

## RESUMEN

Aún después de que se lleva a cabo la cosecha de los frutos las reacciones bioquímicas continúan. Reacciones tales como la respiración, conversión de almidones en azúcares, aumento y disminución de pigmentos y aromas, así como también el incremento del pH, conducen a procesos deseables e indeseables de la maduración. La respiración produce dióxido de carbono, agua y calor, partiendo del consumo de oxígeno. Esta bioreacción se ve claramente afectada por las condiciones de almacenamiento como la temperatura y la humedad.

Este trabajo tuvo como objetivo diseñar, construir un prototipo de respirómetro de circulación continua de aire y así mismo, verificar el método adecuado para confirmar la velocidad de respiración de frutos climatéricos y no climatéricos. Durante el desarrollo de las pruebas se calculó los coeficientes de transferencia de masa, la velocidad de absorción a la temperatura de experimentación y otros factores que influyen en la solubilidad del dióxido de carbono en la solución alcalina.

El diseño propuesto fue un sistema continuo de circulación de aire, el cual alimentó un envase que contenía almacenada la fruta en condiciones controladas. El aire de salida estaba compuesto por gases volátiles y

dióxido de carbono producidos durante la respiración, este último fue retenido en un recipiente con solución de fosfato monosódico que por medio de una serie de reacciones químicas transformó el CO<sub>2</sub> gaseoso en ácido carbónico solubilizándolo y fijándolo. Luego por medio de una titulación se determinó la cantidad de dióxido de carbono presente en la muestra.

Así se obtuvo un método fácil de usar, confiable y validado según referencia técnica obtenida para los frutos de experimentación. Los resultados obtenidos con el prototipo servirán como información indispensable para el estudio postcosecha de frutos ecuatorianos no tradicionales, de las cuales existe poca información sobre su tasa de respiración.

## ÍNDICE GENERAL

|   | Pág. |
|---|------|
| <b>RESUMEN.....</b>   | I    |
| <b>ÍNDICE GENERAL.....</b>                                  | III  |
| <b>INTRODUCCIÓN.....</b>                                    | VII  |
| <b>ABREVIATURAS.....</b>                                    | IX   |
| <b>SIMBOLOGÍA.....</b>                                      | XII  |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>                               | XVII |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>                                | XIX  |
| <b>ÍNDICE DE PLANOS.....</b>                                | XXII |
| <br>  |      |
| <b>CAPÍTULO 1.....</b>                                      | 1    |
| <b>1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....</b>                       | 1    |
| <b>1.1 Procesos metabólicos en frutas y hortalizas.....</b> | 1    |
| <b>1.1.1. Factores químicos y bioquímicos.....</b>          | 4    |
| <b>1.1.2. Acción de los microorganismos.....</b>            | 9    |
| <b>1.2. Causas del deterioro de las frutas.....</b>         | 11   |
| <b>1.2.1. Procesos puramente físicos.....</b>               | 11   |
| <b>1.2.2. Influencia de la temperatura .....</b>            | 13   |

|   |           |
|---|-----------|
| 1.2.3. Procesos bioquímicos y microbiológicos.....                                | 16        |
| 1.3. Métodos para cuantificar la respiración de las frutas.....                   | 18        |
| 1.3.1. Formación del ácido carbónico.....   | 20        |
| 1.3.2. Métodos electrónicos para cuantificar el CO <sub>2</sub> .....             | 21        |
| 1.3.3. Cuantificación del calor emitido durante la respiración...                 | 32        |
| 1.4. Fenómenos de transferencia de masa durante la respiración de<br>frutas.....  | 34        |
| 1.4.1. Reacción química entre el fosfato disódico y el dióxido de<br>carbono..... | 34        |
| 1.4.2. Aplicación de la ley de Henry.....   | 36        |
| 1.4.3. Transferencia de masa local y global entre las fases<br>gas/liquido.....   | 41        |
| 1.5. Objetivos del estudio.....   | 44        |
| 1.5.1. Descripción del Problema.....  | 44        |
| 1.5.2. Objetivos Generales.....   | 45        |
| 1.5.3. Objetivos Específicos.....   | 45        |
| <b>CAPÍTULO 2.....</b>  | <b>47</b> |
| <b>2. METODOLOGÍA, MATERIALES Y EQUIPOS.....</b>                                  | <b>47</b> |
| 2.1. Diseño del Prototipo.....  | 47        |
| 2.1.1. Fundamentos del método de Trabajo.....                                     | 48        |
| 2.1.2. Lay out del prototipo.....   | 48        |

|   |    |
|---|----|
| <b>2.1.3.</b> Componentes del sistema.....  | 51 |
| <b>2.2.</b> Especificación de las frutas utilizadas en el prototipo.....                                  | 52 |
| <b>2.3.</b> Operación del prototipo.....  | 53 |
| <b>2.3.1.</b> Limitantes relacionadas a la absorción del dióxido de carbono por parte de la solución..... | 54 |
| <b>2.3.2.</b> Cálculo del rendimiento de absorción con respecto al método teórico.....                    | 55 |
| <b>2.3.3.</b> Preparación de reactivos.....   | 55 |
| <b>2.4.</b> Procedimiento de operación del sistema.....   | 56 |
| <b>2.5.</b> Pruebas Experimentales.....   | 58 |
| <b>2.5.1.</b> Diseño de experimentos.....   | 58 |
| <b>2.5.2.</b> Pruebas en frutas climatéricas.....   | 60 |
| <b>2.5.3.</b> Pruebas en frutas no climatéricas.....  | 61 |
| <b>2.6.</b> Metodología de validación de resultados.....  | 61 |
| <b>2.6.1.</b> Cálculo del análisis de varianza.....   | 61 |
| <b>2.6.2.</b> Cálculo del análisis de regresión.....  | 65 |
| <b>2.7.</b> Fenómenos de transferencia de calor y masa.....   | 67 |
| <b>2.7.1.</b> Cálculo los coeficientes de transferencia de masa.....                                      | 67 |
| <b>2.7.2.</b> Cálculo la difusividad del CO <sub>2</sub> en el aire.....                                  | 71 |
| <b>2.7.3.</b> Cálculo del balance termodinámico del paso del aire.....                                    | 72 |
| <b>2.8.</b> Cálculo de iones presentes en solución.....   | 75 |

|   |            |
|---|------------|
| <b>CAPÍTULO 3.....</b>  | <b>80</b>  |
| <b>3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>   | <b>80</b>  |
| <b>3.1. Relacionados al diseño del prototipo.....</b>   | <b>80</b>  |
| <b>3.1.1. Especificación de la materia prima a ser utilizada en el<br/>            prototipo.....</b>             | <b>86</b>  |
| <b>3.1.2. Rendimiento de absorción con respecto al método<br/>            teórico.....</b>                        | <b>93</b>  |
| <b>3.2. Pruebas experimentales.....</b>   | <b>96</b>  |
| <b>3.2.1. Análisis de regresión de la concentración de CO<sub>2</sub> versus<br/>            temperatura.....</b> | <b>97</b>  |
| <b>3.2.2. Resultados del análisis de varianza de los experimentos</b>   | <b>104</b> |
| <b>3.2.3. Validación de resultados.....</b>   | <b>110</b> |
| <b>3.3. Resultados de los fenómenos de transferencia de calor y<br/>            masa.....</b>                     | <b>111</b> |
| <b>3.3.1. Coeficientes de transferencia de masa local y global.....</b>   | <b>112</b> |
| <b>3.3.2. Difusividad del CO<sub>2</sub> en el aire.....</b>  | <b>113</b> |
| <b>3.3.3. Balance termodinámico del respirómetro.....</b>   | <b>115</b> |
| <br>  |            |
| <b>CAPÍTULO 4.....</b>  | <b>122</b> |
| <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>  | <b>122</b> |
| <b>APÉNDICES</b>  |            |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>   |            |

## INTRODUCCIÓN

El realizar investigaciones sobre la respiración de los frutos ecuatorianos no tradicionales aportará a evitar pérdidas económicas relacionadas con la conservación de los frutos a diferentes temperaturas. Actualmente existen instrumentos para determinar las cantidades de dióxido de carbono producido por frutas y hortalizas, pero estos son de un costo elevado, por lo tanto es necesario realizar investigaciones para encontrar nuevos métodos que ayuden a determinar la producción de  $\text{CO}_2$ , de manera confiable y económica. Estudios anteriores como los llevados a cabo por Warburg en el año de 1926, utilizaron un sistema cerrado, y posteriormente se llevaron a cabo estudios con respirómetros de flujo continuo absorbiendo al dióxido de carbono con hidróxido de sodio, debido a su fuerte alcalinidad. Este método se conoce como alcalímetro y posteriormente se realiza una titulación para determinar la cantidad presente de dióxido de carbono en la alícuota. En este estudio se reemplaza el hidróxido de sodio por una solución de fosfato monosódico que pueda absorber el dióxido de carbono generado por frutas y hortalizas, con un buen rendimiento. A partir de la experimentación con dos concentraciones 0.023 N y 0.043 N de fosfato monosódico, considerando las distintas reacciones que se llevan a cabo para su absorción, la primera reacción fue con hidróxido de sodio en la

primera titulación para obtener fosfato disódico el cual reacciona con dióxido de carbono para formar el carbonato ácido de sodio y regenerar al fosfato monosódico, y de esta forma cuantificar el dióxido de carbono presente.

## ABREVIATURAS

|                        |                                      |
|------------------------|--------------------------------------|
| <b>g/ml</b>            | gramos/ mililitro                    |
| <b>lt</b>              | litro                                |
| <b>psi<sub>g</sub></b> | libras /pulgada cuadrada manométrica |
| <b>psi<sub>a</sub></b> | libras /pulgada cuadrada absoluta    |
| <b>Pa</b>              | Pascales                             |
| <b>m<sup>3</sup></b>   | metros cúbicos                       |
| <b>m</b>               | metros lineales                      |
| <b>kW</b>              | kiloWattios                          |
| <b>s</b>               | segundos                             |
| <b>kg</b>              | kilogramo                            |
| <b>g</b>               | gramo                                |
| <b>db</b>              | decibeles                            |
| <b>kcal</b>            | kilo calorías                        |
| <b>ph</b>              | potencial de hidrógeno               |
| <b>°T</b>              | temperatura                          |
| <b>CR</b>              | coeficiente respiratorio             |
| <b>F°</b>              | energía                              |
| <b>K<sub>2</sub></b>   | velocidad a la temperatura dos       |
| <b>K<sub>1</sub></b>   | velocidad a la temperatura uno       |
| <b>N</b>               | solución normal                      |
| <b>M</b>               | solución molar                       |
| <b>IR</b>              | La espectroscopía infrarroja         |
| <b>X</b>               | rayos x                              |
| <b>x</b>               | dimensión en el eje de las x         |
| <b>y</b>               | dimensión en el eje de las y         |
| <b>z</b>               | dimensión en el eje de las z         |
| <b>t</b>               | tiempo                               |
| <b>a</b>               | constante                            |
| <b>b</b>               | constante                            |
| <b>k<sub>L</sub></b>   | coeficiente de transferencia de masa |

|                    |  |
|--------------------|--|
| $X_{bm}$           | concentración  |
| $Sh_L$             | número de Sherwood en el líquido                     |
| $Fl$               | coeficiente de transferencia de masa en el líquido   |
| $dp$               | diámetro de la partícula                             |
| $Re_G$             | número de Reynolds en el gas                         |
| $Sc_L$             | número de Schmit en el líquido                       |
| $k_L$              | $\text{kmol/m}^2\cdot\text{s}$ ( $\text{kmol/m}^3$ ) |
| $V_s$              | velocidad del gas                                    |
| $^{\circ}\text{C}$ | grados centígrados                                   |
| $i$                | íésima observación                                   |
| $j$                | jotaésima observación                                |
| $r$                | erésima observación                                  |
| $[A]$              | factor A   |
| $[AB]$             | interacción de los factores A y B                    |
| $[B]$              | factor B   |
| $\text{mg}$        | miligramos   |
| $W$                | Wattios  |
| $D$                | diámetro   |
| $L$                | longitud   |
| $\epsilon$         | porosidad  |
| $v$                | velocidad media del flujo                            |
| $\text{atm}$       | atmósferas   |
| $h$                | coeficiente de transferencia de calor por convección |
| $Q$                | calor  |
| $A$                | área   |
| $\tilde{n}$        | número de frutas en el arreglo                       |
| $\text{ac}$        | solución acuosa                                      |
| $\text{OH}^-$      | radical oxidrilo                                     |
| $\text{mm}$        | milímetros   |
| $^{\circ}\text{F}$ | grados Fahrenheit                                    |
| $\mu\text{l}$      | microlitro   |
| $s$                | unidad de tiempo segundo                             |
| $D_r$              | diámetro del reactor                                 |
| $V_g$              | velocidad del gas                                    |
| $S$                | solubilidad  |
| $\text{cc}$        | concentración  |

|                          |  |
|--------------------------|--|
| <b>Ref.</b>              | refrigeración                            |
| <b>Amb.</b>              | ambiente                                 |
| <b>Sol.</b>              | solución                                 |
| <b>Prod.</b>             | producción                               |
| <b>Cond.</b>             | condición                                |
| <b>Exp.</b>              | experimental                             |
| <b>ppm</b>               | partes por millón                        |
| <b>DF</b>                | grados de libertad                       |
| <b>SS</b>                | suma de los cuadrados                    |
| <b>MS</b>                | media cuadrática                         |
| <b>F</b>                 | estadística F                            |
| <b>P</b>                 | probabilidad P                           |
| <b>Trat</b>              | tratamientos                             |
| <b>Desv</b>              | desviación                               |
| <b>Est.</b>              | estándar                                 |
| <b>X<sub>a</sub></b>     | concentración CO <sub>2</sub> en el agua |
| <b>Y<sub>a</sub></b>     | concentración CO <sub>2</sub> en el aire |
| <b>n</b>                 | número de réplicas del estudio           |
| <b>n<sub>1</sub></b>     | tamaño de la muestra                     |
| <b>lb/in<sup>2</sup></b> | libras/pulgada cuadrada                  |
| <b>mg</b>                | miligramos                               |
| <b>min</b>               | minutos                                  |
| <b>cm</b>                | centímetro                               |
| <b>ESI</b>               | electrodo selectivo de iones             |

## SIMBOLOGÍA

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| $\text{CO}_2$                       | dióxido de carbono                          |
| $\text{O}_2$                        | oxígeno                                     |
| $\text{H}_2\text{O}$                | agua  |
| $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ | glucosa                                     |
| $\text{CH}_3\text{COCOOH}$          | ácido acético                               |
| $\text{CH}_3\text{COCOO}^-$         | radical acetato acético                     |
| $\text{NAD}^+$                      | nicotin adenín dinucleótido reducido        |
| $\text{NAD}^{+*}$                   | nicotín adenín dinucleótido reducido        |
| $2\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$     | ácido Láctico                               |
| $\text{H}_2\text{CO}_3$             | ácido carbónico                             |
| $\text{H}^+$                        | hidrógeno ionizado                          |
| $\text{HCO}_3^-$                    | radical carbonato                           |
| $\text{CO}_3^{-2}$                  | segunda ionización del carbonato            |
| $\text{C-O}$                        | enlace entre el oxígeno y el carbono        |
| $E$                                 | energía                                     |
| $\delta/\delta X$                   | derivada parcial con respecto a x           |
| $\delta/\delta Y$                   | derivada parcial con respecto a y           |
| $q^*$                               | razón de conversión de la energía interna   |
| $\rho$                              | densidad                                    |
| $C_p$                               | calor específico                            |
| $\delta t/ \delta x$                | derivada parcial de la temperatura / tiempo |
| $K$                                 | conductividad térmica                       |
| $\Delta t/\delta y$                 | derivada parcial de la temperatura / eje y  |
| $\delta T/\delta X$                 | derivada parcial de la temperatura / eje x  |
| $\delta T/\delta z$                 | derivada parcial de la temperatura / eje z  |
| $\alpha$                            | difusividad térmica                         |
| $\text{HCl}$                        | ácido clorhídrico                           |
| $\text{Na}_2\text{CO}_3$            | carbonato de sodio                          |

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| <b>Na(OH)</b>                        | hidróxido de sodio                                |
| <b>NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub></b> | fosfato monobásico de sodio                       |
| <b>Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub></b> | fosfato dibásico de sodio                         |
| <b>NaOH</b>                          | hidróxido de sodio                                |
| <b>NaHCO<sub>3</sub></b>             | carbonato monobásico de sodio                     |
| <b>y<sup>*</sup></b>                 | concentración molar en el equilibrio del gas      |
| <b>p<sup>*</sup></b>                 | concentración en el equilibrio de la presión      |
| <b>p<sub>t</sub></b>                 | presión total                                     |
| <b>m</b>                             | pendiente (constante)                             |
| <b>NAD</b>                           | nicotín adenín dinucleótido                       |
| <b>ADP</b>                           | adenosín difosfato                                |
| <b>NADH</b>                          | nicotín adenin dinucleótido hidrogenado           |
| <b>FAD</b>                           | flavín adenín dinucleótido                        |
| <b>FADH<sub>2</sub></b>              | flavín adenin dinucleótido protonizado            |
| <b>CoA</b>                           | coenzima A  |
| <b>TPP</b>                           | trifosfato de adenosina                           |
| <b>GDP</b>                           | guanosina difosfato                               |
| <b>GTP</b>                           | guanosina trifosfato                              |
| <b>Q<sub>10</sub></b>                | cociente diez                                     |
| <b>H</b>                             | hidrógeno   |
| <b>ATP</b>                           | adenosín trifosfato                               |
| <b>μ<sub>L</sub></b>                 | viscosidad del líquido                            |
| <b>φ</b>                             | retención del gas                                 |
| <b>V<sub>t</sub></b>                 | velocidad terminal                                |
| <b>σ</b>                             | tensión superficial                               |
| <b>BaCl</b>                          | cloruro de bario                                  |
| <b>BaCO<sub>3</sub></b>              | carbonato de bario                                |
| <b>&gt;</b>                          | mayor que   |
| <b>2<sup>k</sup></b>                 | diseño de experimentos                            |
| <b>ε<sub>ijkl</sub></b>              | residuales  |
| <b>μ</b>                             | media   |
| <b>α<sub>i</sub></b>                 | efecto en el nivel uno                            |
| <b>B<sub>j</sub></b>                 | efecto en el nivel jotaésimo                      |
| <b>2<sup>n</sup></b>                 | experimentos factoriales base dos elevados a la n |
| <b>T<sub>i</sub></b>                 | totales iésimos                                   |

|                   |   |
|-------------------|---|
| $T_{ij}$          | totales iésimos y jotaésimos  |
| $\epsilon_A$      | estimación de las desviaciones en el factor A.                                  |
| $\epsilon_{ijkl}$ | estimación de las desviaciones en el nivel iésimo hasta enésimo                 |
| $\sigma^2$        | varianza  |
| $y_i$             | valores iésimos de la concentración de CO <sub>2</sub> producido por las frutas |
| $x_i y_i$         | interacción entre las temperaturas y el CO <sub>2</sub> producido               |
| $x_i^2$           | cuadrado de las temperaturas de las pruebas                                     |
| $i$               | constante del gas ideal   |
| $q$               | igualdad con la constante del gas ideal   |
| $c_v$             | calor específico a volumen constante  |
| $c_p$             | calor específico a presión constante  |
| $\Delta P$        | diferencial de presión  |
| $S_1$             | distancia entre las frutas en el arreglo  |
| $H_2PO_4^-$       | primera disociación del ácido fosfórico   |
| $HPO_4^{2-}$      | segunda disociación del ácido fosfórico   |
| $K_{II}$          | segunda constante de disociación  |
| $NaH_2 PO_4$      | fosfato monobásico de sodio   |
| $H_3PO_4$         | ácido fosfórico   |
| $K_H$             | constante de hidrólisis   |
| $K_A$             | constante de ionización del agua  |
| $K_I$             | constante de ionización número uno  |
| $PO_4^{3-}$       | tercera disociación del ácido fosfórico   |
| $k_{III}$         | constante de ionización número tres   |
| (+/-)             | puede adoptar tanto valores positivos como negativos                            |
| %                 | porcentaje  |
| $\pi$             | constante pi=3.1416   |
| $\omega_o$        | flujo másico  |
| $d_p$             | diámetro de la burbuja a la presión promedio de la columna                      |
| $\varphi_G$       | retención del gas   |
| $D_{ab}$          | difusividad cm <sup>2</sup> /s  |

|                        |  |
|------------------------|--|
| $r_{ab}$               | separación entre moléculas a y b             |
| $M_a$                  | peso molecular de a                          |
| $M_b$                  | peso molecular de b                          |
| $\epsilon_{ab}$        | energía de activación                        |
| $k$                    | constante de Boltzmann                       |
| <b>GTP</b>             | trifosfato de guanosina                      |
| $k$                    | número de bloques entre experimentos         |
| <b>SST</b>             | suma de los cuadrados de los totales         |
| <b>C</b>               | término correctivo                           |
| <b>SST<sub>r</sub></b> | suma de los cuadrados de los tratamientos    |
| <b>SSE</b>             | suma de los cuadrados de los errores         |
| $v$                    | difusividad térmica                          |
| $f(kT/\epsilon_{ab})$  | función de choque                            |
| <b>T</b>               | suma de los resultados de los experimentos   |
| $y^{\wedge}$           | estimado de concentración de CO <sub>2</sub> |
| $D_r$                  | diámetro del reactor                         |
| $c$                    | concentración molar / m <sup>3</sup>         |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   | Pág |
|---|-----|
| <b>FIGURA 1.1.-</b> Cambios sufridos por la respiración y el crecimiento durante el desarrollo de las frutas..... | 2   |
| <b>FIGURA 1.2.-</b> Cambios respiratorios en algunas frutas climatéricas...                                       | 3   |
| <b>FIGURA 1.3.-.</b> Cambios fisicoquímicos sufridos por el tomate durante la maduración organoléptica.....       | 4   |
| <b>FIGURA 1.4.-</b> Reacción global de la glucólisis.....   | 7   |
| <b>FIGURA 1.5.-</b> Ciclo de Krebs.....   | 8   |
| <b>FIGURA 1.6.-</b> Fresas atacadas por mohos.....  | 11  |
| <b>FIGURA 1.7.-</b> Efecto de la temperatura sobre el almacenamiento de peras y manzanas.....                     | 14  |
| <b>FIGURA 1.8.-</b> Desórdenes fisiológicos presentados en las manzanas por las bajas temperaturas.....           | 16  |
| <b>FIGURA 1.9.-</b> Métodos utilizados para la determinación del CO <sub>2</sub> producido por frutos.....        | 20  |

|  |     |
|--|-----|
| <b>FIGURA 2.1.-</b> Diseño del prototipo.....  | 49  |
| <b>FIGURA 2.2.-</b> Gráfico de la velocidad de deslizamiento en tanques de burbujeo.....   | 69  |
| <b>FIGURA 2.3.-</b> Tabla de las difusividades de solutos en el agua.....  | 70  |
| <b>FIGURA 3.1.-</b> Estados de madurez del banano.....   | 87  |
| <b>FIGURA 3.2.-</b> Mandarina en estado de inmadurez, con que se realizaron los experimentos.....  | 90  |
| <b>FIGURA 3.3.-</b> Gráfico de dispersión de la temperatura ( $^{\circ}$ C) versus la producción de $\text{CO}_2$ (mg/kg h) para el banano.....    | 98  |
| <b>FIGURA 3.4.-</b> Gráfico de dispersión de la temperatura ( $^{\circ}$ C) versus la producción de $\text{CO}_2$ (mg/kg h) para la mandarina..... | 98  |
| <b>FIGURA 3.5.-</b> Función de la producción de $\text{CO}_2$ (mg/ kg h) versus temperatura ( $^{\circ}$ C) para el banano.....                    | 99  |
| <b>FIGURA 3.6.-</b> Función de la producción de $\text{CO}_2$ (mg/ kg h) versus temperatura ( $^{\circ}$ C) para la mandarina.....                 | 102 |
| <b>FIGURA 3.7.-</b> Gráfico de la frecuencia de los residuales de los experimentos.....  | 107 |
| <b>FIGURA 3.8.-</b> Gráfico de la probabilidad normal de los residuales de los experimentos.....   | 108 |
| <b>FIGURA 3.9.-</b> Gráfico de la variabilidad de los residuales.....  | 109 |
| <b>FIGURA 3.10.-</b> Gráfico de los residuales de los experimentos versus  | 110 |

|   |     |
|---|-----|
| el orden de los datos.....  |     |
| <b>FIGURA 3.11.-</b> Condiciones del compresor.....   | 116 |
| <b>FIGURA 3.12.-</b> Condiciones del captador de humedad.....   | 117 |
| <b>FIGURA 3.13.-</b> Condiciones del respirómetro a temperatura ambiente  | 118 |
| <b>FIGURA 3.14.-</b> Condiciones del respirómetro a temperatura<br>refrigeración.....                               |     |
| .   | 119 |
| <b>FIGURA 3.15.-</b> Captación del dióxido de carbono.....  | 120 |
| <b>FIGURA 3.16.-</b> Gráfico de la presión de los componentes del<br>prototipo (atm) versus la temperatura (K)..... | 120 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  | Pág. |
|--|------|
| <b>TABLA 1.-</b> Solubilidad del dióxido de carbono en agua.....   | 38   |
| <b>TABLA 2.-</b> Datos para el diseño de la curva de equilibrio del CO <sub>2</sub> en agua a 5° C.....                                | 39   |
| <b>TABLA 3.-</b> Datos para el diseño de la curva de equilibrio del CO <sub>2</sub> en agua a 10°C.....                                | 40   |
| <b>TABLA 4.-</b> Datos para el diseño de la curva de equilibrio del CO <sub>2</sub> en agua a 15°C.....                                | 41   |
| <b>TABLA 5.-</b> Cantidad de componentes del prototipo.....  | 51   |
| <b>TABLA 6.-</b> Características del banano utilizado en las pruebas.....  | 52   |
| <b>TABLA 7.-</b> Características de la mandarina utilizada en las pruebas.....   | 53   |
| <b>TABLA 8.-</b> Corridas experimentales del diseño 2 <sup>4</sup> .....   | 60   |
| <b>TABLA 9.-</b> Factores del experimento con su respectiva condición experimental.....  | 63   |
| <b>TABLA 10.-</b> Datos para el cálculo de la difusividad del dióxido de carbono en el aire.....                                       | 72   |
| <b>TABLA 11.-</b> Capacidad de absorción del CO <sub>2</sub> de las soluciones de fosfato monosódico utilizadas en el experimento..... | 81   |
| <b>TABLA 12.-</b> Características de la unidad de predicción climática.....  | 83   |

|  |     |
|--|-----|
| <b>TABLA 13.-</b> Tiempo de control de las pruebas experimentales.....   | 83  |
| <b>TABLA 14.-</b> Presiones y decibeles registrados durante los experimentos.....  | 85  |
| <b>TABLA 15.-</b> Características óptimas para la maduración y transporte del banano usado en los experimentos.....  | 87  |
| <b>TABLA 16.-</b> Producción de dióxido de carbono del banano usado en los Experimentos.....   | 88  |
| <b>TABLA 17.-</b> Características óptimas para la maduración y transporte de la mandarina usada en los experimentos.....   | 89  |
| <b>TABLA 18.-</b> Producción de dióxido de carbono para la mandarina.....  | 89  |
| <b>TABLA 19.-</b> Pesos de cada muestra de banano y mandarina en el respirómetro, junto con sus ° Brix correspondientes.....   | 91  |
| <b>TABLA 20.-</b> Estadísticas descriptivas para los ° Brix del banano con °Brix <22 y °Brix ≥22 usado en las pruebas.....   | 92  |
| <b>TABLA 21.-</b> Estadística descriptiva para los ° Brix de la mandarina madura usado en las pruebas.....   | 93  |
| <b>TABLA 22.-</b> Rendimiento de absorción para banano en estado de maduración 2 y 5 .....   | 95  |
| <b>TABLA 23.-</b> Rendimiento de absorción de la mandarina en estado de maduración 1 y 2, a temperatura de refrigeración y ambiente a 14°C y 20 °C.....                                    | 96  |
| <b>TABLA 24.-</b> Análisis de varianza y predicción para la constante y coeficiente para la ecuación de producción de CO <sub>2</sub> (mg/ kg h) versus temperatura (°C), para banano..... | 100 |
| <b>TABLA 25.-</b> Valores seleccionados para el análisis de regresión de la producción de CO <sub>2</sub> (mg/kg h) versus temperatura (°C), para el banano.....                           | 101 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>TABLA 26.-</b> Análisis de Varianza y predicción para la constante y coeficiente para la ecuación de producción de CO <sub>2</sub> (mg/ kg h) versus temperatura (°C), para la mandarina..... | 103 |
| <b>TABLA 27.-</b> Valores seleccionados para el análisis de regresión de la producción de CO <sub>2</sub> (mg/ kg h) versus temperatura (°C), para la mandarina.....                             | 104 |
| <b>TABLA 28.-</b> Descripción de los términos usados en el análisis de varianza.....   | 105 |
| <b>TABLA 29.-</b> Análisis de varianza del diseño experimental, usando la tabla ANOVA los 4 factores y 2 niveles, en 16 experimentos.....  | 106 |
| <b>TABLA 30.-</b> Resumen de datos obtenidos para el cálculo de los coeficientes de transferencia de masa.....   | 111 |
| <b>TABLA 31.-</b> Difusividad del CO <sub>2</sub> en el aire a las temperaturas registradas en el respirómetro para los experimentos con banano.....   | 114 |
| <b>TABLA 32.-</b> Difusividad del CO <sub>2</sub> en el aire a las temperaturas registradas en el respirómetro para los experimentos con la mandarina.....                                       | 115 |

## ÍNDICE DE PLANOS

|  |    |
|--|----|
| <b>Plano 1.-</b> Vista horizontal del prototipo..... | 50 |
|--|----|