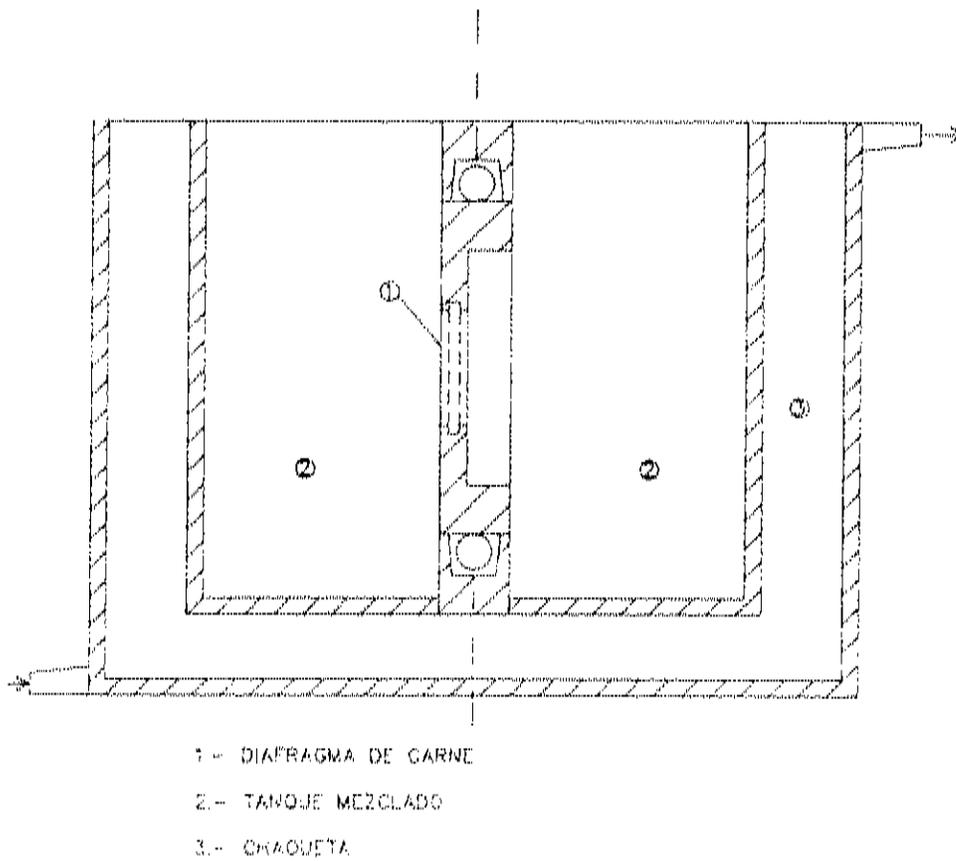


Figura 4. Dispositivo utilizado en el Método de Celda de Difusión desarrollado por Djelveh *et al.* (1989).

A partir de las ecuaciones 2 y 15 se obtiene la siguiente expresión para el cambio de concentración del soluto en el tanque receptor con respecto al tiempo:

$$\frac{C_2 - C_{2,0}}{C_{1,0} - C_{2,0}} = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2(\alpha_n^2 + a^2)}{\alpha_n^2 + a^2 + a} \frac{\text{sen } \alpha_n}{\alpha_n} \exp\left(-\frac{D \alpha_n^2 t}{L^2}\right) \quad (16)$$

En esta expresión a es igual a LS/V_2 y es un número adimensional, α son las raíces positivas de $\alpha \tan \alpha = a$. Este modelo matemático no supone estado quasi-estable de difusión. Los valores de Da se determinan a partir de la concentración en función del tiempo, minimizando los cuadrados de las desviaciones entre $C_{2,\text{exp}}$ observados y las $C_{2,\text{cal}}$ calculadas. Con esta celda de difusión, los valores de Da se obtienen en 180 minutos con un coeficiente de variación entre 3.8 y 11% dependiendo del soluto y el tipo de carne (Djelveh *et al.* 1989).

En el Cuadro 2 se enlistan los Da para diferentes solutos que se han evaluado en carne utilizando algunos de los modelos matemáticos antes señalados. Se puede observar que el Da de nitrito en res varía de 0.143 a 0.250×10^{-9} m²/seg y el de nitrato de 0.139 a 0.352×10^{-9} m²/seg, dependiendo del método de determinación para un mismo músculo.

Cuadro 2. Coeficientes de Difusión aparente ($\times 10^9 \text{m}^2/\text{seg}$) de diferentes iones en carne de res y puerco a 2°C.

| Tipo de Músculo | Soluto | Da ⁺ | Modelo Matemático | Fuente Bibliográfica | |
|-------------------------------|------------------------|-----------------|-------------------|------------------------------|-----------|
| RES <i>Semi tendinosus</i> | NO ₂ | 0.250 | Ec.4 | Wood, 1966 | |
| | NO ₃ | 0.352 | Ec.4 | Wood, 1980 | |
| | NO ₂ | 0.143 | Ec.14 | Fox, 1980 | |
| | NO ₃ | 0.139 | Ec.14 | Fox, 1980 | |
| | Glucosa | 0.046 | Ec.16 | Djelveh <i>et al.</i> , 1981 | |
| | NO ₃ | 0.139 | Ec.16 | Djelveh <i>et al.</i> , 1981 | |
| | Glicerol | 0.147* | Ec.4 | Favetto <i>et al.</i> , 1981 | |
| PUERCO <i>L. dorsi</i> | NO ₂ | 0.12 | Ec.14 | Fox, 1980 | |
| | NO ₃ | 0.22 | Ec.14 | Fox, 1980 | |
| | <i>R. Femoris</i> | NO ₂ | 0.11 | Ec.14 | Fox, 1980 |
| | <i>Semi tendinosus</i> | NO ₃ | 0.22 | Ec.14 | Fox, 1980 |
| | Grasa | NO ₂ | 0.018 | Ec.14 | Fox, 1980 |

* Determinado a 37°C.

En el Cuadro 3 se muestran los principales resultados publicados de los coeficientes de difusión aparentes para el ion cloro. Estos D_a fueron calculados a partir de las relaciones matemáticas discutidas anteriormente, especificando el tipo de carne y el tipo de músculo utilizado. Analizando este cuadro se puede señalar que independientemente del método o del modelo matemático utilizado, los valores de D_a para el ión cloro están entre 0.16 y $0.27 \times 10^{-9} \text{ m}^2 / \text{s}$. Dentro de estos límites se observa la tendencia de que la difusión de este ion es más rápida en músculos de res que en los de puerco (Gros *et al.*, 1984).

Factores que Influyen sobre los Coeficientes de Difusión

Existen algunos factores que al variarlos pueden tener influencia sobre los valores de D_a de solutos determinados en carne. Entre estos tenemos:

- Concentración del soluto.
- Temperatura.
- Orientación de las fibras musculares.
- Procesos de Congelación/Descongelación.

Cuadro 3. Coeficientes de Difusión aparentes ($\times 10^9 \text{m}^2/\text{seg}$) del ion cloro determinados en carne de res y puerco a 2°C.

| Tipo de Músculo | D_a | Estado de la Carne | Modelo Matemático | Fuente Bibliográfica |
|-------------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------|-------------------------------|
| RES <i>Semi tendinosus</i> | 0.234 | Cong/Desc* | Ee.4 | Wood,1966 |
| | 0.227 | Fresca | Ee.4 | Wood,1966 |
| | 0.207 | Fresca | Ee.14 | Fox,1980 |
| | 0.309 | Cong/Desc | Ee.9 | Gros <i>et al.</i> , 1984 |
| | 0.353 | Cong/Desc | Ee.16 | Djelveh <i>et al.</i> , 1988 |
| PUERCO <i>L. dorsi</i> | 0.162 | Fresca | Ee.4 | Wood, 1966 |
| | 0.174 | Cong/Desc | Ee.4 | Wood, 1966 |
| | 0.198 | Fresca | Ee.14 | Fox, 1980 |
| | 0.22 | Fresca | Ee.9 | Gros <i>et al.</i> , 1984 |
| | 0.215 | Fresca | Ee.9 | González <i>et al.</i> , 1985 |
| | 0.281 | Cong lent/ * Desc lent | Ee.9 | González <i>et al.</i> , 1985 |
| | 0.240 | Cong lent/ Desc rap | Ee.9 | González <i>et al.</i> , 1985 |
| | 0.238 | Cong rap/ Desc rap | Ee.9 | González <i>et al.</i> , 1985 |
| | 0.180 | Cong/Desc | Ee.16 | Djelveh <i>et al.</i> , 1988 |
| | <i>Semi membranosus</i> | 0.203 | Fresca | Ee.14 |
| 0.167 | | Fresca | Ee.4 | Wistreich, 1960 |
| <i>Semi tendinosus</i> | 0.259 | Fresca | Ee.4 | Wistreich, 1960 |
| | 0.192 | Fresca | Ee.4 | Wood, 1966 |
| Grasa | 0.203 | Fresca | Ee.14 | Fox, 1980 |
| | 0.208 | | Ee.14 | Fox, 1980 |
| | 0.007 | | Ee.4 | Wood, 1966 |

* Significado en apéndice A.

Concentración del soluto. Wistrieck *et al.* (1960) determinaron que existe una relación lineal entre la concentración de sal en la salmuera y la cantidad de sal absorbida por centímetro cuadrado de carne en contacto. Sin embargo, algunos investigadores (Robinson y Stokes, 1955; Djelveh y Gros, 1988) han observado que al aumentar la concentración de sodio en la salmuera ó soluciones electrolíticas, el valor de D_a disminuye primeramente para después volver a incrementarse a medida que lo hace la concentración.

En músculo de res a 25°C al aumentar la concentración de cloruro de sodio en la salmuera de 0 a 30 g/l el valor de D_a disminuye de 1.61 a 1.47×10^{-9} m²/seg para luego volver a incrementarse hasta 1.57×10^{-9} m²/seg a medida que la concentración alcanza los 215 g/l. Para glucosa se encontró un incremento desde 2.1 hasta 5.90×10^{-10} m²/seg a medida que se aumentaba la concentración de 2 a 300 g/l (Djelveh y Gros, 1988).

Las ecuaciones de Robinson y Stokes (1955), que determinan la influencia de la concentración del soluto (en una solución electrolítica), no han podido simular satisfactoriamente el comportamiento de D_a en carne. Esto puede ser debido a la falta de precisión que se tiene en la estimación de D_a en carne en vista de los coeficientes de variación (relativamente altos) que se obtienen.

Temperatura. Se ha demostrado por algunos investigadores (Wistrieck *et al.*, 1960; Djelveh y Gros, 1988) que al incrementar la temperatura, se aumenta en forma lineal el D_a . En el caso específico de cloruro de sodio, el valor de D_a de cloro es casi el doble (1.8 a $3.96 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{seg}$) al aumentar la temperatura a partir de 3.2°C hasta 25.5°C en carne de res y puerco. Un efecto similar se ha encontrado para otros solutos como nitratos y glucosa en carne de res (Djelveh y Gros, 1988).

Orientación de las fibras musculares. Se ha evaluado el efecto de este factor sobre la difusión de cloro, nitrito y glucosas en carne de res y puerco. Pero únicamente en el caso de difusión de glucosa a través de músculo semitendinoso de res se han encontrado diferencias significativas en el valor de D_a dependiendo de las fibras musculares (Fox, 1980; Djelveh y Gros, 1988). Para una difusión paralela a las fibras musculares se obtuvieron coeficientes (D_a) hasta tres veces mayor que en una la difusión en ángulo recto ó perpendicular al eje de difusión (Djelveh y Gross, 1988).

Procesos de Congelación/Descongelación. Ha sido poca la investigación acerca de la influencia que ejercen los tratamientos de congelación/descongelación efectuados antes del salado ó curado, sobre las velocidades de difusión de las soluciones salinas y curantes en la carne. Sin embargo, se ha mostrado la existencia de un efecto apreciable

de dichos tratamientos (Dussap y Gros, 1979; Merle, 1978; Fox, 1980; González-Méndez *et al.*, 1985; Gros *et al.*, 1984).

En los estudios hechos con carne de res congelada y descongelada lentamente (ver Cuadros 2 y 3), se encontró que el valor de los coeficientes de difusión del cloruro, nitrato y nitrito de sodio aumentan con respecto a su valor en carne fresca (Merle, 1978; Fox, 1980). En cuanto a la carne de puerco, sólo se tiene un estudio de la difusión del ion cloro después de haber aplicado los ciclos de congelación y descongelación bajo todas las combinaciones de proceso lento y rápido (González-Méndez *et al.*, 1985). En este trabajo se concluyó que la descongelación (lenta y rápida) es el factor que mayor influencia tiene sobre la velocidad de difusión del cloruro.

La presente revisión de los estudios reportados referentes al tema de difusión de solutos en carne, nos permite hacer la observación de que aún no se tiene un conocimiento sobre la difusión de las sales de sodio y potasio (en carne de res y puerco en estado fresco ó congelado/descongelado), ya sea si se encuentran puras ó en mezcla a fin de reducir el contenido de sodio en los productos cárnicos.

MATERIALES Y METODOS

Materiales

Carne.

El estudio se realizó utilizando músculo *Longissimus dorsi* de puerco y res. Este músculo forma parte del conjunto muscular conocido como lomo. La carne fue adquirida en estado fresco 24 horas después del sacrificio.

La carne de puerco se obtuvo en Frigorífica Agropecuaria Sonorense S.A. de C.V. (Grupo ALPRO). El corte de puerco que se adquirió fue "caña de lomo" que es el músculo *Longissimus Dorsi*. Para el caso de res, se adquirió el lomo completo grado estándar (contenido medio de grasa intramuscular) en una carnicería de la localidad.

Sales.

Se utilizó cloruro de sodio y cloruro de potasio (Sigma 99.5% y 99.9% respectivamente). Se emplearon sales grado químico con el propósito de asegurar la pureza de estas sales para evitar la interferencia por otros compuestos ó elementos que puedan estar presentes en las sales grado alimenticio ó comercial.

Mezclas de NaCl/KCl.

A partir de las sales que se describen en el párrafo anterior, se elaboraron 6 mezclas diferentes. En el Cuadro 4 se indican las diferentes mezclas evaluadas.

Cuadro 4. Mezclas Utilizadas para la Determinación de los Coeficientes de Difusión de Sodio, Potasio y Cloro.

| | M | E | Z | C | L | A |
|--------------------------|-----|----|----|----|----|-----|
| Sales (%)* | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Cloruro de Sodio (NaCl) | 100 | 80 | 60 | 40 | 20 | 0 |
| Cloruro de Potasio (KCl) | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |

* Porcentajes en peso

Dispositivos para difusión.

Se utilizaron los moldes o dispositivos de acrílico con forma de paralelepípedo que se muestran en la Figura 5. Estos moldes tienen las siguientes dimensiones:

Figura 5. Dispositivo utilizado en la Determinación de Coeficientes de Difusión de Sodio, Potasio y Cloro

| Paralelepípedo (Contenedor de la Carne) | Recipiente base (Contenedor de las Sales) |
|--|--|
| Ancho: 6.9 cm | Ancho: 8.6 cm |
| Espesor: 3.1 cm | Espesor: 4.2 cm |
| Longitud: 12 cm | Longitud: 4 cm |

Métodos

Selección del material cárnico.

Cada uno de los músculos de res y puerco que se utilizaron en este experimento fueron seleccionados bajo los siguientes criterios.

Carne de Puerco: Los cortes de puerco se seleccionaron libres de la condición PSE (pálido, suave y exudativo). La selección de los músculos se llevó a cabo utilizando los indicadores subjetivos que emplea la industria. Estos indicadores consisten en verificar el color y en hacer presión con los dedos sobre la superficie del músculo. En el último indicador, si la carne vuelve a su estado normal después de la presión, se considera que el músculo está libre de PSE (Valenzuela , 1993).

Se siguió este criterio de selección para la carne de puerco ya que los músculos PSE tienen un pH más bajo y además presentan una textura más suave debida a la pérdida de agua. Estos cambios en textura y pH podrían ser causa de variación durante la difusión de los solutos en la carne de puerco (Arnau *et al.*, 1993).

Carne de Res: Para seleccionar la carne de res se tomaron en cuenta dos parámetros importantes. El primer parámetro que se consideró fue el contenido de grasa. Los lomos completos de res se seleccionaron con un "grado estándar", es decir con un contenido bajo de grasa intramuscular. Esta selección se realizó utilizando los criterios de clasificación de la industria sonoreense.

El contenido de grasa en la industria se determina en forma subjetiva a partir del marmoleo del músculo *Longissimus dorsi*, conocido como "ojo de costilla", y por el color y cantidad de grasa de cobertura. Cuando el marmoleo es considerable y la grasa exterior de la canal es blanca y abundante la canal se denomina "clasificada" o de "engorda". Si el marmoleo es poco ó casi nulo y además la grasa de cobertura tiene un color pardo, la canal se considera "grado estándar", y por último, si el marmoleo es nulo y la grasa exterior es amarilla la canal se denomina "de campo" ó "magro".

Se seleccionaron únicamente lomos de res "grado estándar" ya que se ha reportado en la literatura (Wood, 1966; Fox, 1980) que la grasa intramuscular puede comportarse como una barrera a la difusión de solutos en carne. En estos reportes se

señala que el D_a para cloro es significativamente más alto para carne magra (músculo *Semi membranous* de res) comparado con el D_a para el mismo ion en tejido graso.

El segundo de los parámetros que se tomó en cuenta en la selección de los lomos de res, es la condición OFS (oscura, firme y seca). Esta condición fue determinada en forma subjetiva por la textura de la carne. Si la superficie de la carne es seca y pegajosa el corte se considera OFS. Los lomos que presentaron esta condición fueron rechazados, ya que este tipo de cortes contienen poca agua disponible y una textura más compacta (Arnao *et al.*, 1993), y esto podría afectar la determinación del comportamiento difusional de las mezclas a evaluar.

Preparación del material cárnico.

Durante la disección del músculo, de ambas especies de carne se tuvo cuidado de eliminar la aponeurosis y el tejido adiposo con el propósito de minimizar las perturbaciones que pudieran ocurrir durante la penetración de las sales de sodio y potasio

Una vez limpio de grasa y tejido conectivo, el músculo *Longissimus dorsi* se cortó en cuatro trozos aproximadamente iguales, de tal manera que cada trozo tuviera las mismas dimensiones que los dispositivos de difusión que se describen en Materiales (Figura 5).

A cada uno de los trozos de carne se le aplicó al azar una mezcla de cloruro de sodio y potasio diferente. Este procedimiento se realizó tanto en los músculos *Longissimus dorsi* de puerco y res en fresco, como en los músculos congelados/descongelados. Por fresco se definió a los músculos que no fueron sometidos a ningún proceso de congelación y que se obtienen al día siguiente del sacrificio del animal una vez pasado el rigor mortis. El proceso de congelación/descongelación se aplicó a los dos tipos de carne antes del salado siguiendo las condiciones descritas en el Cuadro 5.

Salado.

Cada uno de los trozos de carne que se obtuvieron como se indica en el apartado anterior, se introdujeron dentro de los moldes (Figura 5), de tal forma que las fibras musculares quedaron en dirección longitudinal del mismo, siguiendo la metodología empleada por González-Méndez *et al.* (1985).

Para evitar la difusión de las sales por capilaridad entre las paredes del molde y la carne, se untó con vaselina las uniones entre la carne y el extremo inferior del molde. En seguida se ensambló el paralelepípedo con el recipiente base. Este contenía una cantidad fija de 60 g de las diferentes mezclas evaluadas, quedando el conjunto como se muestra en la Figura 5. Con este procedimiento, la difusión de las sales en la carne tiene lugar en una sola dirección, a lo largo de las fibras musculares.

Cuadro 5. Condiciones empleadas en el proceso de Salado, Congelación y Descongelación.

| TRATAMIENTO | TEMPERATURA | TIEMPO | EQUIPO |
|----------------|-------------|--------|---|
| Salado | 2°C | 8 días | Refrigerado Comercial (American) |
| Congelación | - 40°C | 4 días | Congelador Profundo (Revco ULT 209) |
| Descongelación | 4°C | 2 días | Cámara de Refrigeración (Ojeda CDF-6859) |

Los dispositivos así preparados se colocaron dentro de una bolsa de plástico con el propósito de evitar la resequeidad en la parte superior de la carne que se origina por la evaporación del agua en la superficie de la carne. Inmediatamente después se pasaron a un refrigerador comercial marca American a $+2^{\circ}\text{C}$ donde se mantuvieron durante 8 días para su salado.

Preparación de las muestras.

Terminado el tiempo de salado, los trozos de carne se extrajeron de los moldes y fueron cortados transversalmente en rebanadas de aproximadamente un centímetro de espesor (González-Méndez *et al.*, 1985). Cada rebanada se trituró por separado, durante 20 seg aproximadamente en una picadora marca Ozterizer a fin de homogenizarla. Las muestras así preparadas de cada rebanada se colocaron dentro de bolsas de plástico para su análisis posterior.

Determinación de Humedad.

De cada muestra ó rebanada homogenizada se tomó una muestra de 2 ± 0.035 gramos por triplicado a la cual se le determinó el contenido de humedad en una estufa de aire Blue-M Stabil-Therm c-485-Q según el método 7.003 del AOAC (1984). El resto de la muestra se congeló a -18°C para realizar posteriormente la determinación de cloro.

Determinación de Sodio y Potasio.

Cada muestra seca obtenida del análisis de humedad se colocó dentro de una mufla (marca Thermoylane tipo 30400) a $+512^{\circ}\text{C}$ por un tiempo mínimo de 4 horas para incinerar la materia orgánica y proceder a la cuantificación de sodio y potasio por espectrofotometría de absorción atómica. Con este fin, a cada muestra se le agregó ácido clorhídrico 3N (Merk) para disolver las cenizas. Posteriormente se diluyeron éstas con agua deionizada hasta alcanzar un volumen de 100 ml y se pasaron a frascos de polipropileno para evitar contaminación por silicato de sodio proveniente del vidrio, siguiendo la técnica descrita por la AOAC (1990).

De esta primera dilución de cada muestra, se tomó una alícuota y se le agregó 10 ml de ácido clorhídrico concentrado (Merck) diluyéndose a un volumen de 100 ml con cloruro de litio (LiCl 1500 ppm, Sigma Chemical Co.), para suprimir ionización.

Todo el material de cristalería y de polipropileno utilizados en este análisis fueron lavados con una solución de Dicromato y Acido Sulfúrico al 20% (Pierce RBS 35) y con ácido nítrico al 20% (Merck), para minimizar contaminación y cambios en la nebulización (Noller y Bloom, 1978). Las soluciones estándar de sodio y potasio se prepararon haciendo diluciones de 0.5, 2 y 7 ppm y 1, 5 y 9 ppm respectivamente, a partir de una solución madre ("stock") de 1000 ppm (Sigma Chemical Co.).

La determinación de sodio y potasio se llevó a cabo en un espectrofotómetro de absorción atómica Varian Spectra AA-20, utilizando la técnica de emisión. Esta técnica

consiste en excitar al átomo por medio de altas temperaturas para que este emita energía y sea detectada a una determinada longitud de onda. La intensidad de luz emitida es relativa a la concentración del elemento a determinar (Beaty, 1978). Las condiciones utilizadas para cuantificar sodio y potasio con este equipo se presentan en el cuadro 6.

Para valorar el método de determinación de sodio y potasio se utilizó una muestra certificada de hígado de bovino (Bovine Liver NBS 1577a). El análisis de esta muestra se realizó al mismo tiempo que las muestras problema.

Determinación de Cloro.

Para la determinación de cloro en carnes y productos cárnicos es necesario primero precipitar las proteínas, ya que el cloro se encuentra ligado a ellas (Pearson y Tauber, 1987). La determinación de cloro en este estudio se realizó siguiendo la técnica reportada por González-Méndez *et al.* (1985). Se colocó 10 g de muestra y 20 ml de agua en un matraz volumétrico de 100 ml y se sometió a un calentamiento en baño maría a 100°C durante una hora. Posteriormente se dejó enfriar a temperatura ambiente y se agregaron 2 ml de ferrocianuro de potasio al 15% (Sigma) y 2 ml de acetato de zinc al 30% (Sigma). Se aforó a 100 ml con agua deionizada.

Se llevó a cabo una filtración (papel Whatman No.41) y del filtrado se tomó una alícuota a la cual se le determinó la concentración de cloro utilizando un

Cuadro 6. Condiciones Instrumentales Empleadas para la Determinación de Sodio y Potasio.

| PARAMETROS | SODIO | POTASIO |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|
| LONGITUD DE ONDA OPTIMIZADA | 589.9 nm | 767.0 nm |
| RENDIJA | 0.5 nm | 1 nm |
| GASES | Aire/Acetileno | Aire/Acetileno |
| FLUJO DE GASES | Aire 4 Acetileno 1.5 | Aire 4 Acetileno 1.5 |

clorohidrómetro (Corning modelo 950). Para la determinación del ion cloro este aparato se basa en el principio de Volhard. Se efectúa una titulación de los iones cloro por medio de una corriente estable entre dos electrodos de plata que liberan una tasa constante de iones plata. Cada ion plata se combina con los iones cloro de la muestra y forman cloruro de plata. Cuando todos los iones cloro son precipitados en cloruro de plata, los iones plata que están libres provocan un cambio en la conductividad de la solución la cual es detectada por los electrodos y la cuantificación de los iones cloro es equivalente a los iones plata liberados.

Cálculo del Coeficiente de Difusión Aparente.

En algunos de los trabajos ya citados se proponen modelos matemáticos para describir la difusión de iones en carne (Fox, 1980; Dussap y Gros, 1980; Dejlveh y Gros, 1988). En este estudio se seleccionó el modelo matemático desarrollado por Dussap y Gros (1979) para un medio semi-infinito. Este modelo fue elegido por las ventajas que se enumeran en la revisión de bibliográfica.

El cálculo del coeficiente de difusión a partir del modelo matemático anterior se realizó utilizando dos modelos de regresión:

- Regresión lineal simple.
- Regresión no-lineal.

Modelo Regresión Lineal.

Este primer modelo consiste en linearizar la ecuación 9, siguiendo la metodología descrita por González-Méndez *et al.* (1985). Para linearizar la ecuación se transformó a su forma logarítmica obteniéndose:

$$\ln C = \alpha' - \beta' z^2 \quad (17)$$

donde:

$$\alpha' = \ln \frac{M_0}{(\pi D a t)^{0.5}} \quad \beta' = \frac{1}{4 D a t}$$

C representa la concentración en mg/100g de los iones en cada rebanada, M_0 es la cantidad del ion absorbido por la carne, z es la distancia de cada rebanada a la base de contacto con las mezclas de sales, Da es el coeficiente de difusión aparente, y t es el tiempo de salado (8 días).

Una vez determinado analíticamente el contenido de cada uno de los iones en cada rebanada, como se indica en los apartados anteriores, se procedió a representar gráficamente los valores de $\ln C$ en función de z^2 (Perfil de Concentración Linearizado). La pendiente de la recta resultante se obtuvo a través de un análisis de regresión lineal (SAS, 1986). El valor de esta pendiente es igual a $-1/4Da t$ y permite el cálculo del coeficiente de difusión aparente Da .

Modelo de Regresión No-Lineal.

El segundo modelo consiste en determinar el coeficiente de difusión empleando la ecuación 9 en forma completa de acuerdo al método reportado por Dussap y Gros (1979). Para estimar este modelo se empleó el modelo no-lineal usando el algoritmo DUD (Ralston y Jennrich, 1979). Los valores de D_a se determinaron a partir de los perfiles de concentración experimentales de los diferentes iones, minimizando la diferencia entre las concentraciones obtenidas experimentalmente (C_{exp}) y los valores estimados de concentración obtenidas a partir del modelo matemático (C_{cal}). Es decir, el valor de D_a es aquel que minimice la suma de cuadrados de C_{exp} y C_{cal} (SAS, 1991).

Diseño Experimental.

Se utilizó un diseño completamente al azar con los tratamientos en arreglo factorial de tres factores A x B x C (Cochran y Cox, 1965) donde:

A: son las seis mezclas evaluadas (cuadro 4).

B: es el tipo u origen de carne (res y puerco).

C: son los dos estados de la carne (fresco y congelado/descongelado (C/D)).

Cada uno de los tratamientos se repitió dos veces. La determinación de las concentraciones de sodio, potasio y cloro se llevaron a cabo por triplicado en cada centímetro de corte del trozo de carne salado.

Análisis Estadístico.

Se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) para evaluar el arreglo factorial A x B x C con el siguiente modelo

$$\begin{aligned} \ln Y = & \mu + TCARN_i + ECARN_j + TCARN*ECARN_{ij} + MEZ_k + TCARN*MEZ_{ik} \\ & + ECARN*MEZ_{jk} + DIST^2 + e_{ijk} \end{aligned}$$

donde MEZ es el factor A (mezcla), TCARN es el factor B (tipo de carne), ECARN es el factor C (estado de carne) y e es el error experimental. Este modelo de ANDEVA se empleó para el modelo lineal. Las interacciones de los factores sobre el comportamiento difusional de los tres iones, se analizaron por medio de polinomios ortogonales con el fin de obtener estimaciones independientes del término cuadrático que es el que se supone tendrá mayor efecto, de acuerdo al modelo difusional propuesto.

El efecto de los diferentes tratamientos sobre la velocidad de difusión de los iones, en el segundo modelo (no-lineal), se determinó por medio de una prueba t-student de comparación de medias (valores de D_a) con un nivel de significancia de 0.05.

Para determinar el efecto de los procesos: salado y C/DL sobre el contenido de humedad se empleó un análisis de varianza con el siguiente modelo:

$$\text{HUM} = \mu + \text{SAL}_i + \text{ECARN}_j + \text{SAL} * \text{ECARN}_{ij} + e_{ij}$$

donde HUM es el contenido de humedad promedio del porcentaje de humedad de los 7 cm diferentes de penetración evaluados y SAL es el proceso de salado.

El análisis de regresión para ambos modelos se realizó, además de calcular el valor de D_a , para probar la bondad de ajuste del modelo de difusión expuesto en la ecuación 9. Para probar el ajuste en el modelo lineal se usaron los siguientes criterios: R^2 (coeficiente de determinación ó regresión), valor de F (cuadrado medio de regresión sobre cuadrado medio del error) y el valor de F para falta de ajuste (cuadrado medio de falta de ajuste sobre cuadrado medio del error). Para el modelo no-lineal se emplearon los siguientes tres criterios: R^2 , F y S_{D_a} (desviación estándar de D_a).

Para el análisis estadístico de los resultados obtenidos se utilizó el paquete estadístico SAS version 6.04 (SAS, 1991) para los dos modelos de determinación de D_a y para analizar el contenido de humedad antes y después de los procesos de salado y Congelación/Descongelación.

RESULTADOS Y DISCUSION

Contenido de Humedad

En las figuras 6 y 7 se muestran los contenidos promedio de humedad de los trozos de músculo *Longissimus dorsi* de res y puerco respectivamente, antes y después del salado con las diferentes mezclas evaluadas. Se puede observar en estas figuras que existe una variación en el porcentaje de humedad, en los dos tipos de carne, debido a los proceso de congelación/descongelación y al de salado independientemente de la mezcla aplicada.

En el músculo de res (figura 6) por ejemplo, el contenido de humedad antes del salado varió en un rango de 74.34 a 75.60% y después del salado este rango disminuyó a 71.79 a 74.21%. Si comparamos además el contenido de humedad de la carne sometida al proceso de congelación/descongelación antes y después del salado, 73.46 a 73.73% y 71.11 a 72.45%, respectivamente, se puede observar que estos últimos son menores comparados con los valores obtenidos en fresco. Un comportamiento similar al anterior presentó el músculo de puerco (figura 7). Estas diferencias en ambos tipos de carne y sus tratamientos fueron corroboradas estadísticamente por medio de un análisis de varianza ($p < 0.05$).

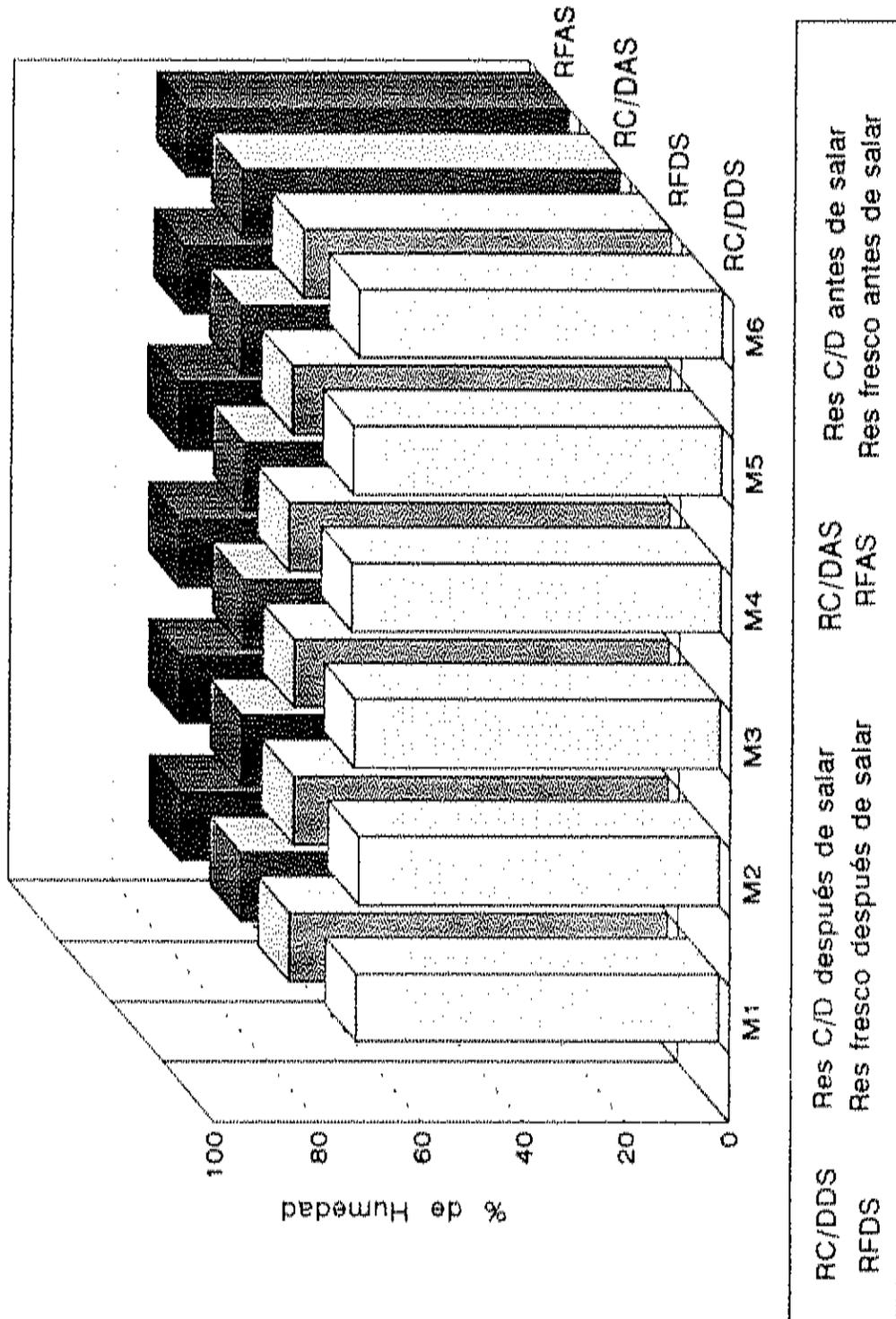


Figura 6. Contenido de Humedad (%) en carne de res en los diferentes tratamientos (Mezclas M).

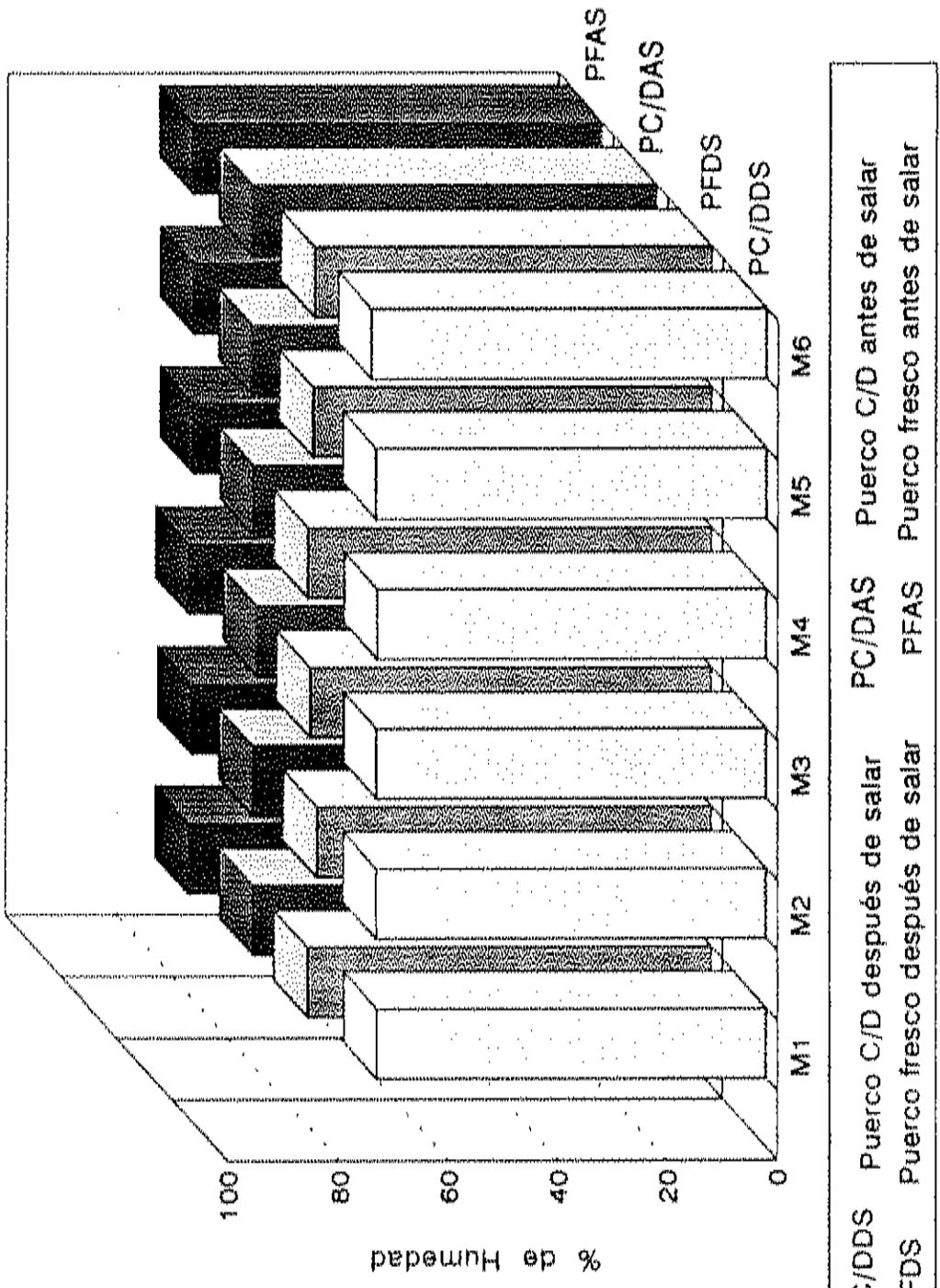


Figura 7. Contenido de Humedad (%) en carne de puerco en los diferentes tratamientos (Mezclas M).

Los cambios en el contenido de humedad originados por la aplicación del proceso de congelación/descongelación son debidos en principio, a la formación de cristales de hielo de tamaño y localización (intracelular o extracelular) inadecuada (Calvelo, 1981). Esta formación de cristales ocurre cuando la congelación es lenta: proceso que se empleó en este trabajo. La congelación lenta comienza usualmente en el espacio extracelular, incrementando con ello la concentración de sólidos en el fluido extracelular. Esto causa una extracción osmótica de agua del interior de la célula que aún no ha sido congelada, provocando un incremento en el tamaño de los cristales de hielo (Hamm, 1986).

La pérdida de agua provocada por el proceso de salado en los dos tipos de carne, res y puerco, es debido principalmente al incremento que se obtiene en la presión osmótica causada por la penetración de la sal en el tejido muscular; lo cual tiene como consecuencia la salida de agua para equilibrar el sistema (Pierce y Schweigert, 1971).

Contenido de Sodio, Potasio y Cloro

Valoración del Método de Determinación de Sodio y Potasio.

Los resultados promedio obtenidos en sodio y potasio para la muestra estándar de Hígado de Bovino son: 0.204% y 0.884% respectivamente. Estos valores son similares a los valores certificados por la National Bureau of Standards (marca NBS,

1577a) para los dos elementos analizados (0.242% para sodio y 0.970% para potasio), por lo que podemos señalar que la técnica y el equipo utilizados fueron adecuados.

Determinación del Coeficiente de Difusión Aparente

Regresión Lineal

Los coeficientes de difusión aparente (D_a) y los coeficientes de determinación de regresión (R^2) calculados a partir de este modelo (Ecuación 17), se muestran en los cuadros 7, 8, 9 y 10 para los tratamientos puerco fresco, puerco congelado/descongelado, res fresco y res congelado/descongelado, respectivamente. Primeramente serán presentados los resultados para enseguida discutirlos en base a otros trabajos y a los análisis estadísticos efectuados a los mismos.

Puerco Fresco. El D_a para cloro en la mezcla 1 (cuadro 7) es mayor al reportado por González-Méndez *et al.* (1985), los cuales obtuvieron un valor de D_a de 2.186×10^{-6} cm^2/seg (calculado por este mismo método).

En el cuadro 7, se puede observar que los valores de D_a para sodio variaron de 1.269 a 3.653×10^{-6} cm^2/seg y los de potasio de 1.565 a 4.063×10^{-6} cm^2/seg dependiendo de la mezcla. También en este cuadro se muestran los coeficientes de regresión, los cuales se encuentran entre 0.759 a 0.993 (independientemente del ion).

Cuadro 7. Coeficientes de Difusión Aparente ($D_a \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{seg}$) y de Regresión (R^2) obtenidos para Puerco Fresco a partir del modelo lineal para cada mezcla (M) estudiada.

| PUERCO FRESCO | | | | | | |
|---------------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|
| | CLORO | | SODIO | | POTASIO | |
| | D_a | R^2 | D_a | R^2 | D_a | R^2 |
| M1 | $3.065 \pm .271$ | 0.815 | $3.118 \pm .177$ | 0.871 | | |
| M2 | $2.865 \pm .111$ | 0.943 | $2.964 \pm .097$ | 0.954 | $1.934 \pm .066$ | 0.964 |
| M3 | $3.847 \pm .283$ | 0.798 | $3.258 \pm .243$ | 0.791 | $2.102 \pm .046$ | 0.984 |
| M4 | $3.931 \pm .221$ | 0.872 | $3.653 \pm .234$ | 0.841 | $4.063 \pm .373$ | 0.759 |
| M5 | $3.444 \pm .203$ | 0.862 | $1.269 \pm .033$ | 0.986 | $3.200 \pm .098$ | 0.961 |
| M6 | $2.218 \pm .056$ | 0.976 | | | $1.565 \pm .022$ | 0.993 |

Estos valores de R^2 se consideran aceptables, por lo tanto se puede afirmar que las mezclas aplicadas en carne de puerco fresco pueden ser analizadas por el modelo lineal.

Puerco Congelado/Descongelado Lento (C/DL). En el cuadro 8, se puede observar que los valores de D_a para cloro están en un rango de 2.260 a 3.952×10^{-6} cm^2/seg , sodio de 1.282 a 2.803×10^{-6} cm^2/seg y potasio de 2.870 a 3.931×10^{-6} cm^2/seg dependiendo de la mezcla. El D_a para cloro mezcla 1 es ligeramente mayor al reportado en la literatura con este método (González-Méndez, 1985). Los R^2 de este tratamiento variaron entre 0.804 y 0.981 el cual es un rango aceptable y similar al obtenido en puerco fresco.

Res Fresca. El rango de D_a para cloro en este tratamiento es de 1.301 a 8.030×10^{-6} cm^2/seg , sodio de 3.767 a 5.929×10^{-6} cm^2/seg y potasio de 2.477 a 5.241×10^{-6} cm^2/seg dependiendo de la mezcla (cuadro 9). Cabe hacer resaltar en este tratamiento que los coeficientes de regresión variaron considerablemente desde 0.386 a 0.986. Esto pudiera deberse a que en este modelo de determinación de D_a se ignora el primer término del modelo matemático (Ecuación 9) en su forma logarítmica en el cual se incluye a D_a (término α' de la Ecuación 17) y que para este tipo (especie) de carne resulte importante considerarlo. En el caso de carne de puerco fresca y C/DL no se presentó tal variación. Esto puede causar una variación en el valor de D_a en res y su correspondiente R^2 .

Cuadro 8. Coeficientes de Difusión Aparente ($D_a \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{seg}$) y de Regresión (R^2) obtenidos para Puerco Congelado/Descongelado Lento (C/DL) a partir del modelo lineal para cada mezcla (M) estudiada.

| PUERCO CONGELADO/DESCONGELADO LENTO | | | | | | |
|-------------------------------------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|
| | CLORO | | SODIO | | POTASIO | |
| | D_a | R^2 | D_a | R^2 | D_a | R^2 |
| M1 | $3.258 \pm .166$ | 0.876 | $1.755 \pm .063$ | 0.953 | | |
| M2 | $2.260 \pm .066$ | 0.966 | $2.178 \pm .060$ | 0.973 | $3.014 \pm .192$ | 0.856 |
| M3 | $3.767 \pm .185$ | 0.900 | $2.803 \pm .149$ | 0.855 | $3.728 \pm .279$ | 0.804 |
| M4 | $3.952 \pm .288$ | 0.801 | $1.513 \pm .049$ | 0.967 | $3.931 \pm .136$ | 0.949 |
| M5 | $3.653 \pm .205$ | 0.873 | $1.282 \pm .047$ | 0.967 | $2.870 \pm .064$ | 0.981 |
| M6 | $3.807 \pm .197$ | 0.890 | | | $3.807 \pm .215$ | 0.874 |

Cuadro 9. Coeficientes de Difusión Aparente ($D_a \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{seg}$) y de Regresión (R^2) obtenidos para Res Fresca a partir del modelo lineal para cada mezcla (M) estudiada.

| RES FRESCA | | | | | | |
|------------|------------------|-------|-------------------|-------|------------------|-------|
| | CLORO | | SODIO | | POTASIO | |
| | D_a | R^2 | D_a | R^2 | D_a | R^2 |
| M1 | $1.301 \pm .031$ | 0.986 | $3.767 \pm .351$ | 0.700 | | |
| M2 | $4.367 \pm .474$ | 0.657 | $4.110 \pm .423$ | 0.655 | $2.477 \pm .277$ | 0.741 |
| M3 | $3.511 \pm .275$ | 0.862 | $5.651 \pm .935$ | 0.386 | $3.200 \pm .719$ | 0.848 |
| M4 | $5.564 \pm .728$ | 0.566 | 5.929 ± 0.527 | 0.527 | $5.241 \pm .719$ | 0.494 |
| M5 | $8.030 \pm .475$ | 0.475 | $5.833 \pm .514$ | 0.729 | $2.583 \pm .235$ | 0.711 |
| M6 | $2.218 \pm .056$ | 0.976 | | | $3.288 \pm .180$ | 0.878 |

El D_a para cloro en la mezcla 1 difiere a los valores mostrados por otros autores. El rango reportado en la bibliografía es de 2.2 a 2.34×10^{-6} cm^2/seg (Dussap y Gros, 1979; Fox, 1980; Gros *et al.*, 1984). Es probable que el valor de D_a para cloro en la mezcla 1 obtenido en este trabajo, no se encuentre dentro del rango anterior debido a que el valor más alto fue determinado con otro método (celda de difusión). El valor más bajo (2.2×10^{-6} cm^2/seg) fue obtenido con el modelo matemático propuesto en este trabajo, pero tomando en cuenta la ecuación completa (Dussap y Gros, 1979).

Res Congelada/Descongelada Lenta (C/DL) En este tratamiento la variación de R^2 fue menor (0.622 a 0.965) que a la obtenida en carne de res fresca. El rango de D_a para cloro es de 2.379 a 3.767×10^{-6} cm^2/seg , sodio de 2.782 a 5.166×10^{-6} cm^2/seg y potasio de 2.989 a 6.570×10^{-6} cm^2/seg (cuadro 10). En este caso el valor de D_a para cloro en la mezcla 1 concuerda con algunos valores reportados en la bibliografía para este tipo de carne y tratamiento. Djelveh y Gros (1989) reportan un D_a de 3.43×10^{-6} cm^2/seg en músculo *Semitendinosus* de res. Dussap y Gros (1979) obtuvieron un valor de D_a de 3.9×10^{-6} cm^2/seg en músculo *Longissimus dorsi* de res.

Se realizó una búsqueda intensiva en bancos de datos por computadora y no se encontraron reportes en la literatura sobre la determinación de D_a para sodio y potasio bajo ninguno de los tratamientos estudiados en esta investigación.

Cuadro 10. Coeficientes de Difusión Aparente ($D_a \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{seg}$) y de Regresión (R^2) obtenidos para Res Congelada/Descongelada Lento (C/DL) a partir del modelo lineal para cada mezcla (M) estudiada.

| RES CONGELADA/DESCONGELADA LENTO | | | | | | |
|----------------------------------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|
| | CLORO | | SODIO | | POTASIO | |
| | D_a | R^2 | D_a | R^2 | D_a | R^2 |
| M1 | $3.761 \pm .341$ | 0.746 | $4.465 \pm .283$ | 0.842 | | |
| M2 | $3.412 \pm .136$ | 0.909 | $2.782 \pm .183$ | 0.831 | $5.318 \pm .489$ | 0.710 |
| M3 | $2.411 \pm .136$ | 0.943 | $3.767 \pm .276$ | 0.855 | $4.305 \pm .326$ | 0.789 |
| M4 | $2.379 \pm .097$ | 0.941 | $4.312 \pm .430$ | 0.667 | $6.570 \pm .723$ | 0.622 |
| M5 | $3.444 \pm .214$ | 0.868 | $5.166 \pm .468$ | 0.666 | $2.989 \pm .086$ | 0.965 |
| M6 | $3.444 \pm .232$ | 0.839 | | | $4.205 \pm .290$ | 0.818 |

El análisis de varianza y el análisis por polinomios ortogonales resultaron significativos para todos los tratamientos en todos los iones ($p < 0.05$), sin embargo se obtuvieron coeficientes de variación (C.V.) elevados (22.38 a 51.39%). Estos C.V. pudieron deberse entre otros factores y, en principio a la variabilidad intrínseca de animal a animal y que se consideró dentro del error en el diseño experimental.

Comparación entre Mezclas. Los resultados de los contrastes ortogonales para la comparación entre Mezclas dentro de un mismo Tipo de carne y Estado de carne (Fresco ó C/DL), se muestran en los cuadros 11 y 12.

Puerco Fresco. Para el ion cloro, los perfiles de concentración linearizados no mostraron diferencias significativas (cuadro 11) con respecto a la mezcla aplicada ($p > 0.05$). En los perfiles de sodio se observa que sólo la mezcla 1 tiene un comportamiento diferente al resto ($p < 0.05$). Las mezclas que contienen mayor proporción de cloruro de potasio (mezclas 5 y 6) tienen perfiles de potasio iguales estadísticamente ($p > 0.05$) y estas dos mezclas a su vez son diferentes a las mezclas con menor proporción de KCl ($p < 0.05$).

Puerco C/DL. El cuadro 11 muestra también las comparaciones entre los perfiles de concentración linearizados de los tres iones evaluados en la carne de puerco C/DL. Se

Cuadro 11. Comparación entre mezclas (M) en carne de puerco Fresco y C/DL por medio de polinomios ortogonales ($p < 0.05$)

| Puerco Fresco* | | | Puerco C/DL* | | |
|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|
| Cloro | Sodio | Potasio | Cloro | Sodio | Potasio |
| M1 ^a | M1 ^a | | M1 ^a | M1 ^a | |
| M2 ^a | M2 ^{ab} | M2 ^a | M2 ^a | M2 ^a | M2 ^a |
| M3 ^a | M3 ^b | M3 ^a | M3 ^{ab} | M3 ^a | M3 ^a |
| M4 ^a | M4 ^b | M4 ^a | M4 ^a | M4 ^a | M4 ^a |
| M5 ^a | M5 ^b | M5 ^b | M5 ^b | M5 ^b | M5 ^b |
| M6 ^a | | M6 ^b | M6 ^{ab} | | M6 ^b |

* Letras diferentes por columnas diferencias significativas.

puede observar en este cuadro que el comportamiento del ión cloro es muy similar al mostrado en el tratamiento anterior; únicamente la mezcla 5 tuvo un comportamiento diferente ($p < 0.05$). Las variaciones entre los perfiles de sodio y potasio también se comportaron en forma similar al tratamiento anterior. En el caso de sodio, la mezcla que resultó diferente a las demás fue la 5 en lugar de la mezcla 1, como se obtuvo en puerco fresco ($p < 0.05$).

Res Fresca. El análisis por polinomios ortogonales muestra que los perfiles de concentración (lineales) para el ion cloro en todas las mezclas son iguales ($p > 0.05$) a excepción de la mezcla 1 ($p < 0.05$) (cuadro 12). El ion sodio muestra dos comportamientos diferentes. Las mezclas 1 y 2 tienen un comportamiento similar ($p > 0.05$) y diferente al comportamiento mostrado por las mezclas 3, 4 y 5 ($p < 0.05$). Los perfiles del ion potasio en este tipo de carne también muestran dos grupos de comportamiento. El primer grupo formado por las mezclas 4 y 6 tiene un comportamiento diferente al segundo grupo (mezcla 2) ($p < 0.05$).

Res C/DL. También se puede observar en el cuadro 12 que los perfiles de cloro y sodio no muestran diferencias significativas entre las mezclas evaluadas ($p < 0.05$). En

Cuadro 12. Comparación entre mezclas (M) en carne de res Fresca y C/DL por medio de polinomios ortogonales ($p < 0.05$)

| Res Fresca* | | | Res C/DL* | | |
|------------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Cloro | Sodio | Potasio | Cloro | Sodio | Potasio |
| M1 ^a | M1 ^a | | M1 ^a | M1 ^a | |
| M2 ^{ab} | M2 ^a | M2 ^a | M2 ^a | M2 ^a | M2 ^a |
| M3 ^b | M3 ^b | M3 ^{ab} | M3 ^a | M3 ^a | M3 ^a |
| M4 ^b | M4 ^b | M4 ^b | M4 ^a | M4 ^a | M4 ^a |
| M5 ^b | M5 ^b | M5 ^{ab} | M5 ^b | M5 ^a | M5 ^b |
| M6 ^b | | M6 ^b | M6 ^a | | M6 ^c |

* Letras diferentes por columnas diferencias significativas.

cambio el potasio muestra variaciones en sus perfiles debido a la mezcla aplicada ($p < 0.05$): las mezclas 2, 3 y 4 son iguales entre sí ($p > 0.05$) y diferentes de 5 y 6 ($p < 0.05$).

En base a los resultados y sus análisis es posible señalar que en la difusión (perfiles de concentración linearizados) de cloro no tiene influencia el sodio y el potasio. Este comportamiento pudo observarse tanto en carne fresca o C/DL ya sea de puerco ó res.

En el caso de sodio, las mezclas que tienen mayor proporción de sodio presentan un comportamiento diferente (mezcla 1 y en algunos casos la mezcla 2) a las mezclas que contienen potasio. Esto podría indicar que la difusión de sodio no es afectada por la cantidad de potasio en la mezcla.

En cambio el ion potasio muestra una tendencia más heterogénea que los iones cloro y sodio, es decir, que se pueden observar comportamientos diferentes dependiendo de la mezcla, sobre todo en el caso de res (cuadro 12). Esta variación puede estar indicando que la difusión de potasio en carne de res son afectados por la cantidad de sodio ó potasio en la mezcla.

Los resultados obtenidos del análisis de polinomios ortogonales no coinciden con los valores de D_a mostrados en los cuadros 7, 8, 9 y 10, es decir que existen discrepancias entre grupos de perfiles iguales y valores de D_a diferentes. Esto se puede explicar en base a los valores altos de coeficientes de variación obtenidos en el análisis

de varianza, los cuales podrian originar errores que afecten el resultado de agrupación de perfiles lineales a través de polinomios ortogonales.

Comparación entre Estado de Carne (Fresco, C/DL). En el cuadro 13 se indican las diferencias obtenidas a través del análisis por polinomios ortogonales, entre los perfiles de concentración para cada ion cuando se comparan estos perfiles en estado fresco con los perfiles obtenidos debido a la aplicación del proceso de congelación/descongelación lenta (C/DL) sobre los tipos de carne antes del salado. Se puede observar en este cuadro que únicamente el ion cloro se ve afectado significativamente ($p < 0.05$) por el proceso C/DL en los dos tipos de carne. Este comportamiento también fue reportado por Fox (1980), Gros *et al.* (1984) y por González-Méndez *et al.* (1985). En cambio los iones sodio y potasio no se ven afectados por este proceso con excepción sodio en puerco (mezcla 5) y potasio en res.

Comparación entre Tipo de Carne (Puerco y Res). El análisis de polinomios muestra que el tipo de carne no tiene un efecto sobre el perfil de concentración de sodio para cada una de las mezclas dentro de un mismo estado de carne ($p > 0.05$) excepto para mezcla 5 en fresco (cuadro 14). En cambio los iones cloro y potasio sí muestran una diferencia entre los perfiles observados en res comparados con los de puerco ($p < 0.05$) (en algunas mezclas). Gros *et al.* (1984) señalan que el ion cloro se difunde en forma diferente en

Cuadro 13. Efecto del Estado de Carne (Fresco o C/DL) en los perfiles de concentración lineales de cloro, sodio y potasio dentro de un mismo tipo de carne (especie animal) en las mezclas (M) estudiadas.

| Puerco | | | Res | | |
|--------|-------|---------|-------|-------|---------|
| Cloro | Sodio | Potasio | Cloro | Sodio | Potasio |
| M1 | M1 | | M1 | M1 | |
| M2* | M2 | M2 | M2* | M2 | M2* |
| M3 | M3 | M3 | M3* | M3 | M3 |
| M4* | M4 | M4 | M4* | M4 | M4 |
| M5* | M5* | M5 | M5* | M5 | M5 |
| M6 | | M6 | M6* | | M6 |

* Diferencias significativas ($p < 0.05$)

Cuadro 14. Efecto del Tipo de Carne en los perfiles de concentración lineales de cloro, sodio y potasio dentro de un mismo estado de carne en las mezclas (M) estudiadas.

| Fresco | | | C/DL | | |
|--------|-------|---------|-------|-------|---------|
| Cloro | Sodio | Potasio | Cloro | Sodio | Potasio |
| M1 | M1 | | M1 | M1 | |
| M2* | M2 | M2* | M2* | M2 | M2 |
| M3 | M3 | M3 | M3* | M3 | M3* |
| M4* | M4 | M4 | M4* | M4 | M4* |
| M5* | M5* | M5* | M5 | M5 | M5 |
| M6* | | M6* | M6 | | M6 |

* Diferencias significativas ($p < 0.05$).

carne de res (en algunos casos más rápido) comparada con carne de puerco. En cuanto al potasio no se tienen reportes en la literatura de estudio de difusión.

Con el fin de evitar algunos de los errores que se cometen al linearizar el modelo matemático y de tomar en cuenta solamente el segundo término (la pendiente) para el cálculo de D_a y para las comparaciones entre mezclas, se propuso utilizar una regresión no-lineal que permite el determinar el valor de D_a a través de todo el modelo completo (Ecuación 9).

Regresión No-Lineal.

El cálculo de los coeficientes de difusión aparentes a través de un modelo de regresión no-lineal se llevo a cabo por medio de un método iterativo matemático llamado DUD (Ralston y Jennrich, 1979) Las incógnitas manejadas a partir del modelo matemático (Ecuación 9) fueron M_0 y D_a . Los parámetros iniciales que se emplearon en los cálculos son: para D_a 2.31×10^{-6} cm²/seg y para M_0 en los cálculos de cloro, sodio y potasio, 0.002163 g, 0.002559 g y 0.001587 g, respectivamente. El D_a reportado es aquel que minimizó la suma de cuadrados entre los valores de concentración (para cada uno de los iones) observados ó experimentales y los calculados a partir del modelo.

Puerco Fresco. En este tipo de carne los D_a para cloro variaron entre 1.044 y 1.388×10^{-6} cm^2/seg , sodio entre 2.027 y 2.199×10^{-6} cm^2/seg y potasio entre 1.311 y 2.386×10^{-6} cm^2/seg (cuadro 15). Los valores de R^2 se encuentran entre 0.889 y 0.998 (independientemente del ion) el cual es un rango excelente de correlación entre los valores experimentales y los calculados a partir del modelo. El D_a para cloro en la mezcla 1 se encuentra ligeramente abajo de los valores reportados en carne de puerco en los músculos *Longissimus dorsi* y *Semi membranosus* que se encuentran entre 1.20 a 2.21×10^{-6} cm^2/seg respectivamente (Wistreich *et al.*, 1960; Fox, 1980; Dussap y Gros, 1979; Djelveh y Gros, 1988).

Puerco C/DL. Los valores de R^2 que se muestran en el cuadro 16 también son altos, de 0.898 a 0.999 . El valor de D_a para cloro en la mezcla 100% NaCl (1.309×10^{-6} cm^2/seg) se encuentra entre los valores citados en la bibliografía para puerco C/D. Wood (1966) reportó un D_a de 1.4×10^{-6} cm^2/seg utilizando el modelo para un medio semi-infinito con una concentración constante en la interfase (Ecuación 4). Otros autores reportan un valor de D_a entre 1.57 a 3.910×10^{-6} cm^2/seg (Dussap y Gros, 1979; González-Méndez *et al.*, 1985; Djelveh y Gros, 1988). En el presente trabajo se encontraron rangos de 2.098 a 2.312×10^{-6} cm^2/seg para el ión sodio y de 1.989 a 2.491×10^{-6} cm^2/seg para potasio. Estos iones no han sido reportados en la literatura.

Cuadro 15. Coeficientes de Difusión Aparente ($D_a \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{seg}$) y de Regresión (R^2) obtenidos para Puerco Fresco a partir del modelo no-lineal para cada mezcla (M) estudiada.

| PUERCO FRESCO | | | | | | |
|---------------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|
| | CLORO | | SODIO | | POTASIO | |
| | D_a | R^2 | D_a | R^2 | D_a | R^2 |
| M1 | $1.044 \pm .025$ | 0.997 | $2.207 \pm .046$ | 0.889 | | |
| M2 | $1.135 \pm .036$ | 0.997 | $2.104 \pm .025$ | 0.989 | $2.386 \pm .013$ | 0.995 |
| M3 | $1.146 \pm .041$ | 0.986 | $2.189 \pm .020$ | 0.950 | $2.218 \pm .013$ | 0.994 |
| M4 | $1.286 \pm .045$ | 0.994 | $2.199 \pm .020$ | 0.936 | $2.139 \pm .025$ | 0.987 |
| M5 | $1.123 \pm .015$ | 0.998 | $2.172 \pm .024$ | 0.917 | $1.833 \pm .063$ | 0.984 |
| M6 | $1.388 \pm .015$ | 0.996 | | | $1.311 \pm .030$ | 0.997 |

Cuadro 16. Coeficientes de Difusión Aparente ($D_a \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{seg}$) y de Regresión (R^2) obtenidos para Puerco Congelado/Descongelado Lento a partir del modelo no-lineal para cada mezcla (M) estudiada.

| PUERCO CONGELADO/DESCONGELADO LENTO | | | | | | |
|-------------------------------------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|
| | CLORO | | SODIO | | POTASIO | |
| | D_a | R^2 | D_a | R^2 | D_a | R^2 |
| M1 | $1.371 \pm .055$ | 0.991 | $2.098 \pm .030$ | 0.979 | | |
| M2 | $1.344 \pm .031$ | 0.998 | $2.312 \pm .015$ | 0.992 | $2.491 \pm .007$ | 0.998 |
| M3 | $1.655 \pm .019$ | 0.999 | $2.111 \pm .028$ | 0.980 | $2.447 \pm .024$ | 0.992 |
| M4 | $1.437 \pm .035$ | 0.996 | $2.165 \pm .021$ | 0.981 | $2.409 \pm .015$ | 0.997 |
| M5 | $1.397 \pm .029$ | 0.997 | $2.144 \pm .029$ | 0.898 | $2.090 \pm .052$ | 0.987 |
| M6 | $1.549 \pm .043$ | 0.996 | | | $1.989 \pm .022$ | 0.998 |

Res Fresca. Una de las razones por la que se utilizó el método no-lineal para el cálculo de D_a fueron los valores tan bajos de R^2 que se obtuvieron especialmente en este tratamiento cuando se realizó el cálculo D_a en forma lineal. Se puede observar que los valores de R^2 (cuadro 17) son considerablemente más altos (0.778 a 0.997) comparados con los obtenidos con el otro método (Cuadro 9). Al tener un rango más alto de R^2 es también notorio que los rangos entre los valores de D_a son más pequeños. Para el ion cloro el rango de D_a es de 1.309 a 2.240×10^{-6} cm²/seg, para sodio de 2.047 a 2.304×10^{-6} cm²/seg y para potasio de 1.904 a 2.239×10^{-6} cm²/seg.

Los valores reportados en la literatura para el ion cloro se encuentran entre 2.2 a 2.5×10^{-6} cm²/seg para músculo *Semi tendinoso* de res en fresco. Una posible razón de la discrepancia entre el D_a para este tratamiento obtenido en este estudio, comparado con los reportados, es el tipo de músculo utilizado y el modelo empleado en el cálculo de D_a . El músculo *Semi tendinoso* es considerado como magro comparado con el resto de los músculos de la res, en cambio, el músculo *Longissimus dorsi* es un tejido muscular que contiene una cantidad considerable de grasa intramuscular (Price y Schweigert, 1976).

La grasa se ha considerado como un posible impedimento a la difusión de cloro y nitrato en carne. Los valores de D_a de estos iones en grasa son de 0.280 y 0.19×10^{-6} cm²/seg (Fox, 1980) comparados con los valores promedios en carne magra de 2.2 y 1.7×10^{-6} cm²/seg (Gros *et al.*, 1984), respectivamente. En vista que el músculo *Longissimus*

Cuadro 17. Coeficientes de Difusión Aparente ($D_a \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{seg}$) y de Regresión (R^2) obtenidos para Res Fresca a partir del modelo no-lineal para cada mezcla (M) estudiada.

| RES FRESCO | | | | | | |
|------------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|
| | CLORO | | SODIO | | POTASIO | |
| | D_a | R^2 | D_a | R^2 | D_a | R^2 |
| M1 | $1.309 \pm .030$ | 0.997 | $2.047 \pm .044$ | 0.923 | | |
| M2 | $1.892 \pm .075$ | 0.881 | $2.071 \pm .046$ | 0.852 | $2.239 \pm .011$ | 0.949 |
| M3 | $2.010 \pm .055$ | 0.848 | $2.205 \pm .046$ | 0.874 | $2.134 \pm .030$ | 0.929 |
| M4 | $2.270 \pm .082$ | 0.980 | $2.268 \pm .020$ | 0.778 | $2.048 \pm .046$ | 0.878 |
| M5 | $2.240 \pm .012$ | 0.928 | $2.304 \pm .044$ | 0.972 | $1.965 \pm .010$ | 0.996 |
| M6 | $2.173 \pm .026$ | 0.979 | | | $1.904 \pm .011$ | 0.994 |

dorsi contiene más grasa, es posible pensar que los solutos en éste tengan mayor impedimento a la difusión y por lo tanto se espera obtener valores de D_a más bajos.

Res C/DL. En el cuadro 18 se muestran los valores de D_a y R^2 para res C/DL. Los rangos de D_a para cloro, sodio y potasio son: 1.860 a 2.05×10^{-6} cm²/seg, 2.077 a 2.220×10^{-6} cm²/seg y 1.97 a 2.31×10^{-6} cm²/seg, respectivamente. Los valores de R^2 para este tratamiento también son altos, teniendo un valor máximo hasta de 0.999 (cloro mezcla 2 y potasio mezcla 3) en comparación con los obtenidos por el método lineal (cuadro 10).

El valor de D_a para cloro mezcla 1, después de aplicar el proceso C/DL, está también por debajo a los valores reportados en bibliografía para este tratamiento que son de 2.34 y 3.4×10^{-6} cm²/seg (Gros *et al.*, 1984; Djelveh y Gros, 1988). Una posible explicación para esta diferencia entre los valores es la discutida en el tratamiento anterior (res fresca).

En las figuras de la 25 a la 36 (Apéndice B) se muestran los perfiles de concentración observados en los diferentes tratamientos. Además se graficaron las curvas de los valores esperados calculados a partir de los valores estimados para D_a y M_0 en cada caso utilizando la ecuación 9. Se puede observar en cualquiera de estas figuras que las curvas experimentales son muy similares a las curvas calculadas. Este hecho coincide

Cuadro 18. Coeficientes de Difusión Aparente ($D_a \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{seg}$) y de Regresión (R^2) obtenidos para Res Congelada/Descongelada Lenta a partir del modelo no-lineal para cada mezcla (M) estudiada.

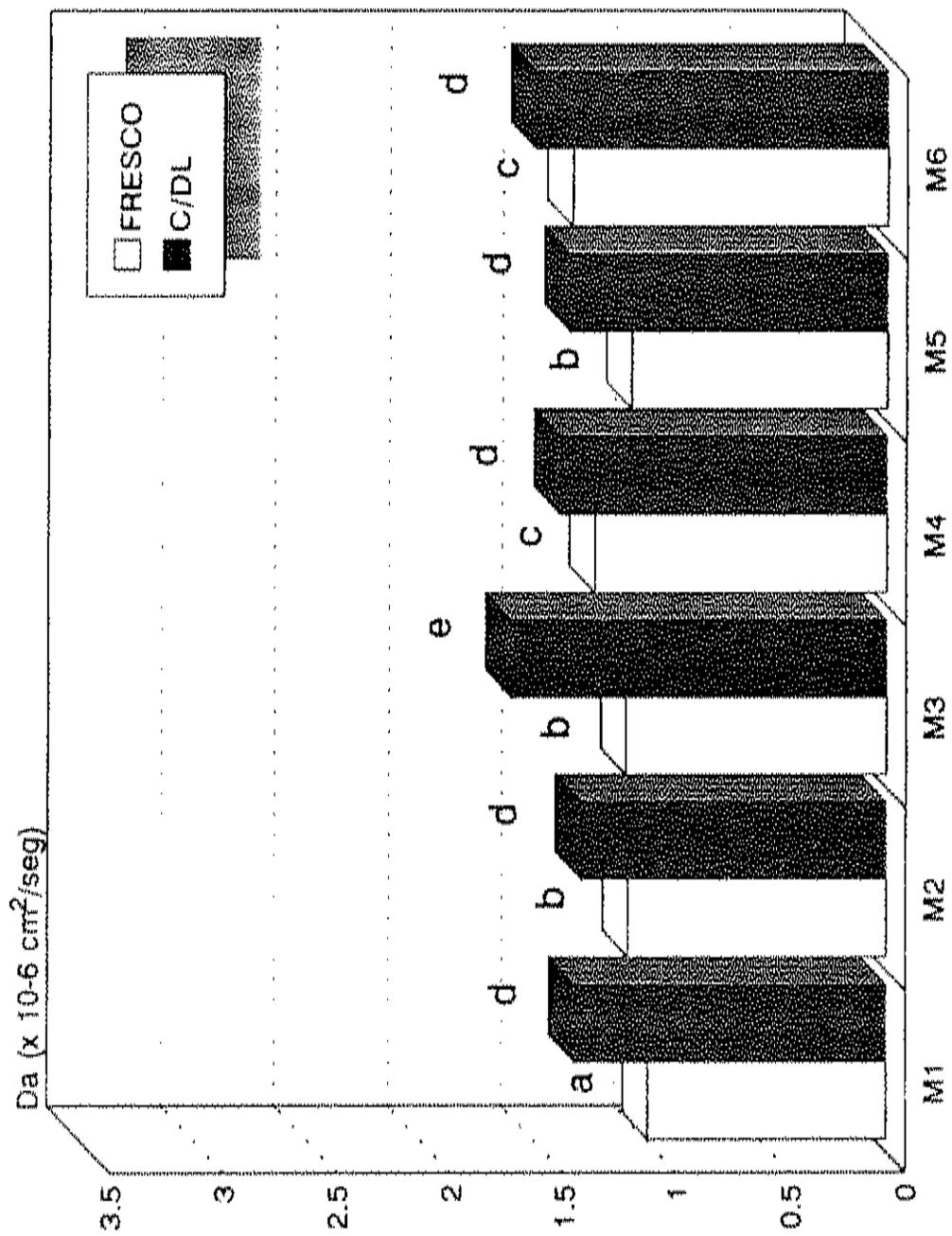
| RES CONGELADA/DESCONGELADO LENTO | | | | | | |
|----------------------------------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|
| | CLORO | | SODIO | | POTASIO | |
| | D_a | R^2 | D_a | R^2 | D_a | R^2 |
| M1 | $2.019 \pm .038$ | 0.986 | $2.190 \pm .056$ | 0.998 | | |
| M2 | $1.860 \pm .012$ | 0.999 | $2.077 \pm .037$ | 0.962 | $2.250 \pm .008$ | 0.995 |
| M3 | $2.024 \pm .045$ | 0.974 | $2.177 \pm .022$ | 0.948 | $2.310 \pm .014$ | 0.999 |
| M4 | $1.888 \pm .057$ | 0.978 | $2.182 \pm .022$ | 0.949 | $2.290 \pm .005$ | 0.995 |
| M5 | $2.000 \pm .036$ | 0.900 | $2.220 \pm .015$ | 0.961 | $2.134 \pm .030$ | 0.991 |
| M6 | $2.050 \pm .045$ | 0.992 | | | $1.970 \pm .070$ | 0.986 |

con los valores altos de R^2 y permite asegurar con certeza que los iones evaluados (Na^+ , K^+ y Cl^-) siguen el comportamiento descrito por la Ley de Fick, ya que la ecuación anterior se obtiene a partir de esta ley.

Al aplicar los respectivos criterios, enumerados en Materiales y Métodos (pag. 54), para determinar el ajuste del modelo a los dos procedimientos (lineal y no-lineal) se pudo corroborar que el modelo no-lineal para la determinación de D_a es más confiable que el lineal. Los valores de R^2 y F calculada son mayores para el modelo no-lineal y además las desviaciones estándar son más pequeñas (ver cuadros 7-10: lineal y cuadros 15-18: no-lineal).

Comparación entre Mezclas y Estado de Carne. Los resultados de esta prueba se muestran en las figuras 8, 9, 10, 11, 12 y 13 para cada estado de carne los que serán presentados y discutidos enseguida. Aunque desde el punto de vista estadístico, hacer una estimación de un parámetro estimado arrastra un error difícil de medir, se utilizó este método de comparación ya que el error de la primera estimación fue pequeño (Silveira, 1993).

Difusión de Cloro en Puerco. Los valores más altos de D_a para cloro en carne fresca se obtuvieron en las mezclas 4 y 6 ($p < 0.05$), y el valor menor en la mezcla 1 ($p < 0.05$) (figura 8). Cuando se utiliza carne C/DL los valores más altos se obtienen en las



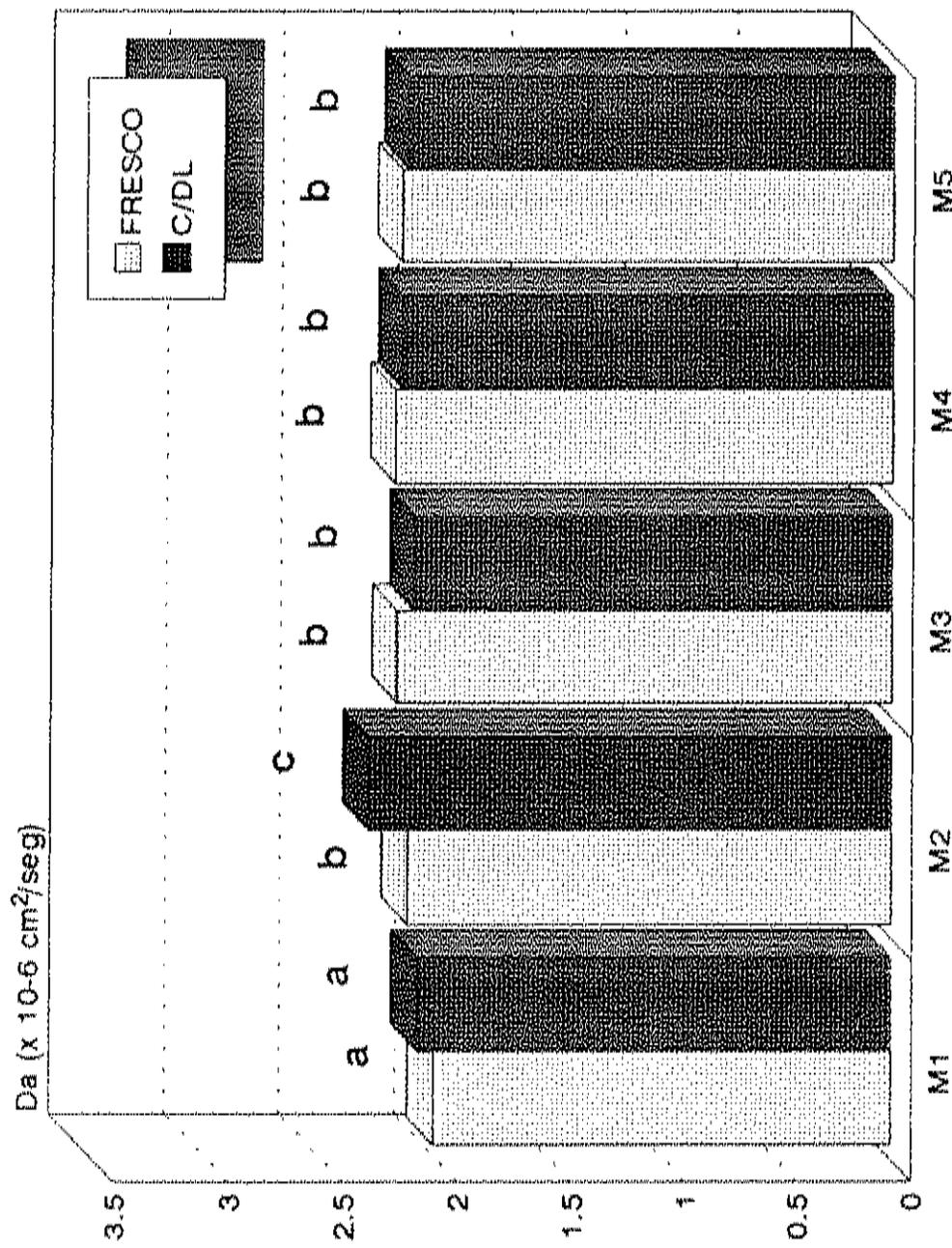
Diferente letra es estadísticamente diferente ($p < 0.05$).

Figura 8. Comparación entre valores de Da para cloro en diferentes mezclas (M) y estado de carne en puerco.

mezclas 3 y 6, y las demás mezclas tienen valores estadísticamente iguales ($p > 0.05$). Al comparar las barras obtenidas para puerco fresco y C/DL dentro de una misma mezcla, se puede observar que existen diferencias significativas entre los valores de D_a debido al efecto de la congelación y descongelación lenta ($p < 0.05$). En todas las mezclas, este efecto fue de aumentar la velocidad de difusión de cloro (D_a), hecho que concuerda con los datos reportados por González-Méndez *et al.* (1985) para este tipo de músculo.

El incremento de la velocidad de difusión de cloro debido al empleo del proceso C/DL, se ha atribuido a los posibles rompimientos que se dan en la membrana celular provocado por la formación de cristales de hielo (Hamm, 1986). Es muy probable que estas rupturas puedan facilitar el transporte de cloro ó de cualquier otro ion a través de la carne.

Difusión de Sodio en Puerco. El ion sodio tiene un valor máximo de D_a en fresco, cuando se encuentra en la mezcla 4 el cual es 2.199×10^{-6} cm²/seg. Este valor es igual estadísticamente a los D_a para las mezclas 2, 3 y 5 ($p > 0.05$) (Figura 9). Por esto anterior se puede señalar que independientemente de la cantidad de potasio que se utilice en la mezcla, el D_a para sodio en puerco fresco parece no mostrar variación. Además, el ion sodio se difunde más lento cuando no está presente el ion potasio. Un comportamiento similar se puede observar en puerco C/DL, ya que los valores de D_a son significativamente iguales ($p > 0.05$) en todas las mezclas (exceptuando la mezcla 2). El



Diferente letra es estadísticamente diferente ($p < 0.05$).

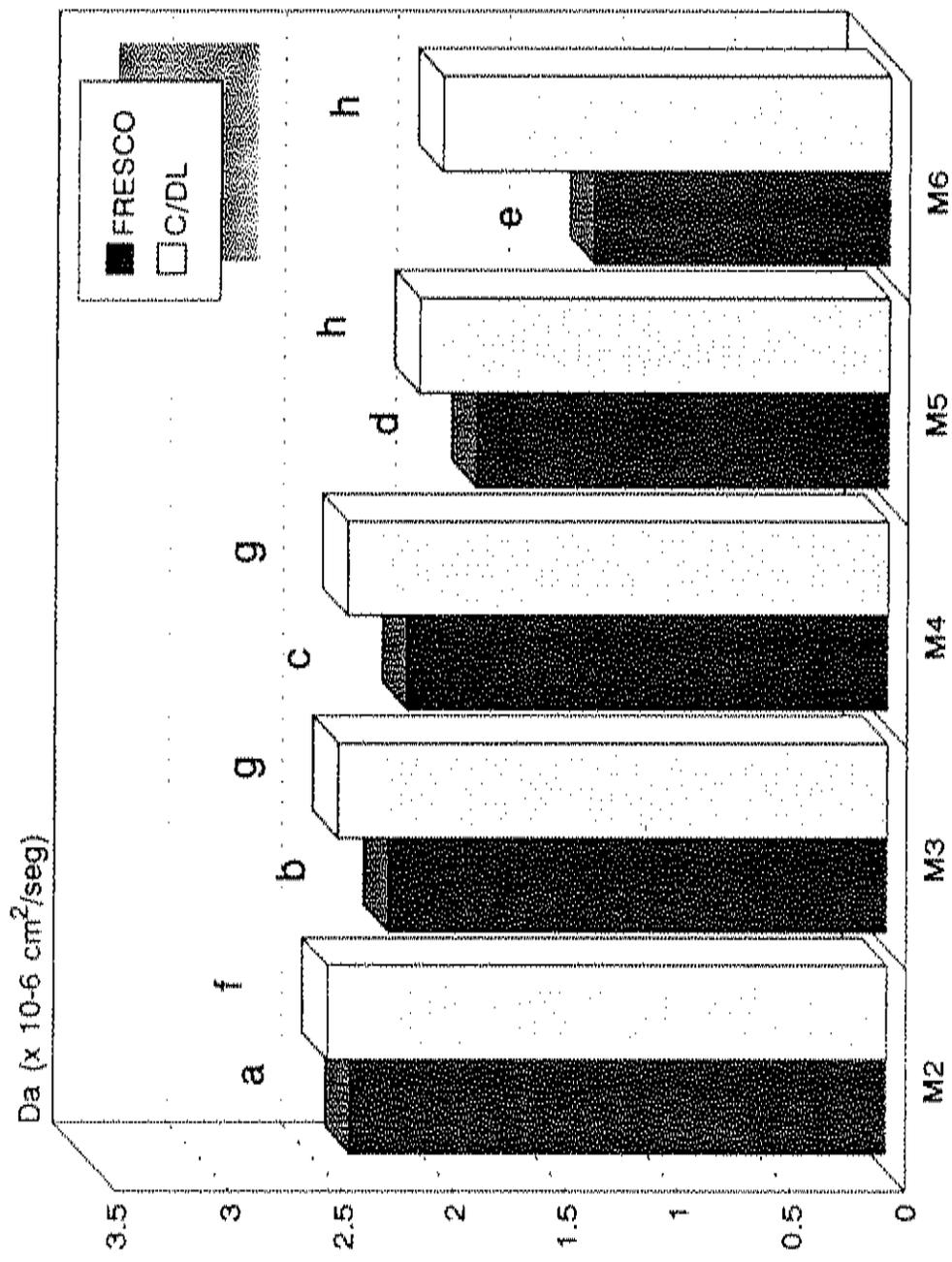
Figura 9. Comparación entre valores de Da para sodio en diferentes mezclas (M) y estado de carne en puero.

proceso C/DL mostró un efecto significativo únicamente en la mezcla 2: 80% NaCl 20% KCl ($p < 0.05$).

Una posible razón por la cual la velocidad de difusión (D_a) de sodio no se viera afectada por la C/DL, como en el caso de cloro, es probablemente por el tamaño del ion sodio que comparado con el ión cloro, e inclusive con el ión potasio, es más pequeño. Así pues, el hecho que existan rupturas ó no de la membrana celular no sería un impedimento físico para la difusión de sodio en este tipo de carne.

Difusión de Potasio en Puerco. Se puede observar en la figura 10 que se tiene un valor significativamente diferente de D_a para cada mezcla evaluada en Fresco ($p < 0.05$), presentándose un comportamiento ascendente a medida que la concentración de sodio aumenta en la mezcla. El valor menor de D_a se obtuvo en la mezcla 6 (100% KCl). También en puerco C/DL, se obtuvieron los valores menores de D_a en las mezclas con mayor concentración de potasio, mezclas 5 y 6 ($p < 0.05$).

Estos resultados muestran una posible interacción entre los iones involucrados en las mezclas (sodio y potasio). A pesar de que el gradiente de concentración está a favor para que la difusión de potasio sea más rápida en la mezcla 6 (100% KCl), que en las de menor concentración, no sucede así. En base a los valores de D_a obtenidos, es probable que de alguna manera el ion sodio esté facilitando la difusión de potasio en la carne de puerco (*Longissimus dorsi*).



Diferente letra es estadísticamente diferente ($p < 0.05$).

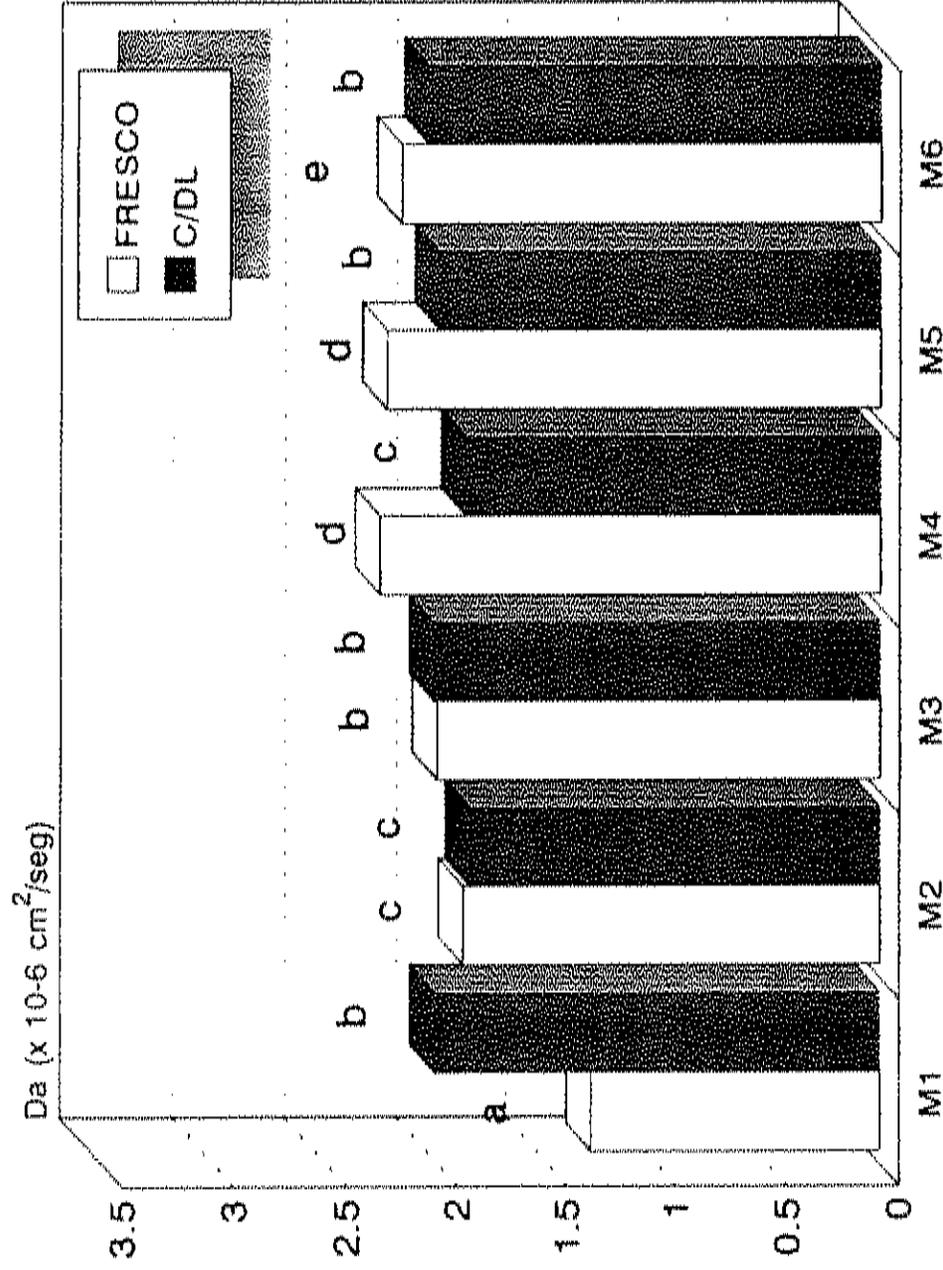
Figura 10. Comparación entre valores de Da para potasio en diferentes mezclas (M) y estado de carne en puerco.

En la figura 10 también se puede notar que la velocidad de difusión aparente (D_a) de potasio se incrementó significativamente ($p < 0.05$) en la mayoría de las mezclas, cuando se aplicó la congelación/descongelación lenta.

No se encontraron reportes en la literatura con estudios similares, sólo se hallaron reportes sobre co-transporte de sodio y potasio en membranas biológicas *in vivo*. Bajo estas condiciones, el transporte de iones sucede principalmente a través de un gasto energético, siendo la permeabilidad y la difusión pasiva factores secundarios (Haldky, 1989).

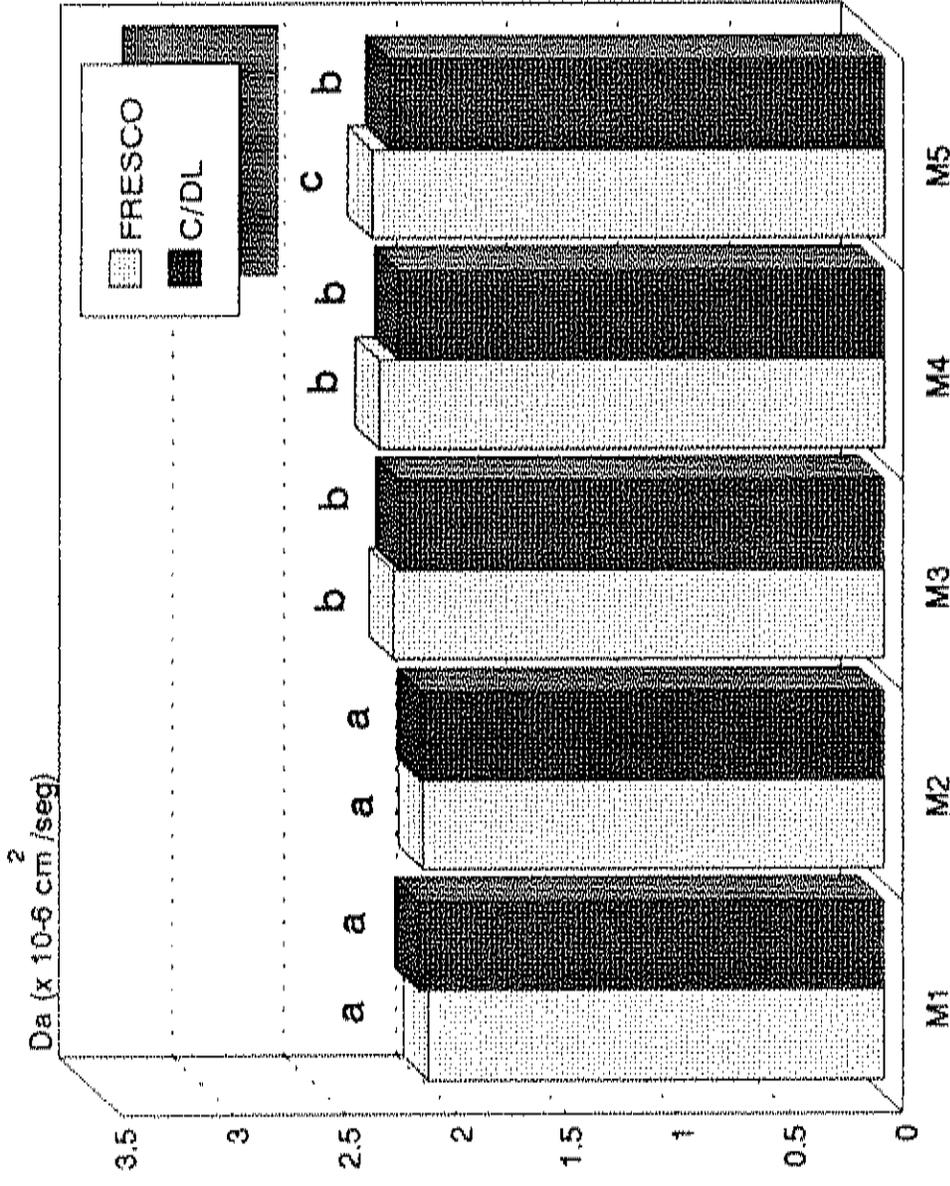
Difusión de Cloro en Res. Variaciones semejantes a las obtenidas para puerco Fresco y C/DL pueden observarse en la figura 11, en el músculo *Longissimus dorsi* de res en las mezclas (M) evaluadas. También se puede observar en dicha figura que las mezclas 1, 4, 5 y 6 muestran un incremento significativo ($p < 0.05$) por efecto de C/DL.

Difusión de Sodio en Res. En la figura 12 se muestran las barras que indican el comportamiento de sodio en el músculo *Longissimus dorsi* de res. Los D_a más altos se obtuvieron en la mezcla 6 ($p < 0.05$). En el caso de res fresca el valor de D_a se incrementó proporcionalmente al aumento de potasio en la mezcla. Estos resultados difieren a los obtenidos en puerco Fresco ya que en éste el D_a no varió con la cantidad



Diferente letra es estadísticamente diferente (p < 0.05).

Figura 11. Comparación entre valores de Da para cloro en diferentes mezclas (M) y estado de carne en res.



Diferente letra es estadísticamente diferente ($p < 0.05$).

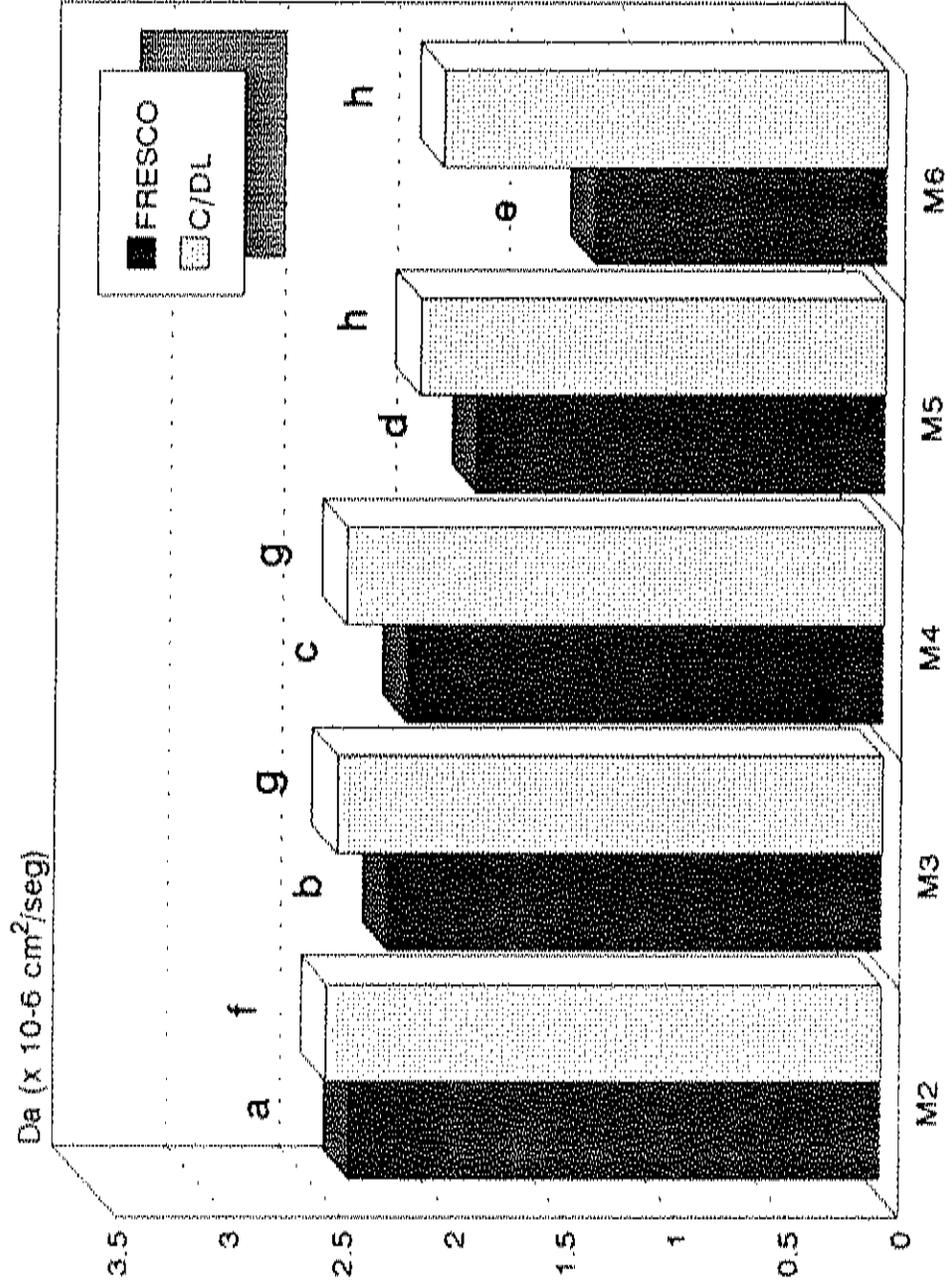
Figura 12. Comparación entre valores de D_a para sodio en diferentes mezclas (M) y estado de carne en res.

de potasio en la mezcla. Sin embargo, en ambos casos se observó el efecto positivo del ion potasio sobre el valor del D_a de sodio, es decir, que en su presencia el coeficiente de difusión aparente (D_a) del sodio aumenta.

Los valores del D_a de sodio (en las diferentes mezclas) en carne de res C/DL (figura 12), tuvieron un comportamiento similar al mostrado en puerco bajo el mismo tratamiento, o sea, que este proceso no tiene un efecto significativo sobre los valores de D_a en una misma mezcla ($p > 0.05$) excepto en la mezcla 5.

Difusión de Potasio en Res. El valor de D_a más alto para este ión se obtuvo en la mezcla con mayor proporción de sodio (Mezcla 2). El resto de las mezclas variaron con una tendencia ascendente a medida que el porcentaje de sodio aumentaba en la mezcla (figura 13). En res C/DL los valores más altos también se obtuvieron en las mezclas con mayor cantidad de sodio. Estos resultados concuerdan con los obtenidos para puerco con el mismo tratamiento y donde se observa un efecto cooperativo entre ambos iones en su difusión.

Comparación entre Tipos de Carne. Las comparaciones entre los dos tipos de carne se llevaron a cabo dentro de una misma mezcla y estado de carne, es decir por ejemplo, el valor de D_a para cloro en la mezcla 1 en res únicamente se comparó con el valor de



Diferente letra es estadísticamente diferente ($p < 0.05$).

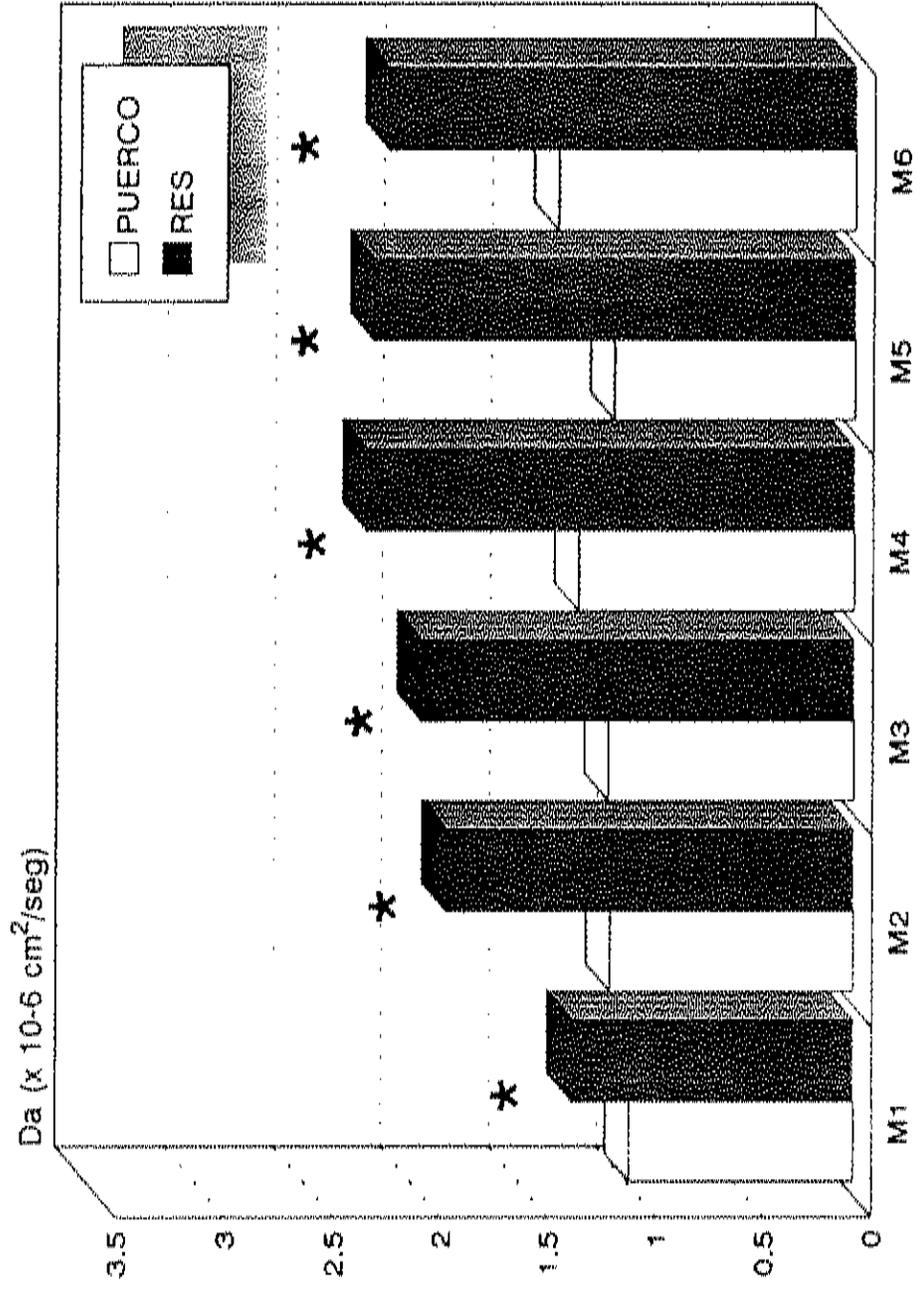
Figura 10. Comparación entre valores de D_a para potasio en diferentes mezclas (M) y estado de carne en puerco.

Da para cloro en la mezcla 1 en puerco. Los resultados de esta prueba se muestran en las figuras 14 - 19.

Cloro. Se puede observar en las figuras 14 y 15 que independientemente del estado de la carne, existen diferencias significativas entre los valores de coeficientes en res y puerco para una misma mezcla ($p < 0.05$). También se puede notar que en todos los casos, el valor más alto de Da se obtiene en carne de res. Este hecho concuerda con la tendencia marcada por Gros *et al.* (1984), queines resaltan que no importa si el tejido muscular es graso ó no, la difusión de iones como el cloro, el nitrito y el nitrato parecen difundirse más rápido en carne de res que en puerco.

Sodio. En la mayoría de las mezclas no se encontraron diferencias en forma significativa entre los Da de este ion, para una misma mezcla entre res y puerco ($p > 0.05$), ya sea tanto en estado Fresco como bajo C/DL (figuras 16 y 17) con excepción de la mezcla 5 (Figura 16 Fresco) y mezcla 2 (Figura 17 C/DL).

Potasio. El ion potasio (Figuras 18 y 19) mostró un comportamiento similar al ion cloro, es decir, hubo diferencias significativas entre res y puerco en la mayoría de las mezclas en los dos estados de carne (Fresco y C/DL). En la Figura 18 se observa que en carne Fresca en las mezclas 2, 5 y 6 la velocidad de difusión de potasio es



★ Diferencia Significativa ($p < 0.05$).

Figura 14. Comparación por tipo de carne entre valores de Da de cloro en carne fresca y para cada mezcla estudiada (M).

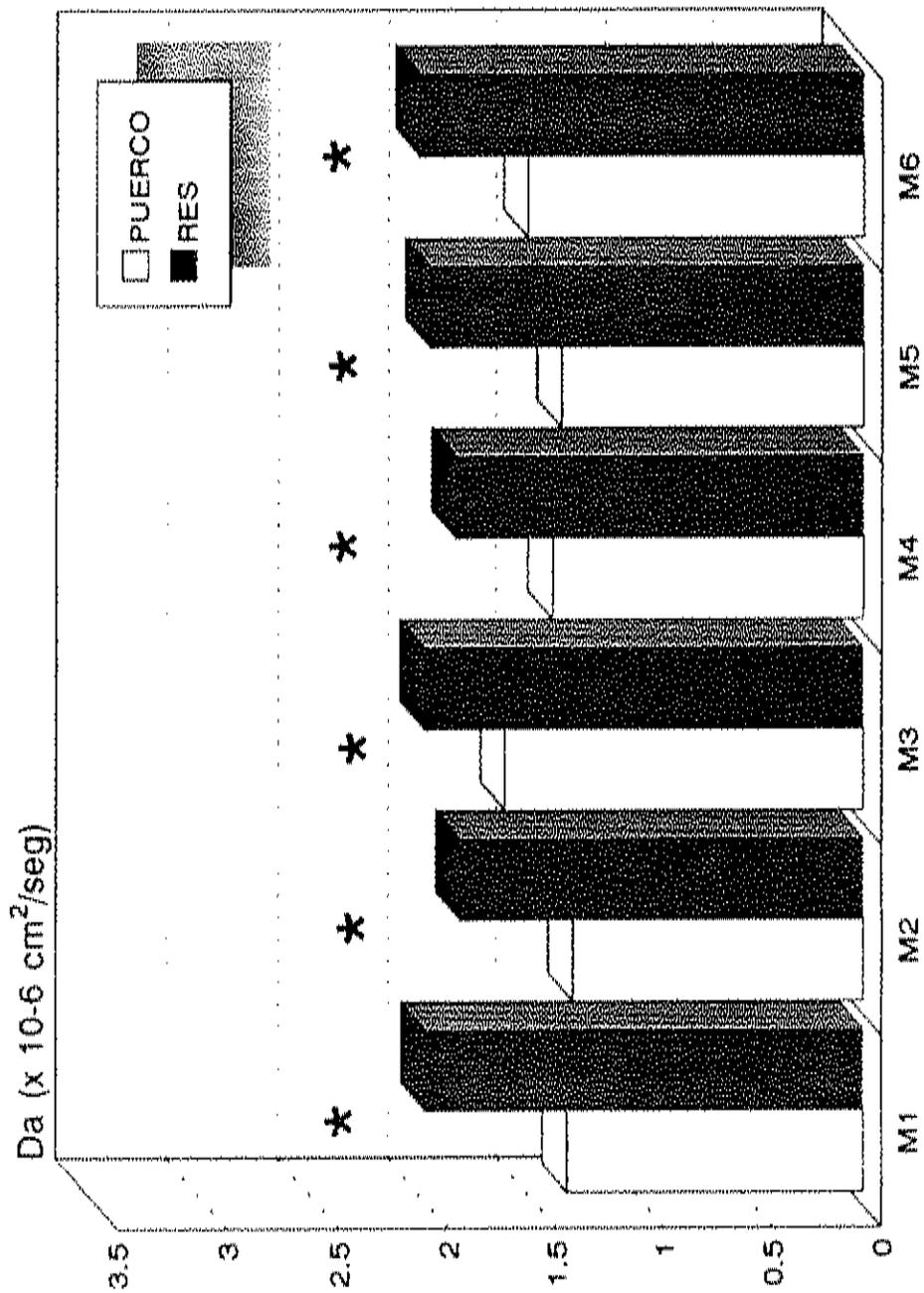
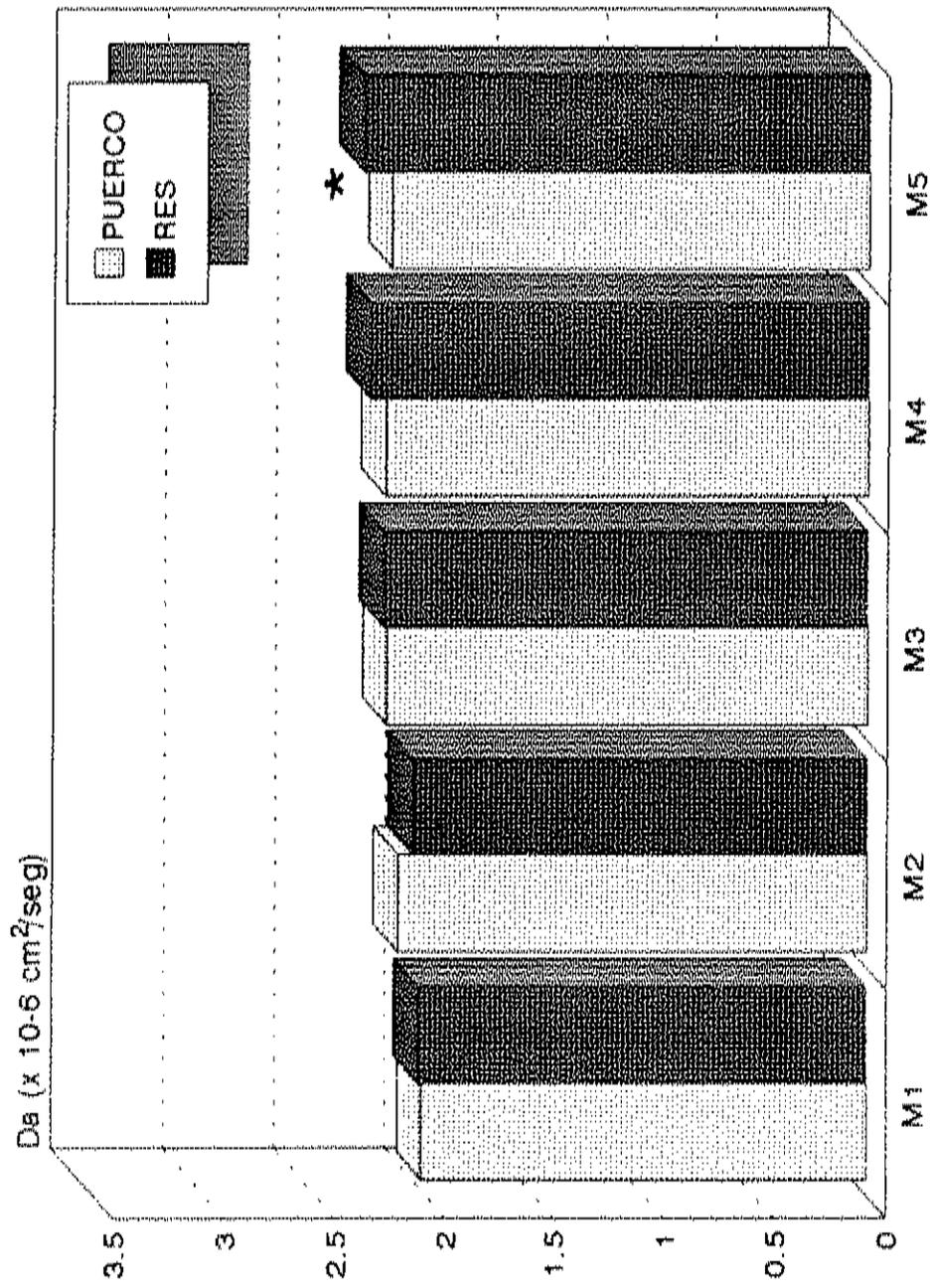
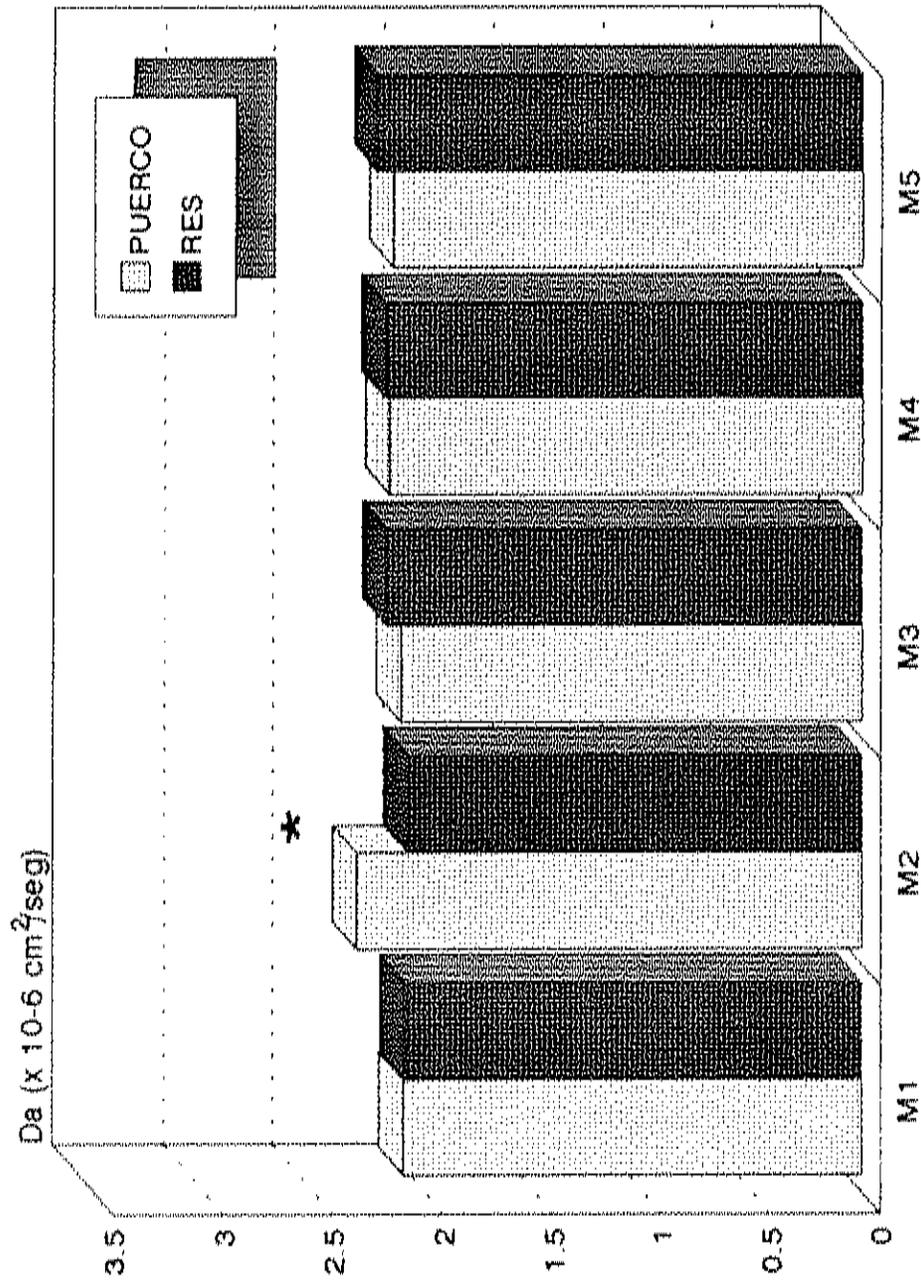


Figura 15. Comparación por tipo de carne entre valores de Da de cloro en carne congelada/descongelada lenta y para cada mezcla estudiada (M).



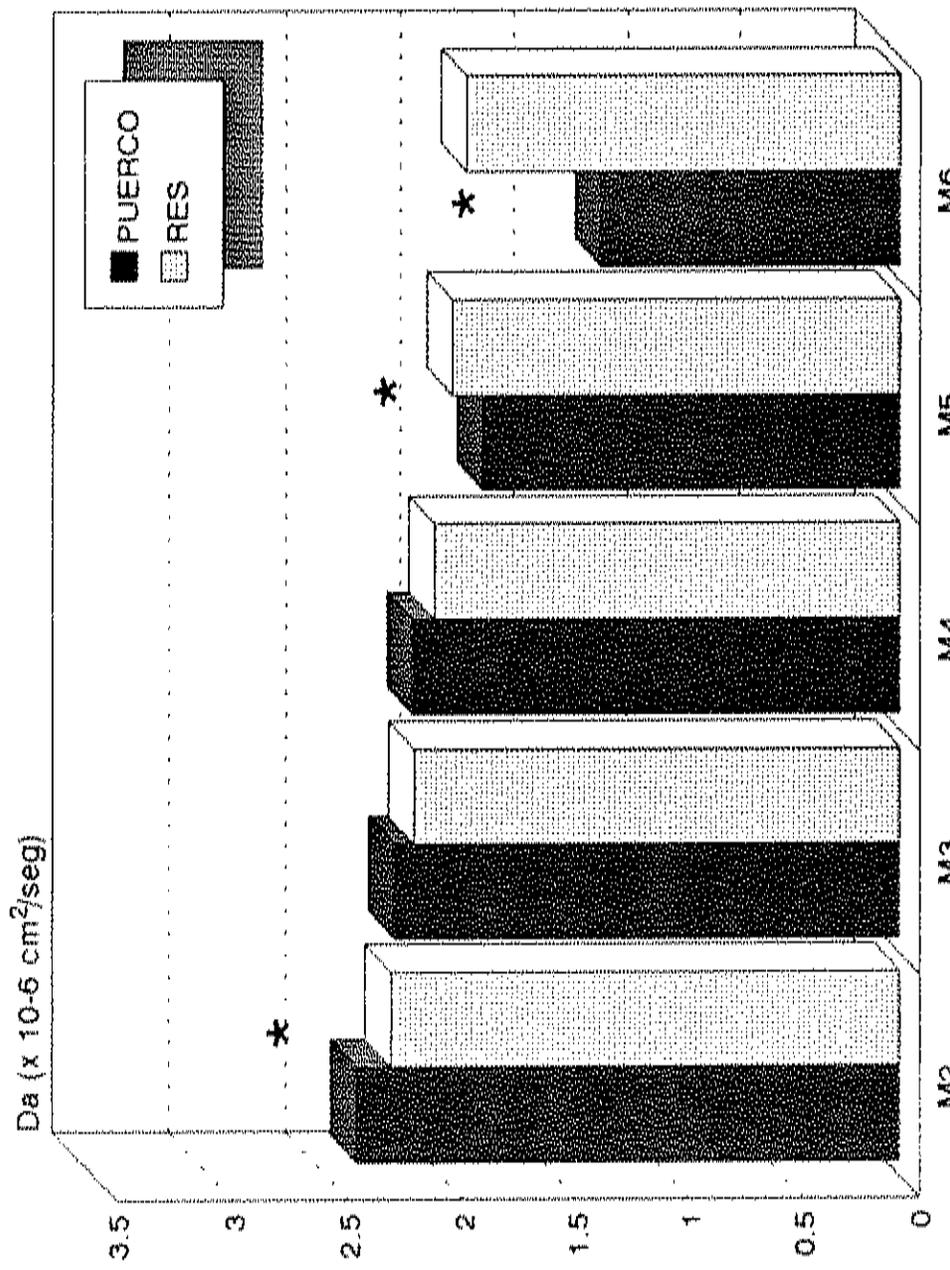
★ Diferencia Significativa ($p < 0.05$).

Figura 16. Comparación por tipo de carne para valores de Da de sodio en carne fresca y para cada mezcla estudiada (M).



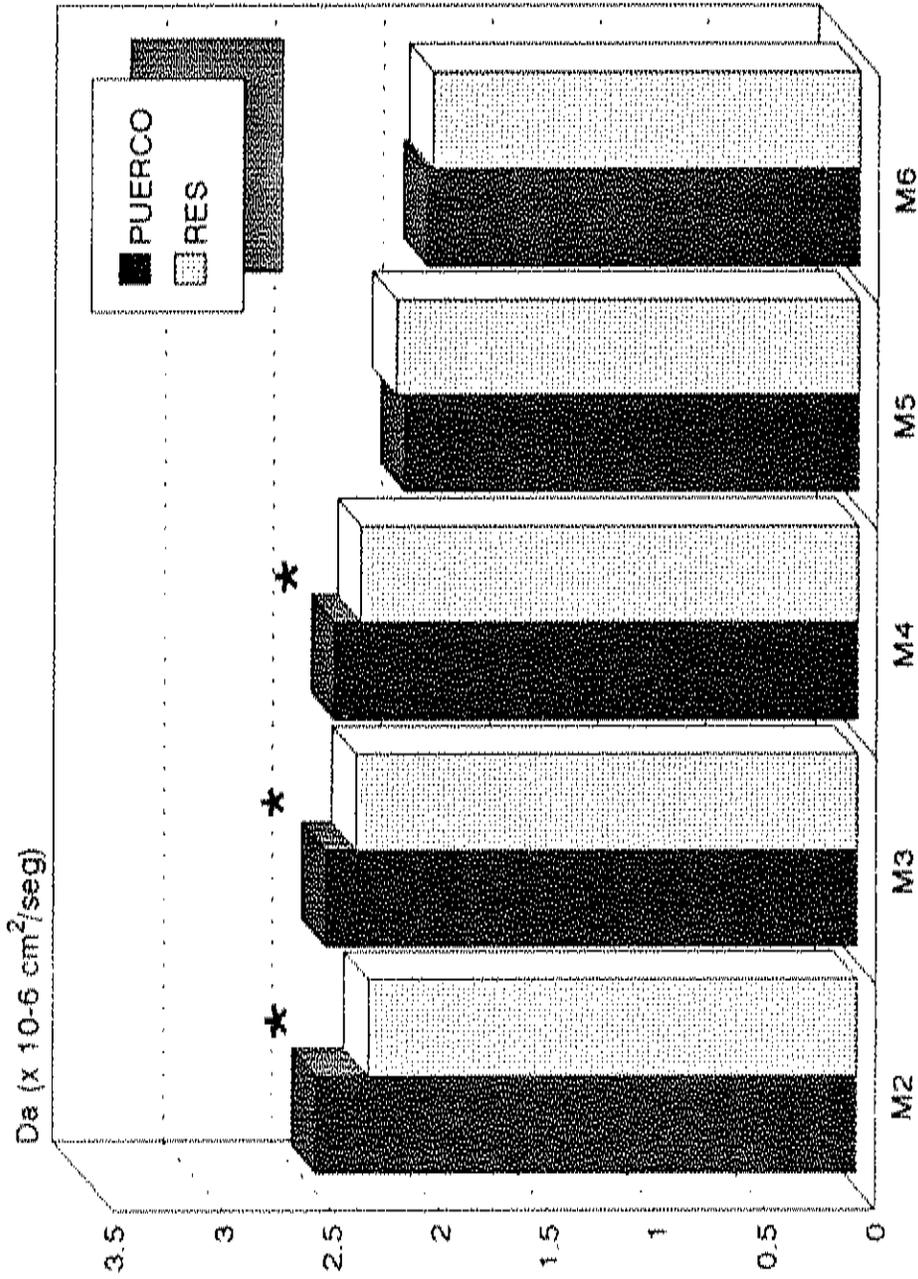
★ Diferencia Significativa ($p < 0.05$).

Figura 17. Comparación por tipo de carne para valores de Da de sodio en carne congelada/descongelada lenta y para cada mezcla estudiada (M).



★ Diferencia Significativa (p<0.05).

Figura 18. Comparación por tipo de carne entre valores Da de potasio en carne fresca y para cada mezcla estudiada (M).



★ Diferencia Significativa ($p < 0.05$).

Figura 19. Comparación por tipo de carne entre valores de Da de potasio en carne congelada/descongelada lenta y para cada mezcla estudiada (M).

diferente entre puerco y res ($p < 0.05$). Se presentaron también diferencias entre tipo de carne en las mezclas 2, 3 y 4 para carne Congelada/Descongelada Lenta (Figura 19).

Diferencias entre Difusión de Sodio y Potasio. Un objetivo de gran importancia en este trabajo fue observar si existían diferencias entre las velocidades de difusión de estos dos iones cuando se encontraban mezclados. Con este fin se graficaron los valores de D_a para sodio y potasio en una misma mezcla variando el tipo y estado de carne. Estas gráficas se muestran en las figuras 20, 21, 22, 23 y 24.

En las Figuras 20 y 23 (mezclas 2 y 5 respectivamente) podemos observar que los valores más altos de D_a se obtuvieron para aquel ion que se encontraba en menor proporción en la mezcla en cualquiera de los tratamientos. En la mezcla 3 (60% NaCl 40% KCl) (Figura 21) los valores de D_a para sodio y potasio son muy semejantes dentro de un mismo tratamiento. En cambio, en la mezcla 4 (40% NaCl 60% KCl) podemos observar (Figura 22) que cuando se aplica el proceso de C/DL, independientemente del tipo de carne, se obtienen mayores D_a para potasio. Sin embargo cuando el músculo es salado en estado Fresco el coeficiente D_a , para los dos cationes pueden considerarse iguales.

Por último, en la Figura 24, se muestran los valores de D_a para sodio y potasio en las mezclas 1 y 6, es decir, cuando estos iones no se encontraban mezclados (100%

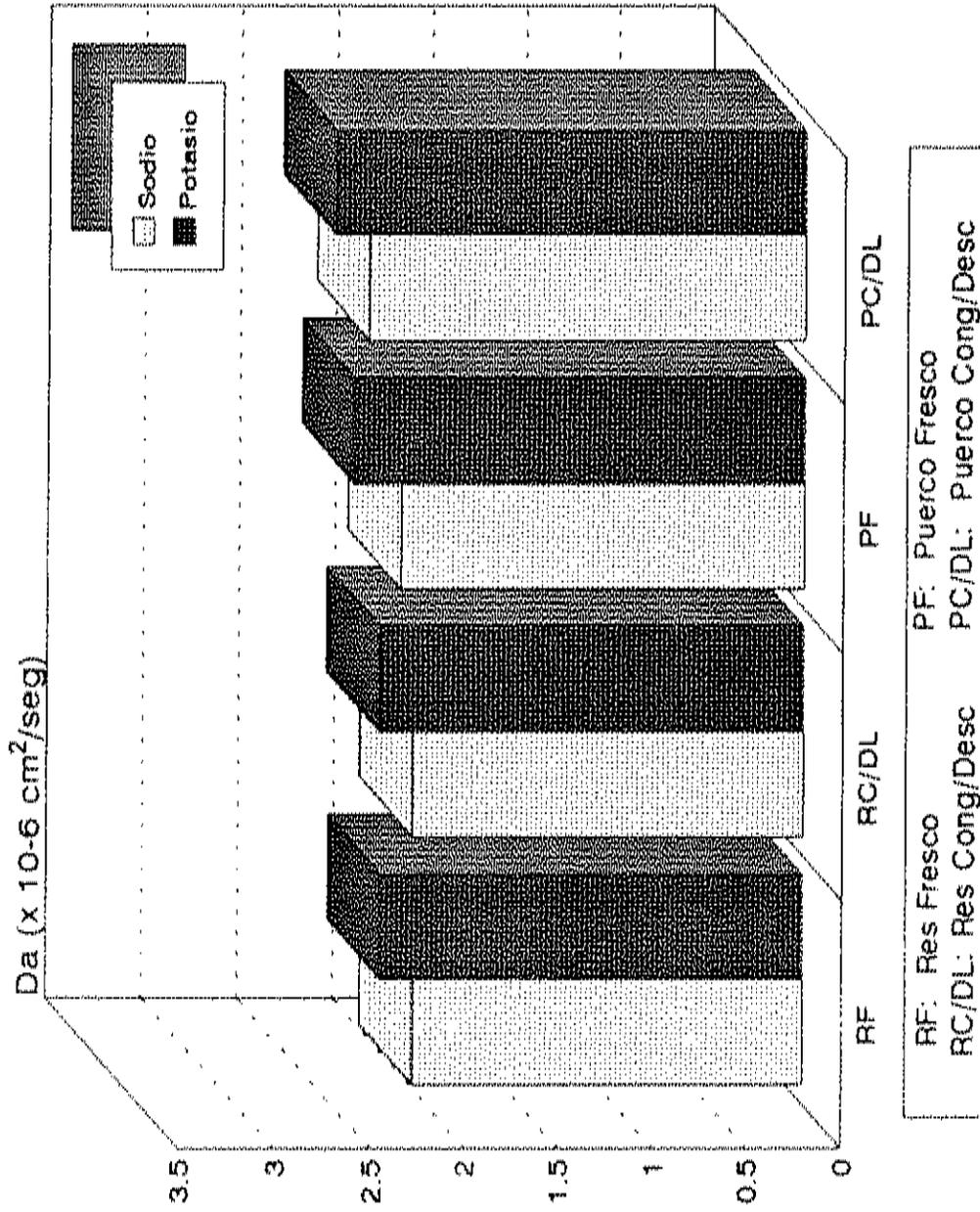


Figura 20. Comparación entre Da para sodio y potasio en la mezcla 2 (80:20%).

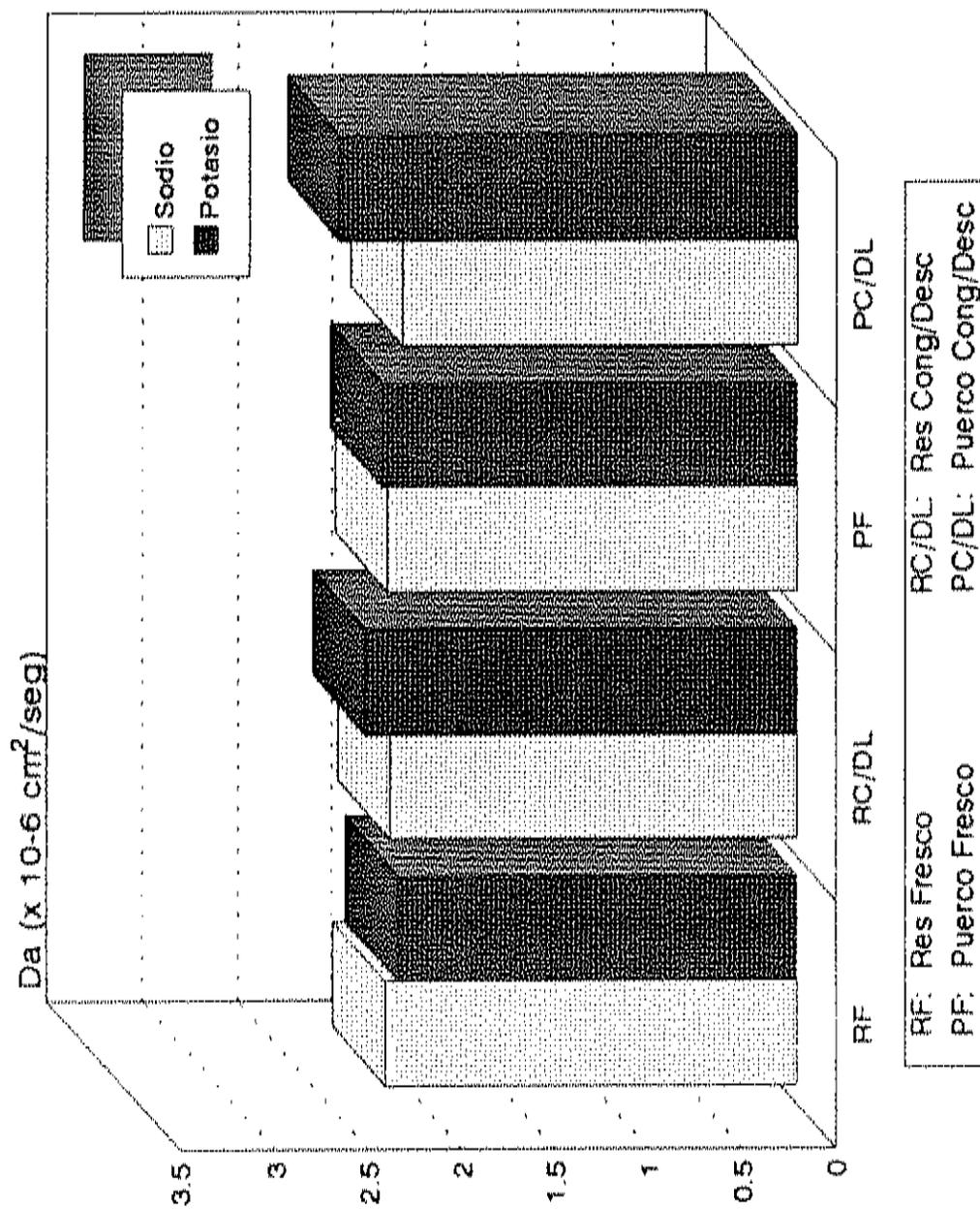


Figura 21. Comparación entre Da para sodio y potasio en la mezcla 3 (60% NaCl, 40% KCl).

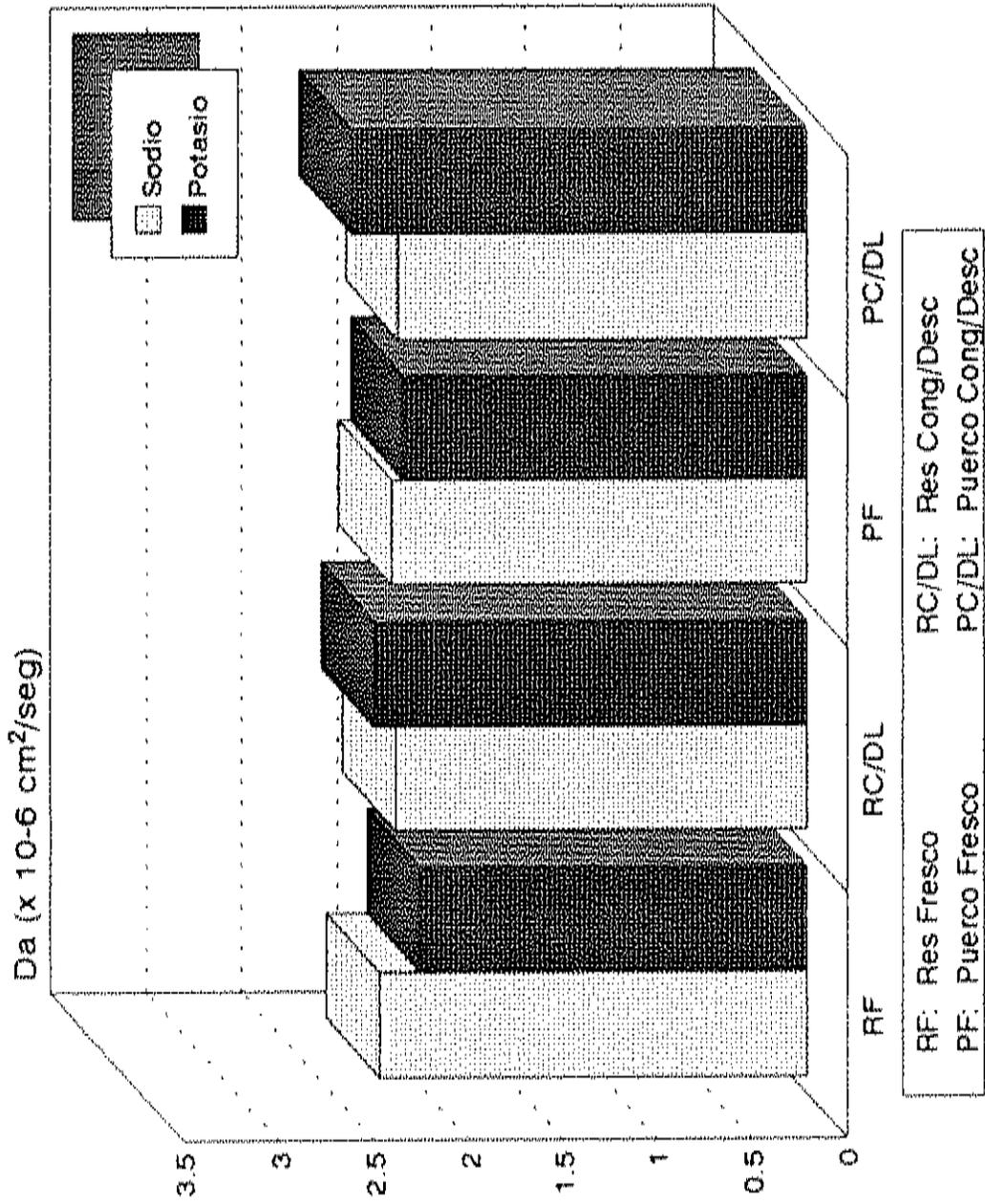


Figura 22. Comparación entre sodio y potasio en la mezcla 4 (40% NaCl, 60% KCl).

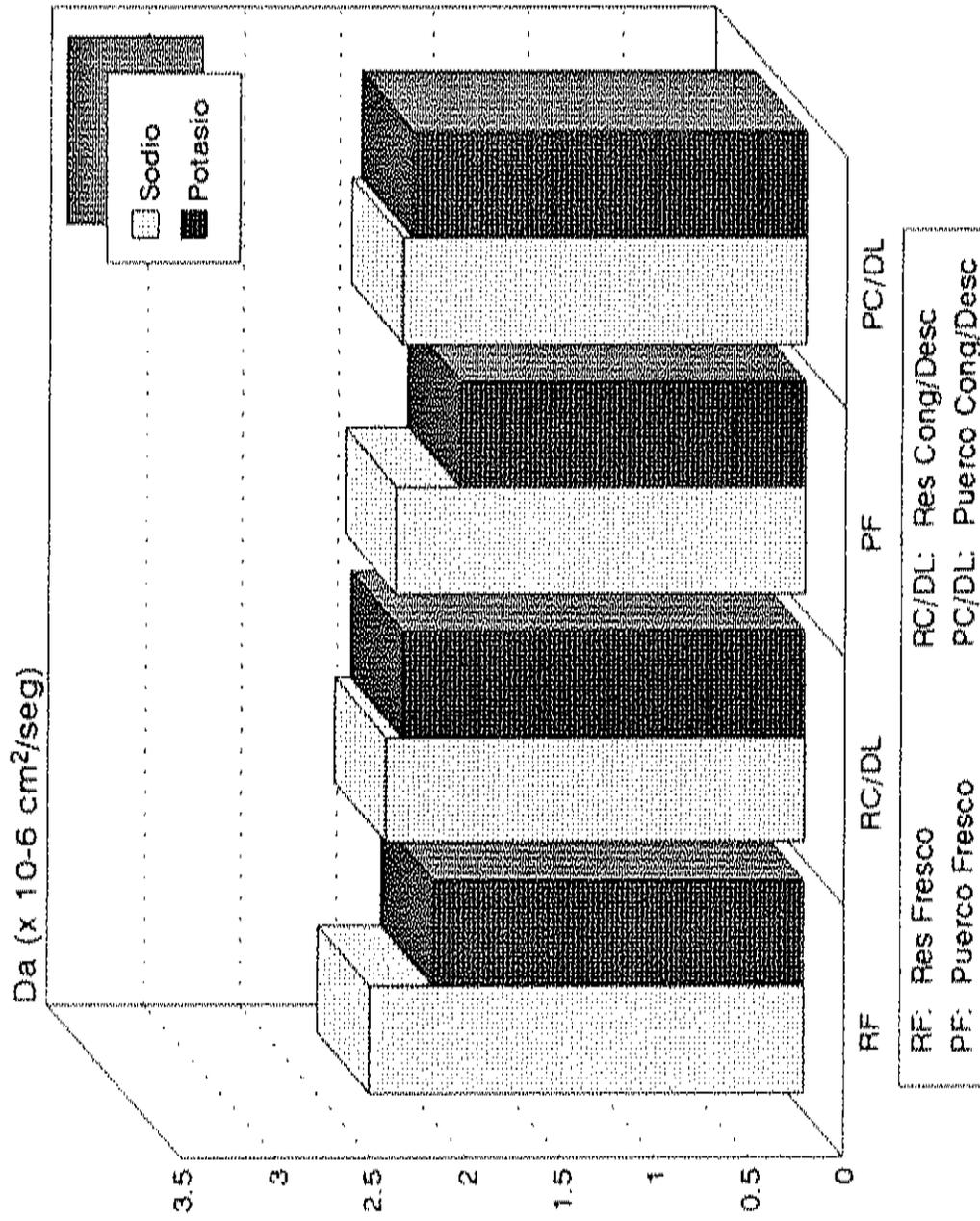


Figura 23. Comparación entre Da para sodio y potasio en la mezcla 5 (20% NaCl, 80% KCl).

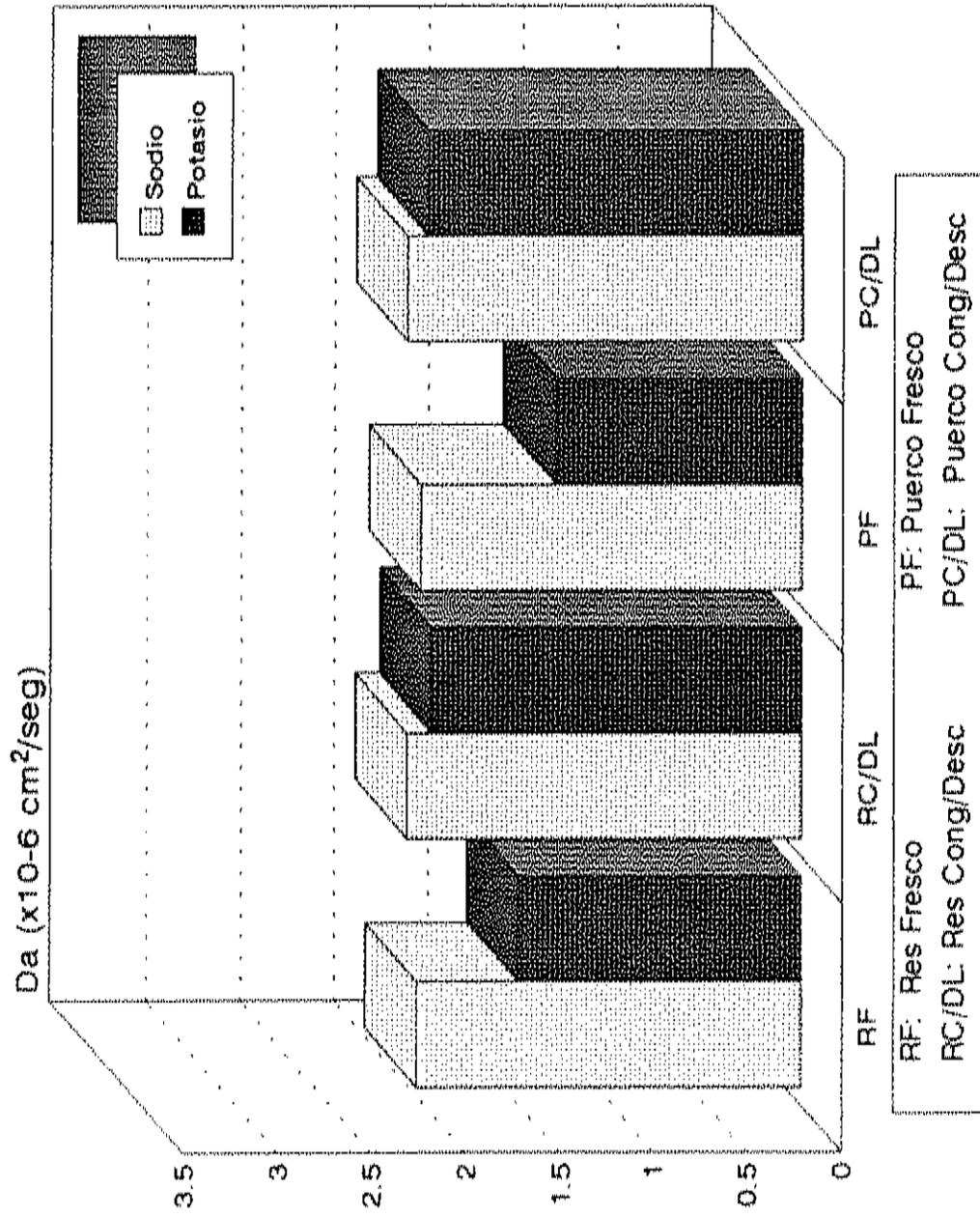


Figura 24. Comparación entre Da para sodio y potasio cuando no se encuentran mezclados (100% NaCl; 100% KCl).

NaCl y 100% KCl respectivamente). Se puede notar que la velocidad de difusión del ion sodio cuando no se encuentra mezclado (con potasio) es mayor en cualquiera de los dos tipos de carne en estado fresco. Cuando a la carne se le ha aplicado el proceso C/DL, los valores de D_a para los dos iones son muy similares, observándose en ambos el efecto del proceso aplicado (mismo que en el ion cloro).

CONCLUSIONES

En vista de que los valores de R^2 para el modelo lineal fueron más bajos que en el modelo no-lineal, las conclusiones sobre los valores de los coeficientes de difusión aparente (D_a) y sus comparaciones se basaron en los resultados obtenidos a partir del último modelo.

- * El modelo lineal para determinar los coeficientes de difusión aparente (D_a) a través del modelo matemático para un medio semi-infinito (ecuación 9), sobreestima los valores de D_a (independientemente del ión) comparados con los valores obtenidos por el modelo no-lineal.
- * El modelo no-lineal es más confiable para la determinación de D_a en carne, ya que los R^2 obtenidos son más altos para este modelo (0.878-0.999) comparados con el modelo no-lineal (0.386-0.986).
- * Los iones Na^+ y K^+ siguen el comportamiento difusional descrito por la ley de Fick, ya que los datos experimentales se ajustan al modelo matemático para un medio semi-infinito obtenido a partir de esta ley con una $R^2 > 0.85$ (modelo no-lineal).

- * Los Da para cloro, sodio y potasio se ven afectados por las diferentes mezclas evaluadas ($p < 0.05$). En el caso especial de sodio el valor de Da para este ión no se vió afectado por la cantidad de potasio en la mezcla (exceptuando res fresco).

- * En todos los tratamientos evaluados (tipo de carne y estado de carne) se obtuvieron valores de Da significativamente mas altos para los iones Na^+ y K^+ cuando éstos se encuentran combinados (independientemente de la mezcla) comparado con sus respectivos valores de Da cuando no se encuentran mezclados.

- * El proceso congelación/descongelación lenta tuvo un efecto significativo sobre los valores de Da de cloro y potasio, el cual fue de incrementar el valor de Da. En cambio para el ión sodio los Da para la mayoría de las mezclas no se vieron afectadas por este proceso.

- * Los valores de Da de cloro y potasio son significativamente altos (en la mayoría de los casos) para res ya sea fresca ó C/DL. En cambio los Da de sodio no se ven afectados por el tipo de carne.

- * El ión potasio tiene un Da mayor que el de sodio en aquellas mezclas de NaCl/KCl (mezcla 2 y 3) que comunmente se emplean en la elaboración de productos cárnicos bajos en sodio.

RECOMENDACIONES

Realizar un estudio a fin de determinar el posible tipo de interacción que existe entre los iones de sodio y potasio cuando se adicionan en mezclas de sales en los diferentes tipos de músculos y especies.

Modificar los tiempos o procesos de salado que se emplean en la elaboración de productos cárnicos hiposódicos como es el tiempo, masajeo y la inyección. Es posible considerar, en base a estos resultados, que el cloruro de potasio sea añadido después que el cloruro de sodio en el proceso de elaboración a fin de retardar su difusión.

Determinar el efecto del contenido de grasa y tejido conectivo sobre la velocidad de difusión de estos iones.

Efectuar un estudio para determinar las diferencias en permeabilidad de la membrana muscular cuando cesan los mecanismos de transporte activo de los iones (Na^+ , K^+ y Cl^-) ya que no se encontraron referencias relacionadas con carne.

APENDICE A

Nomenclatura

NOMENCLATURA

$a = LS/V_2$

C = Concentración de la sustancia que se difunde

C_i = Concentración del soluto a cualquier tiempo

C_0 = Concentración inicial en la carne

Cong = Congelación

D = Coeficiente de difusión (cm^2/s)

D_a = Coeficiente de difusión aparente ó efectivo (cm^2/s)

Desc = Descongelación

exp = Exponencial

F = Flujo de Masa

F_0 = Número de Fourier

h = Grosor de la capa (m)

L = Longitud (m)

Lent = Lento

M = Masa del soluto en el alimento

m = Masa del soluto que atraviesa la capa de carne.

M_0 = Masa inicial de soluto que se pone en contacto con el alimento

n = Número de Experimentos

Rap= Rápido

S = Area superficial (m^2)

t = Tiempo (seg)

T = Temperatura ($^{\circ}C$)

V = Volumen (m^3)

x = absisa (m)

z = Eje de difusión (m)

Letras Griegas:

α = Raíces positivas de α Tan $\alpha = a$

$\alpha' = Mo/(\pi Dat)^{0.5}$

$\beta' = 1/4Dat$

∞ = Infinito

V = Para toda

π = 3.1416

Σ = Sumatoria

Subíndices:

1: Tanque 1

2: Tanque 2

1,0: Tanque 1 al inicio

2,0: Tanque 2 al inicio

cal: Calculado

exp: Experimental

i: Interfase

o: al inicio

APENDICE B
Perfiles de Concentración
Figuras 25-36

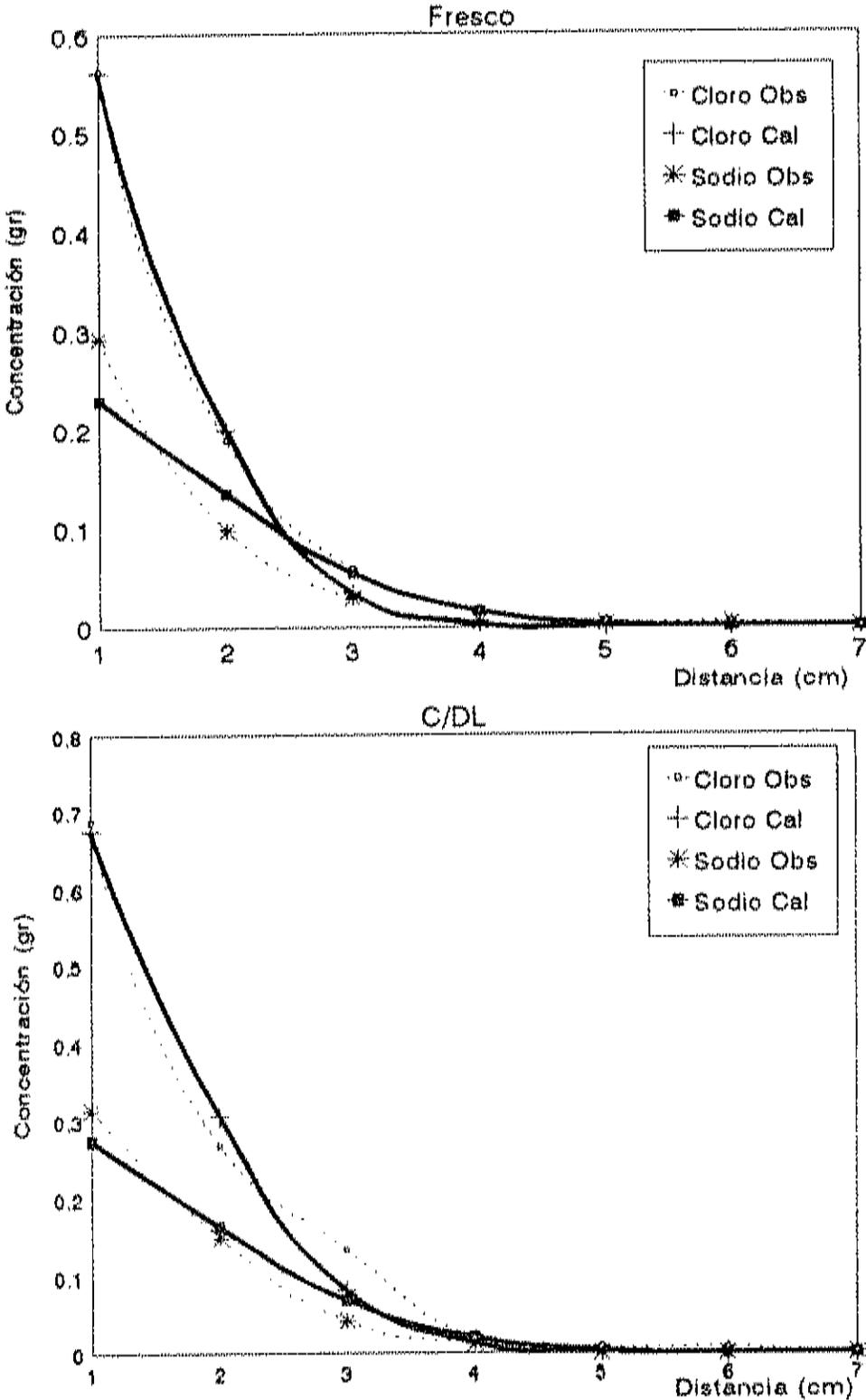


Figura 25. Perfiles de Concentración en función de la Distancia de penetración de Iones en la mezcla 1 para Carne de Puerco Fresca y C/DL.

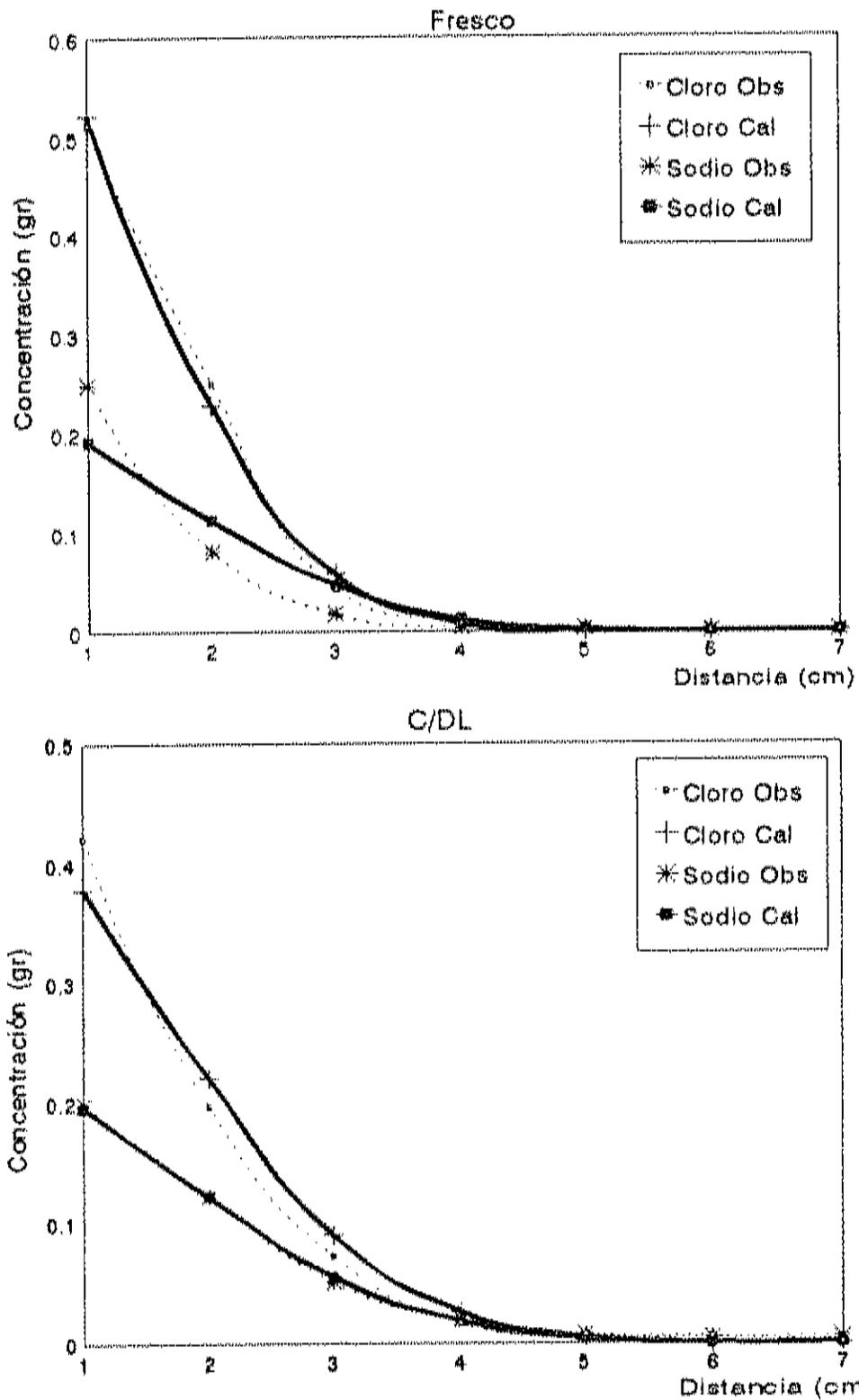


Figura 26. Perfiles de Concentración en Función de la Distancia de Penetración de Iones en la Mezcla 1 para Carne de Res Fresca y C/D.

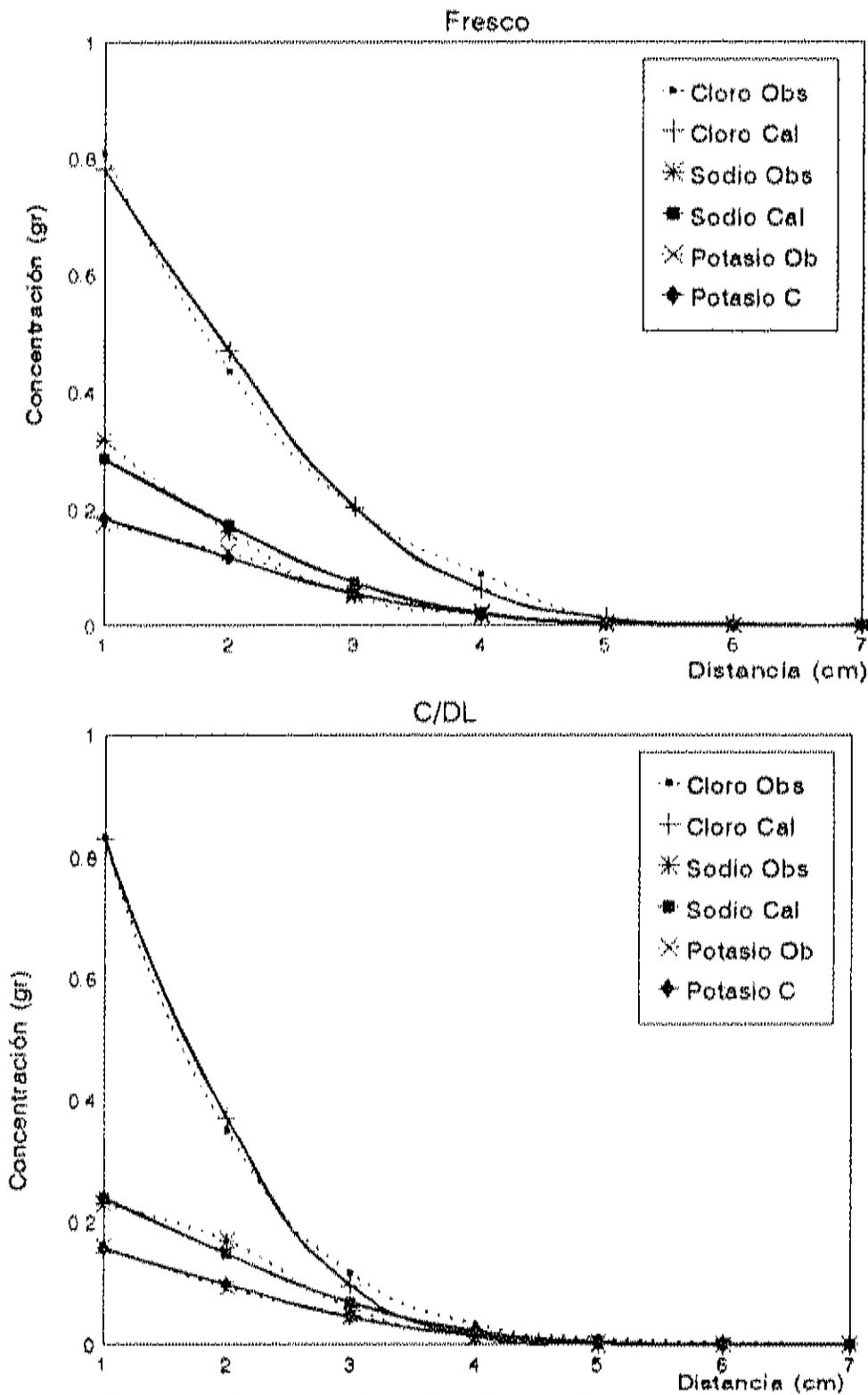


Figura 27. Perfiles de Concentración en Función de la Distancia de Penetración de Iones en la Mezcla 2 para Carne de Puerco Fresca y C/DL.

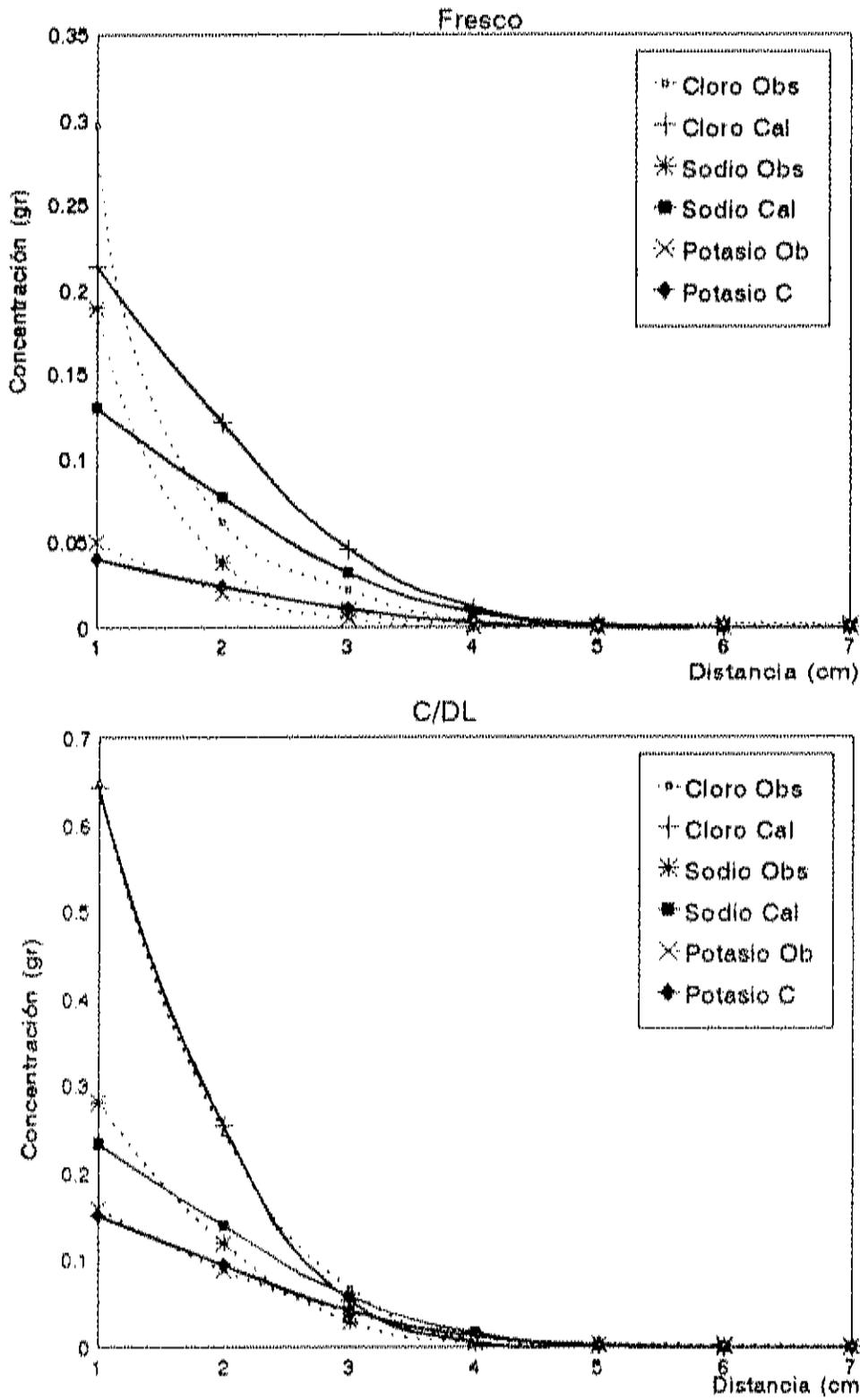


Figura 28. Perfiles de Concentración en Función de la Distancia de Penetración de Iones en la Mezcla 2 para Carne de Res Fresca y C/DL.

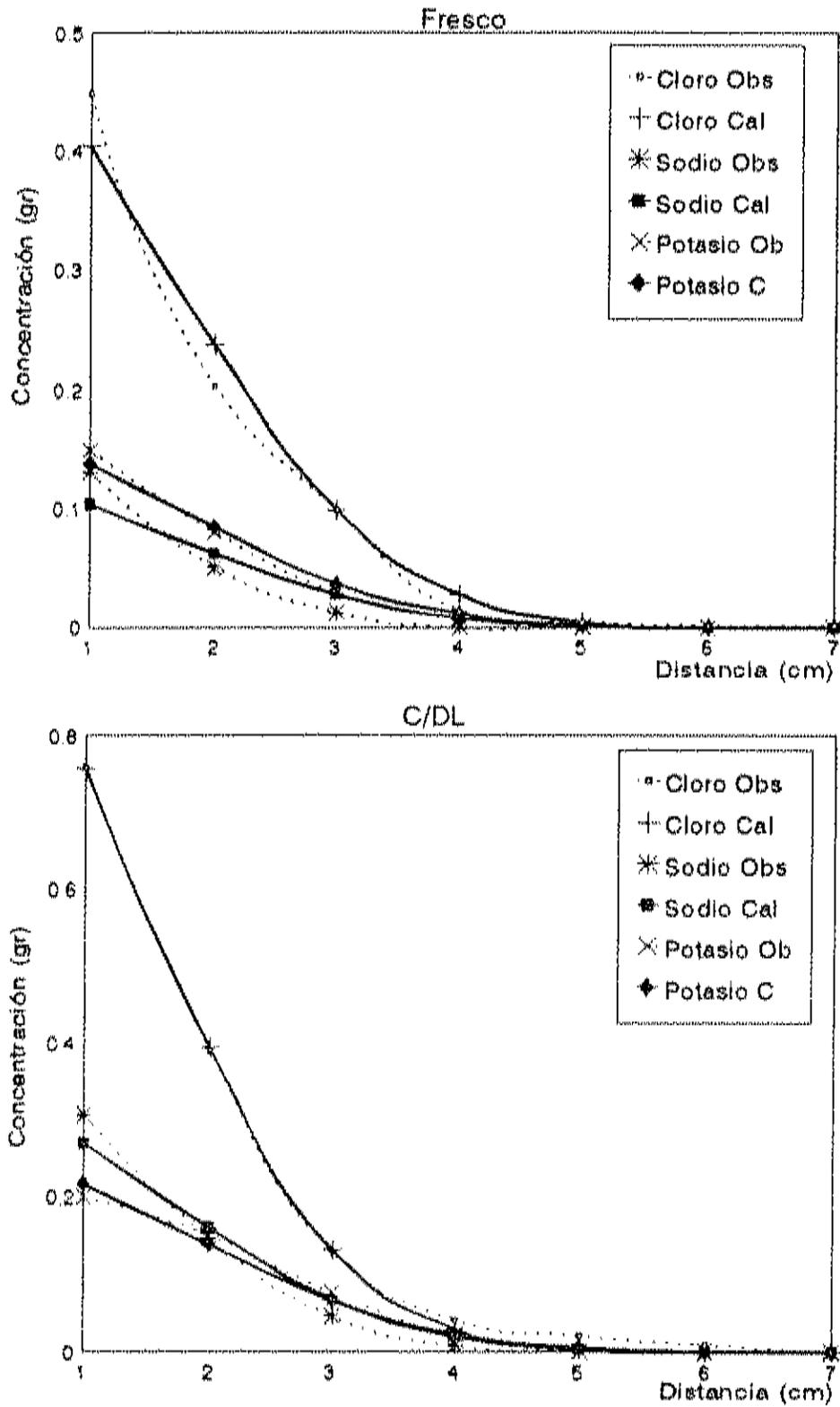


Figura 30. Perfiles de Concentración en Función de la Distancia de penetración de Iones en la Mezcla 3 para Carne de Puerco Fresca y C/DL.

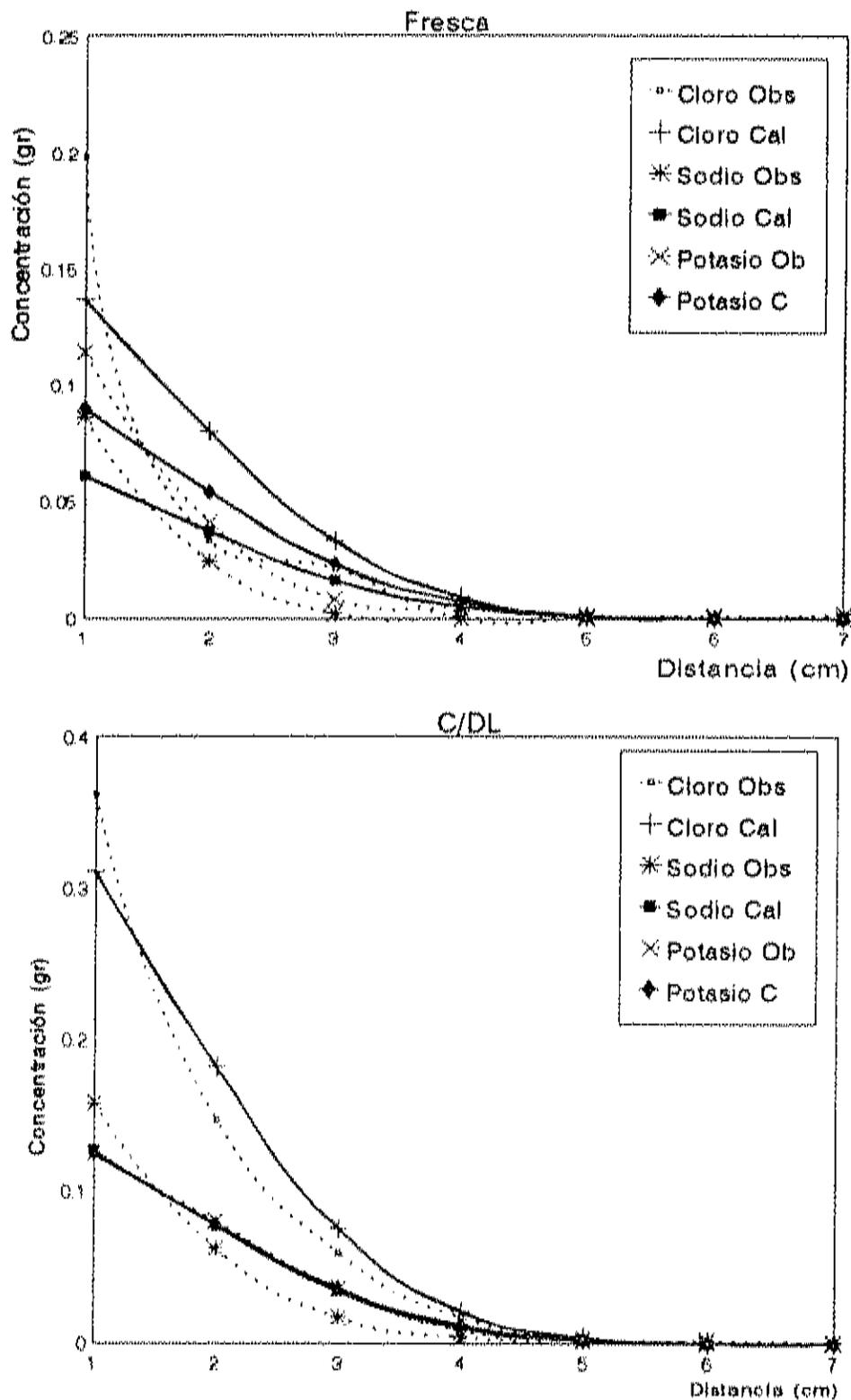


Figura 29. Perfiles de Concentración en Función de la Distancia de Penetración de iones en la Mezcla 3 para carne de Res fresca y C/DL.

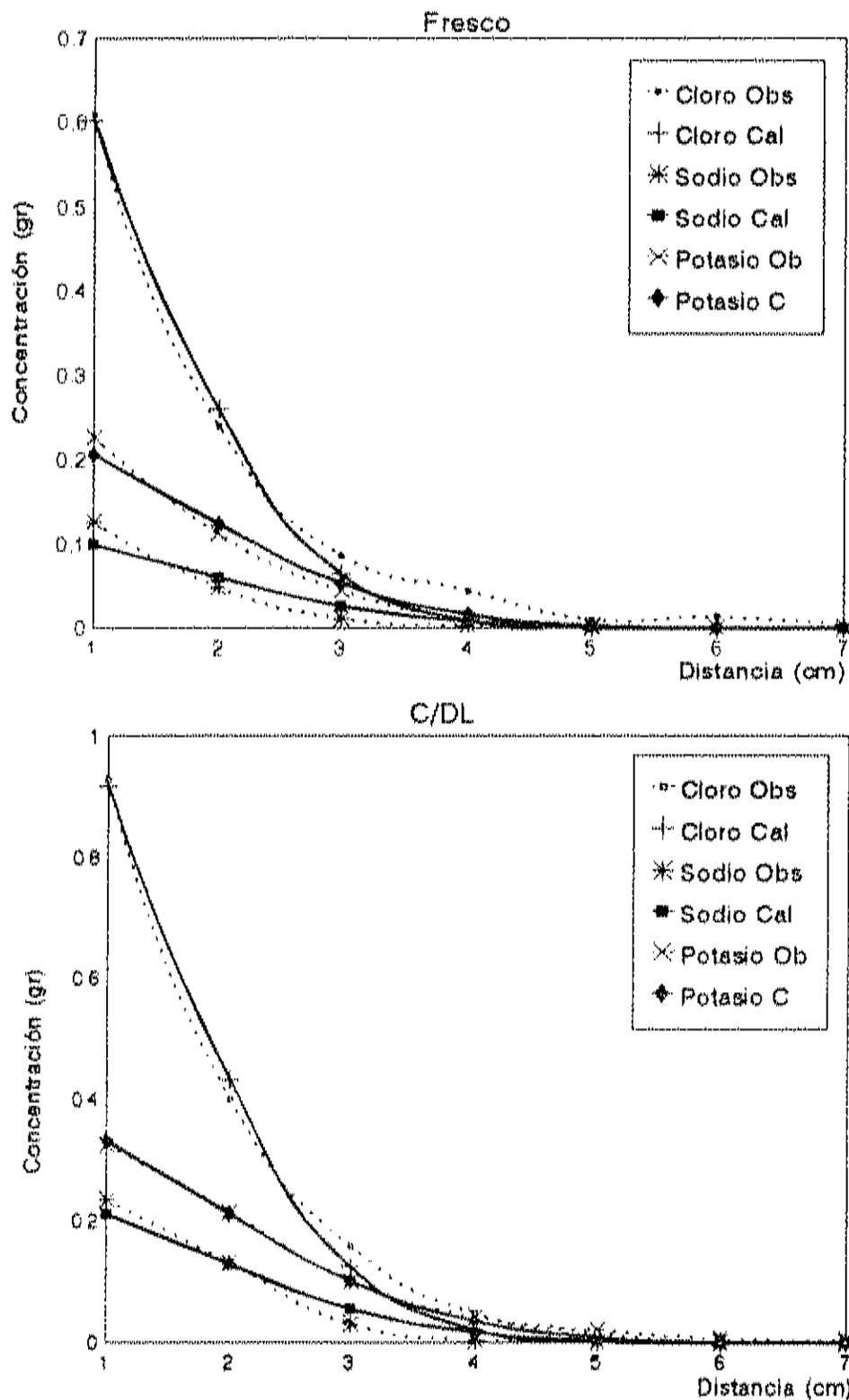


Figura 31. Perfiles de Concentración en Función de la Distancia de Penetración de Iones en la Mezcla 4 para Carne de Puerco Fresca y C/DL.

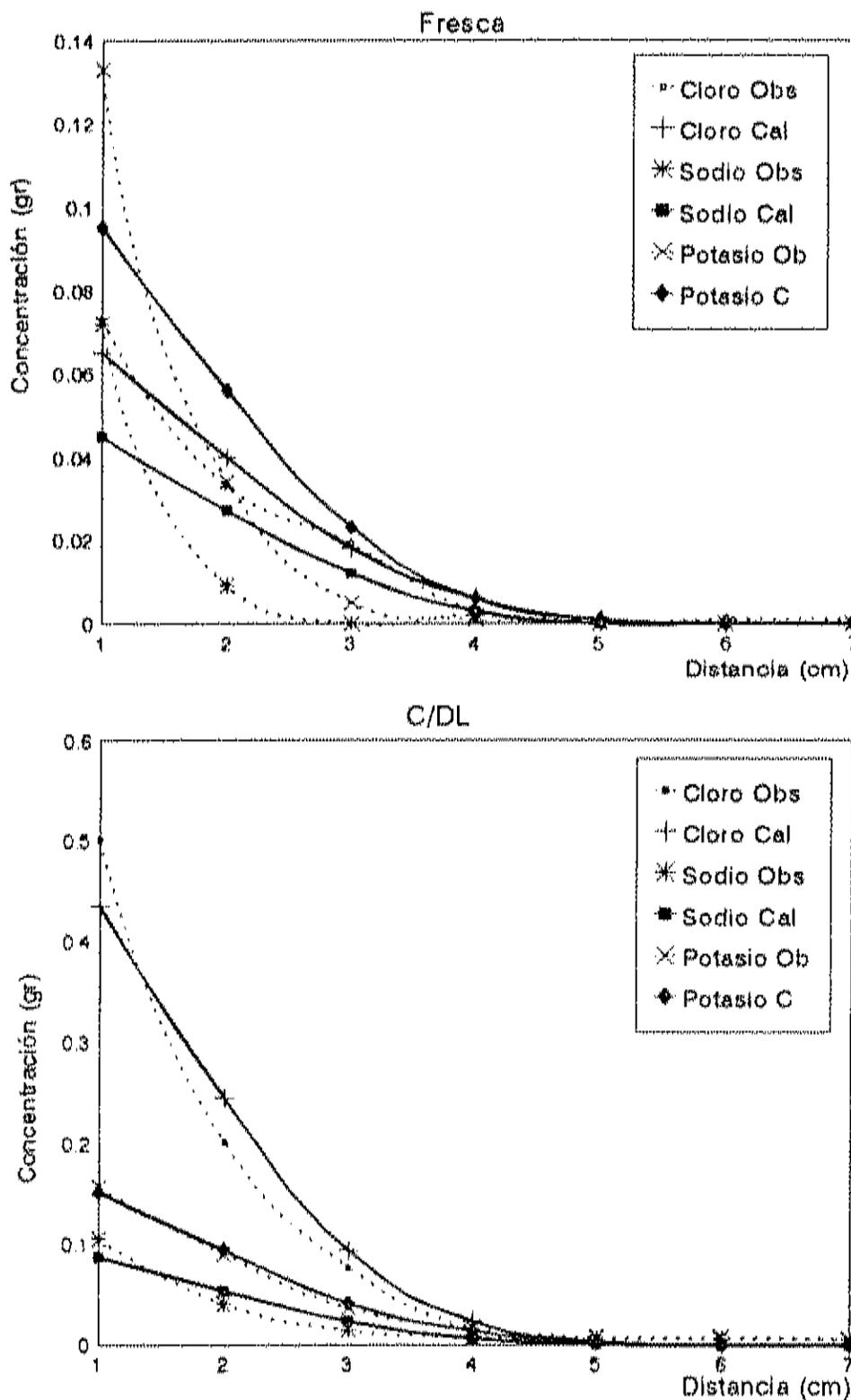


Figura 32. Perfiles de Concentración en Función de la Distancia de Penetración de Iones en la Mezcla 4 para Carne de Res Fresca y C/DL.

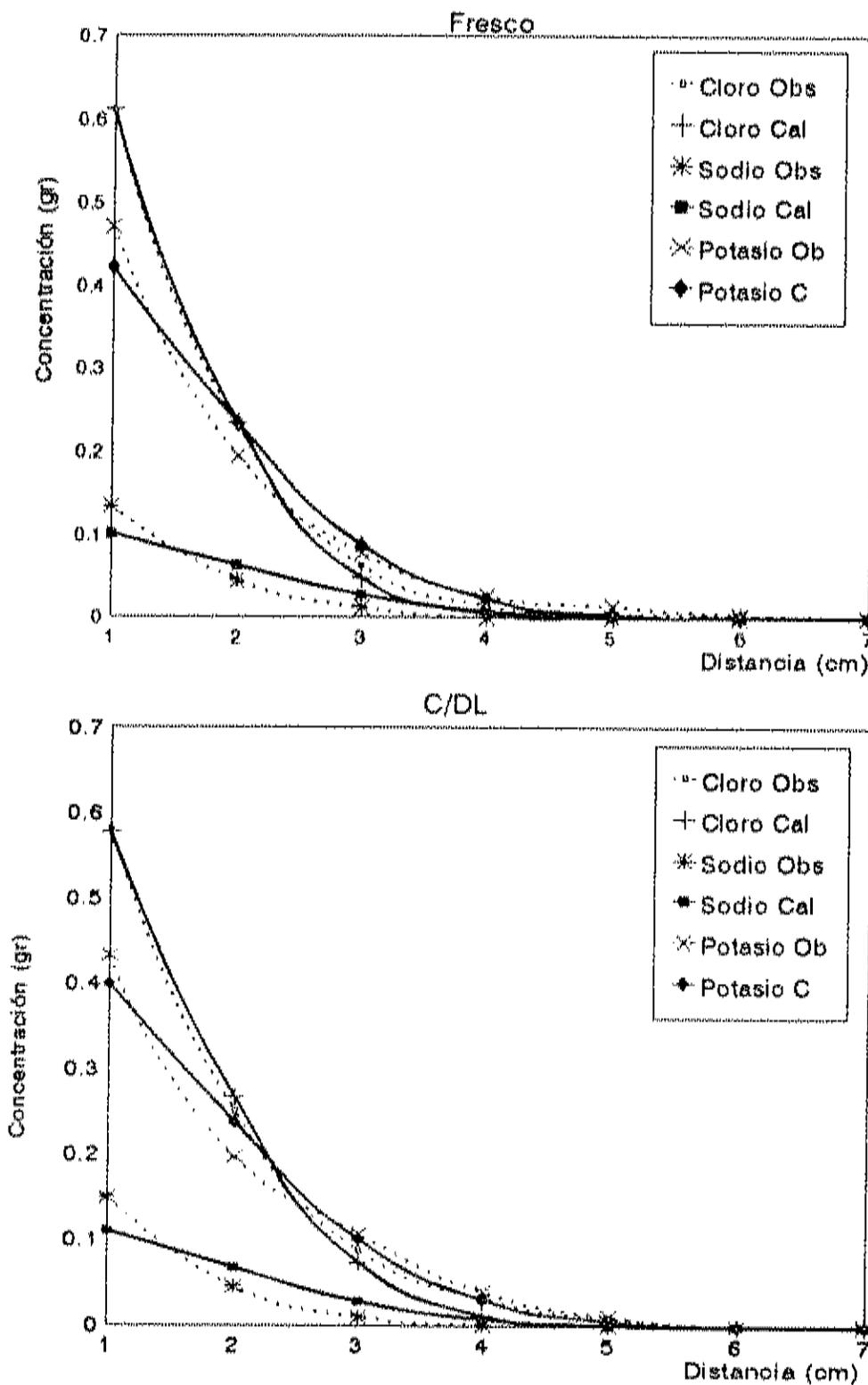


Figura 34. Perfiles de Concentración en Función de la Distancia de Penetración de los Iones en la Mezcla 5 para Carne de Puerco Fresca y C/DL.

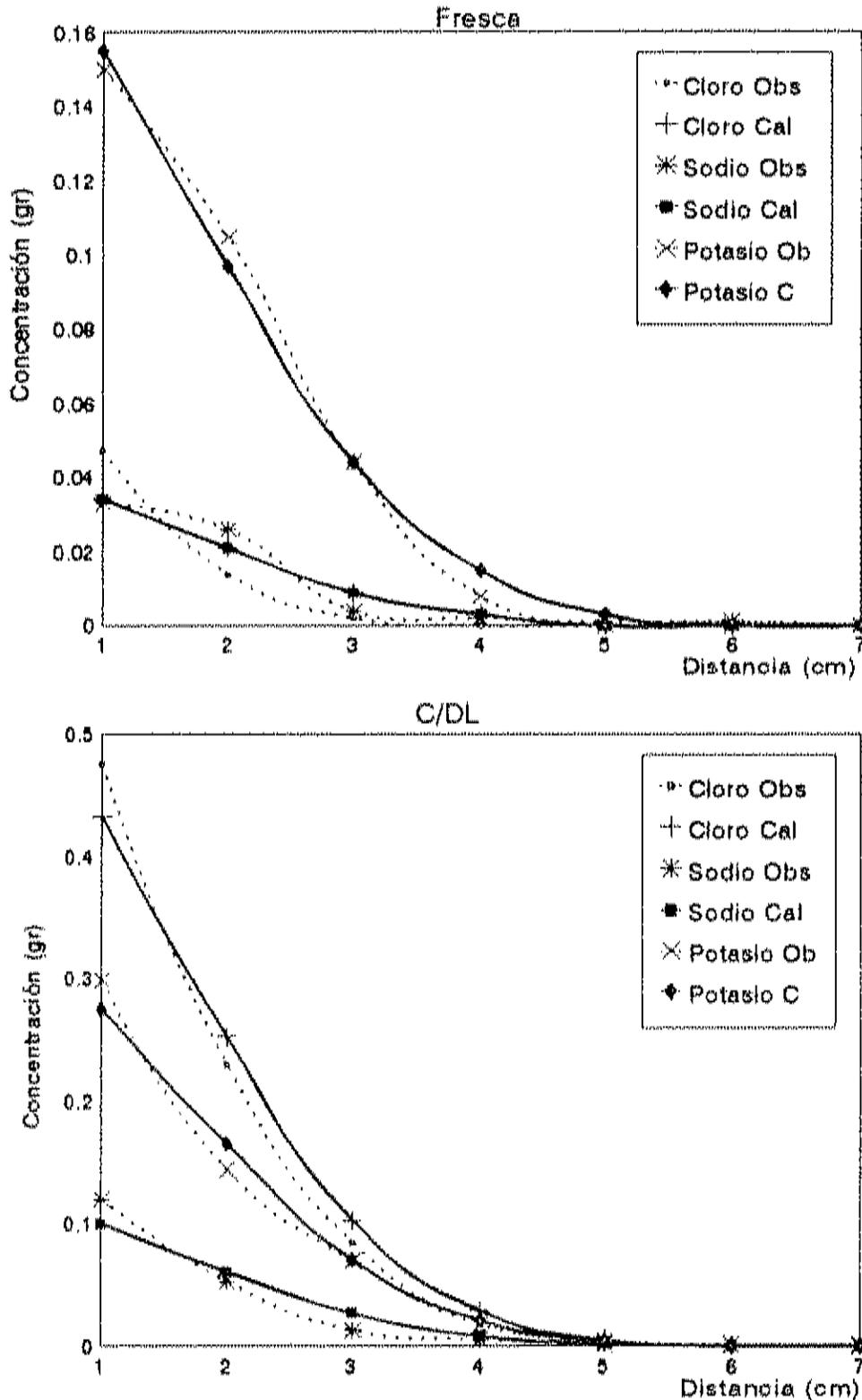


Figura 33. Perfiles de Concentración en Función de la Distancia de Penetración de Iones en la Mezcla 5 para Carne de Res Fresca y C/DL.

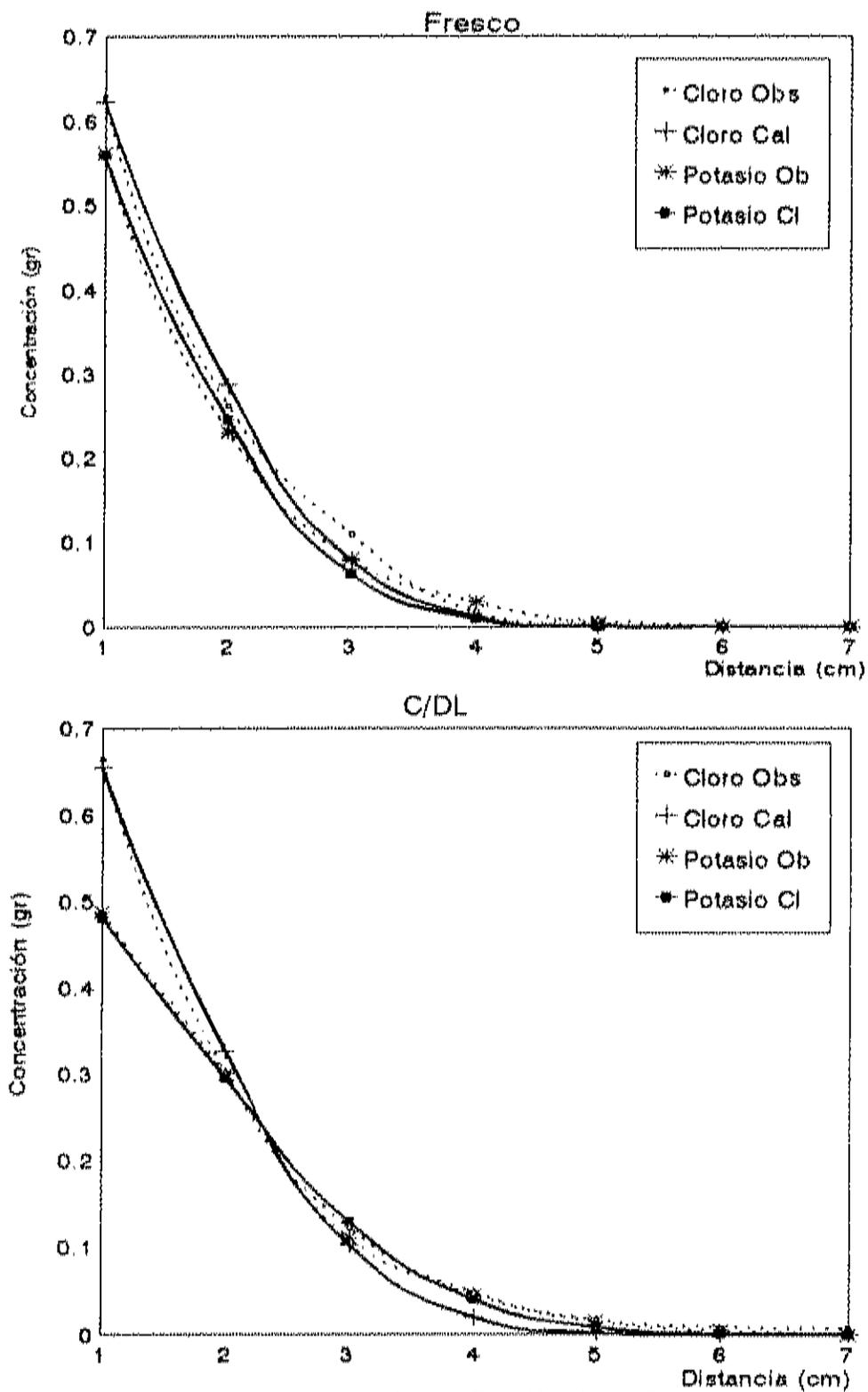


Figura 35. Perfiles de Concentración en Función de la Distancia de Penetración de Iones en la Mezcla 6 para Carne de Puerco Fresco y CD/L.

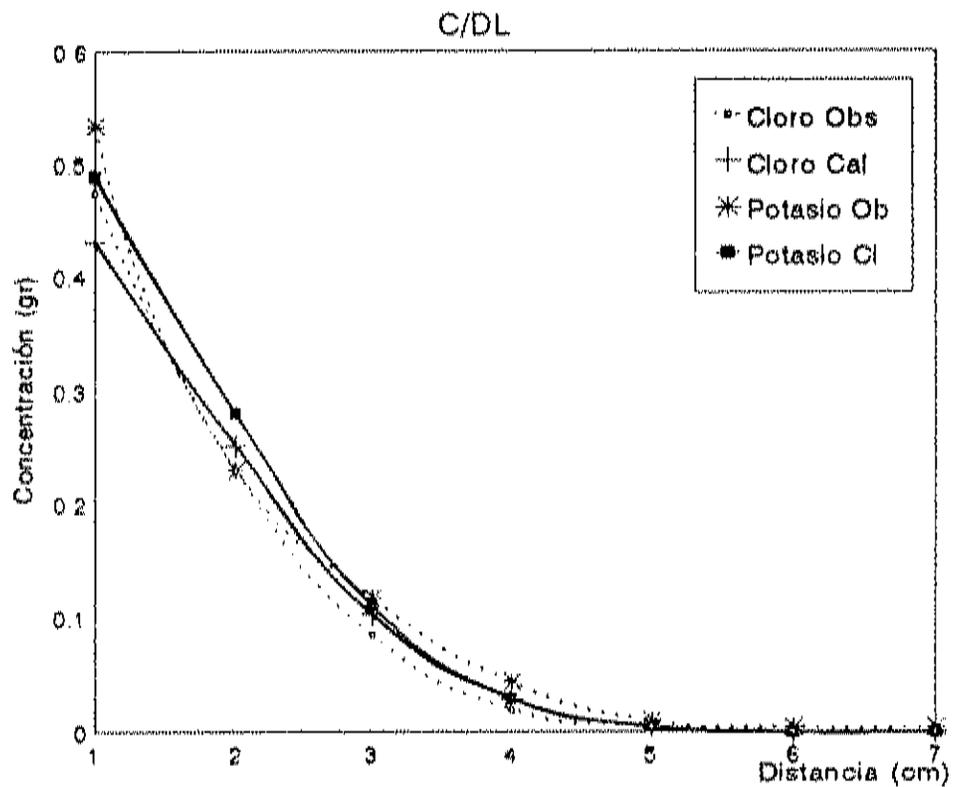
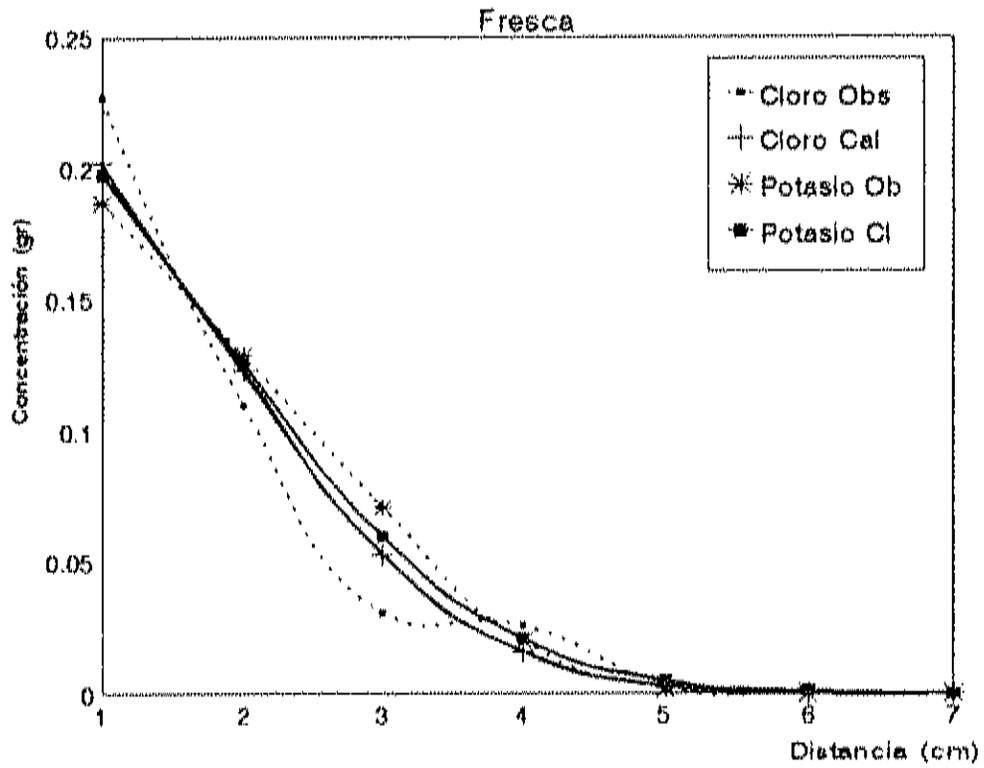


Figura 36. Perfiles de Concentración en Función de la Distancia de Penetración de Iones en la Mezcla 6 para Carne de Res Fresca y C/DL.

BIBLIOGRAFIA

- AMA (1983). "Sodium in processed foods". Amer. Medical Assoc. Council on Scientific Affairs. JAMA 249:784.
- Andres, C. (1982). "Sodium and Potassium" Ann. Rev. Nutr. 1:69.
- AOAC. (1984). "Official Methods of Analysis" 14th. Ed. Assoc. of Official Analytical Chemist, Washington, D.C.
- Aranu, J., Guerrero, L. y Gou, P. (1993). "La Calidad de la Carne para la Elaboración del Jamón Curado". Porci. Aula Veterinaria 13:55.
- Barbut, S., Findlay, C.J. (1991). "Influence of Sodium, Potassium and Magnesium Chloride on thermal properties of beef muscle". J. Food Sci. 56:180.
- Barbut, S. and Mittal, G.S. (1989). " Rheological and Gelation Properties of Reduced Salt Emulsions containing Polyphosphates". J. Food Proce. Presv. 12:309-326.
- Beaty, R. (1978). "Concepts, Instrumentation and Techniques in Atomic Absorption Spectrophotometry". Perkin Elmer Co.
- Cochran, V.G. y Cox, G.M. (1965). " Diseños Experimentales". Trillas, S.A. México.
- Crank, J. (1979). "The mathematics of diffusion". Oxford University Press, 2a. ed.
- Calvelo, A. (1981). "Recent Studies on Meat Freezing" in Developments in Meat Science -2. Lawrie, R. Ed. Applied Science Publishers. London.
- Dahl, L.K. (1972). " Salt and Hypertension". Am. J. Clin. Nutr. 25:231-234.
- Djelveh, G., Petit, M. and Gros, J.B. (1988). "Influence of Sodium Chloride Concentration, Potassium Nitrate and Temperature on the Apparent Diffusion Coefficient of Chloride Ions through Agar Gels". Lebensmittel-Wiss U.-Technol., 21, 103.
- Djelveh, G. and Gros, J.B. (1988). "Measurement of Effective Diffusivities of Ionic and Non-ionic Solutes through Beef and Pork Muscles using a Diffusion Cell". Meat Sci. 23, 11.

- Djelveh, G., Gros, J.B. and Bories, B. (1989). "An Improvement of the Cell Diffusion Method for the Rapid Determination of Diffusion Constants in Gels of Foods". *J. Food Sci.* 54,166.
- Dussap, C.G., Gros, J.B. (1979). "Diffusion-sorption model for the penetration of salt in porc and beef muscle". Second International Congress of Engineering and Food, Helsinki.
- Fox, J.B. (1980). "Diffusion of chloride, nitrite and nitrate in beef and porc". *J. Food Sci.* 45:1740.
- Fregly, M. (1983). "Estimates of Sodium and Potassium Intake". *Annals of Internal Medicine* 98 (part 2): 792-799.
- Frye, C.B., Hand, L.W., Calkins, C.R. and Mandigo, R.W. (1986). "Reduction or Replacement of Sodium Chloride in a Tumbled Ham Product". *J. Food Sci.* 51 (3):836.
- Gardenswartz, M.H. and Schrier, R.W. (1982). Renal Regulation of sodium excretion. In "Sodium: Its Biologic Significance", Ed. S. Papper, p.19. CRC Press, Boca Raton, Fla.
- Gillette, M. (1985). "Flavor effects of sodium chloride". *Food Tech.* 39 (6):47.
- González-Méndez, N.F. (1981). "Pénétration du chlorure de sodium dans la viande de porc. Influence des cycles congélation/décongélation". DEA, Université de Clermont II, Aubière, Francia.
- González-Méndez, N.F., Gros, J.B., Poma, J.P. y Ramos, E. (1985). "Influencia de la Congelación sobre la Difusión del Cloruro Sódico en el Músculo Longissimus dorsi del Puerco". *Rev. Agroquím. Tecnol. Aliment.*, 25(2):279.
- Grijalva, M.I. (1987). "Sodio, Potasio y Calcio en la Dieta Sonorense: Platillos Regionales y Dietas Convencionales". Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo. Hermosillo Sonora, México.
- Grijalva, M.I., Valencia, M.E., Wyatt, J. (1990) "Contenido de sodio, potasio y calcio en platillos típicos consumidos en Sonora, México". *Arch. Lat. de Nutr.* XL,(2). 103-292.

- Gros, J.B., Dussap, C.G., González-Méndez, N.F. (1984). "Solute diffusivities in meat - a review". En *Engineering and Food*. Volumen 1.- Engineering Sciences in the Food industry, ed. McKenna B.M., Elsevier Applied Science Publishers, 287-297.
- Haldky, S.B. (1989). "Models of Ion Permeation through Membranes" In *Ion Transport* Academic Press. Orlando Florida.
- Hamm, R. (1986). "Functional Properties of the Myofibrillar System and their Measurements" In *Muscle as Food*. Bechtel, P.J. Ed. Academic Press, Orlando Florida. p.135.
- Hand, L.W., Terrell, R.N., Smith, G.C. (1982). "Effects of complete or partial replacement of sodium chloride on processing and sensory properties of hams". *J. Food Sci.* 47:1776.
- Keeton, J.T., Foegeding, E.A. and Patana-Anake, C. (1984). "A Comparison of Nonmeat Proteins, Sodium Tripolyphosphate and Processing Temperature Effects on Physical and Sensory Properties of Frankfurters" *J. Food Sci.* 49:1462.
- Keeton, J.T. (1984). "Effects of potassium chloride on properties of Country-style hams". *J. Food Sci.* 49:146.
- Knipe, C.L., Rust, R.E., Olson, D.G. (1990). "Some physical parameters involved in the addition of inorganic phosphates to reduced-sodium meat emulsions. *J. Food Sci.* 55:23.
- Kramlich W.E., Pearson, A.M., Tauber, F.W. (1980). "Processed meats". The Avi publishing co.
- Lawrie, R.A. (1974). "Meat Science". Pergamon Press, London.
- Leak, F.W., Kemp, J.D., Lanlois, B.E. (1987). "Effects of loning time, mechanical tenderization and partial replacement of sodium chloride on the quality and microflora of boneless dry-cured hams". *J. Food Sci.* 52:263.
- Lin, G.C., Mittal, G.S. and Barbut, S. (1989). "Optimization of Tumbling and KCl Substitution in Low Sodium Restructured Hams". *J. of Muscle Foods* 2:71-91.

- Maurer, A.J. (1983). "Reduced sodium usage in poultry muscle foods". *Food Tech.* 37 (7):45.
- McCarron, D. (1984). "Calcium and magnesium nutrition in human hypertension" *Annals. Intern. Medicine.* 98.
- McCarron, D. (1985). "Is Calcium More Important than Sodium in the Pathogenesis of Essential Hypertension. *Hypertension.* 7 (4):607.
- Merle, P. (1978). "Factures de variation de la cinétique de pénétration du sel dans la viande de porc". Rapport CUST, Génie Biologique, Université de Clermont II, Aubiere, Francia.
- Mohler, K. (1982). "Ciencia y Tecnología de la Carne, Teoría y Práctica". Ed. Acribia, España.
- National Academy of Science (1989). "Recommended Dietary Allowances". 10th ed. NAS Washington D.C.
- Noller, B.N. and Bloom, H. (1978). "Method of Analysis for Major and Minor Elements in Foods". *Food Technology in Australia.* (Enero):11-23.
- Paltriner, G. y Meyer, M. (1983). "Elaboración de Productos Cárnicos". 2a. ed. Editorial Trillas. México.
- Pasin, G., O'Mahony, M., York, G. (1989). "Replacement of sodium chloride by modified potassium chloride in fresh pork sausages: acceptability testing using signal detection measures". *J. Food Sci.* 54:553.
- Pearson, A.M. and Tauber, F.W. (1984). "Processed Meats" 2a ed. Avi. New York.
- Pinedo, R., Pilkington, D., Foegeding, P.M. (1987). "KCl in dry cured hams: Effect on trichinae devitalization and chemical and physical properties". *J. Food Sci.* 52:554.
- Price, J.F. y Schweigert (1976). "Ciencia de la Carne y de los Productos Cárnicos" Ed. Acribia. España.
- Ralston, M.J. and Jennrich, R.I. (1979). "DUD a Derivative Free Algorithm for non-linear Least Squares". *Technometrics* 117:14.

- Robinson, R.A. and Stokes, R.M. (1955). "Electrolyte Solutions". Butterworth Scientific Publications, London, p.293.
- SAS (1991). User's Guide Statistic Version 6.04. Cary NC, USA.
- Sebranek, J.G., Olson, D.G., Whiting, R.C., Benedict, R.C., Rust, R.E., Kraft, A.A., Woychik, J.H. (1983). "Physiological role of dietary sodium in human health and implications of sodium reduction in muscle foods". *Food Tech.* 37 (7): 51.
- Silveira, M.I. (1993). Comunicación Personal. Departamento de Posgrado en Alimentos. Universidad de Sonora
- Soto-Pablos, E.H. (1986). "Reducción del contenido de NaCl en Productos Cárnicos Emulsificados". Tesis. Instituto Tecnológico de Sonora. Cd. Obregón Son. México.
- Sofos, J.N. (1986). "Use of Phosphates in Low-Sodium Meat Products". *Food Tech.* 40 (9): 52.
- Terrell, R.N. (1983). "Reducing the Sodium Content of Processed Meats". *Food Tech.* 37(7):66.
- Tobian, L. (1979). "Dietary Salt (Sodium) and Hypertension". *Am. J. Clin. Nutr.* 32:2739-2748.
- Valenzuela, M.M. (1993). "Estudio de la Incidencia de Puercos PSE Sacrificados en un Rastro en la Región de Hermosillo Sonora". Tesis (en prensa).
- Vollmar, E.K. and Melton, C.C. (1981). "Selected Quality Factors and Sensory Attributes of Cured Ham as Influenced by Different Phosphate Blends". *J. Food Sci.* 46:317.
- Wirth, F. (1990). "Reducción de Sal Común en los Productos Cárnicos. Posibilidades y limitaciones". *Fleischwirtsch. español* (1),46.
- Wistrieck, H.E., Morse, S.E. and Kenyon, L.J. (1959). "Curing of Ham: A Study of Sodium Chloride Accumulation. I. Methods, effects of temperature, cations, muscle and solution concentration". *Food Tech.* 13:441.

- Wistrieck, H.E., Morse, S.E. and Kenyon, L.J. (1960). "Curing of Ham: A Study of Sodium Chloride Accumulation. II. Combined effects of time, solution concentration and solution volume". *Food Tech.* 14:549.
- Wood, F.W. (1966). "The Diffusion of Salt in Pork Muscle and Fat Tissue". *J. Sci. Fd. Agric.* 17:138.
- Wyatt, J. (1984). "Dietary and Excretion Ratios of Sodium/Potassium of Normotensive Men Fed Experimental Diets. *Nutr. Reports Int.* 29 (2) :427.

- Wistrieck, H.E., Morse, S.E. and Kenyon, L.J. (1960). "Curing of Ham: A Study of Sodium Chloride Accumulation. II. Combined effects of time, solution concentration and solution volume". *Food Tech.* 14:549.
- Wood, F.W. (1966). "The Diffusion of Salt in Pork Muscle and Fat Tissue". *J. Sci. Fd. Agric.* 17:138.
- Wyatt, J. (1984). "Dietary and Excretion Rations of Sodium/Potassium of Normotensive Men Fed Experimental Diets. *Nutr. Reports Int.* 29 (2) :427.