

Calorimetría Indirecta: El Instrumento Preciso para el Manejo Metabólico

Dr. Rafael M. Belloso C.
Sr. Richard W. Drummond, PHD
Dr. Lawrence Biskin
Dr. Stanley J. Dudrick

RESUMEN:

Este tratado desarrollado durante la estadía del autor principal en Estados Unidos, reporta los resultados y recomendaciones, para una correcta valoración del manejo metabólico por medio de la calorimetría indirecta, comparando los distintos métodos de estudio e interpretación de los mismos.

ABSTRACT:

This paper, written during the stay of the senior author in U.S.A., reports the results and recommendations for a correct evaluation of metabolism through an indirect calorimetry procedure analysing the different methods of study and interpretation.

INTRODUCCION

Las elocuentes investigaciones de Black, Lavoisier y Priestly hace 200 años ayudó al desarrollo y entendimiento del rol del Dióxido de Carbono y Oxígeno en la combustión (18). Esto dio pie para el estudio cualitativo y cuantitativo de los procesos metabólicos y Nutrición en general, donde la transformación de la energía y la producción de calor juegan un papel dominante.

Desde hace muchos años los investigadores médicos y científicos en general, han soñado con la posibilidad de determinar por medios sumamente prácticos el gasto calórico de individuos en diferentes estados de enfermedad, o precisar el aporte calórico necesario para mantener nuestro peso corporal. Es muy fácil conocer la cantidad de energía que ingerimos, pues tanto los alimentos como las fórmulas nutritivas tienen tablas de referencia calórica standard.

A pesar de que los principios de la Calorimetría Indirecta han sido conocidos y empleados para una gran variedad de proyectos experimentales y clínicos desde finales del siglo XVIII, recientemente los avances tecnológicos y el rápido desarrollo del campo de la Nutrición Clínica han acrecentado el valor de la determinación del Gasto Energético de Reposo (G.E.R.) a nivel de la cama del paciente como parte integral del cuidado metabólico.

La Calorimetría Indirecta ha ganado especial importancia por su valioso aporte de datos en el monitoreo de los pacientes críticamente enfermos o complicados, ya que detecta variaciones fisiológicas mínimas en cortos períodos de tiempo. Los parámetros relacionados con el campo nutricional son: Gasto Energético de Reposo (G.E.R.), Cociente Respiratorio (C.R.) y sustratos oxidados.

Hasta hace unos años esta tecnología estuvo limitada al Laboratorio, pero con el aumento y sofisticación de los microprocesadores, los Calorímetros Indirectos portables están ahora accesibles comercialmente y han ganado gran aceptación entre el armamentario hospitalario. Evaluaciones de la capacidad analítica de estos se encuentran a la mano en la literatura (9,15,19,21), sin embargo, los reportes de la influencia de las variables clínicas y del potencial impacto en su capacidad analítica son escasos.

Este estudio evalúa la precisión del instrumento, las variables dependientes de su uso y los cambios cíclicos tanto del G.E.R. como de la excreción urinaria de Nitrógeno.

MATERIAL Y METODO

1. Equipo:

El instrumento utilizado es el Calorímetro Indirecto Beckman MMC Horizon System producido por la Beckman Instruments INC. Sensor Medics Corp. (Figura 1). Este es un analizador computarizado de gases respiratorios, portátil, capaz de conducir test preprogra-

St. Luke's Episcopal Hospital, Houston, Texas
Nutritional Support Services.

mados y acumular información en su memoria y tenerla inmediatamente a su disposición para calcular una amplia variedad de funciones cardiopulmonares. Consta de los siguientes componentes (19,20,21) (Figura 2):

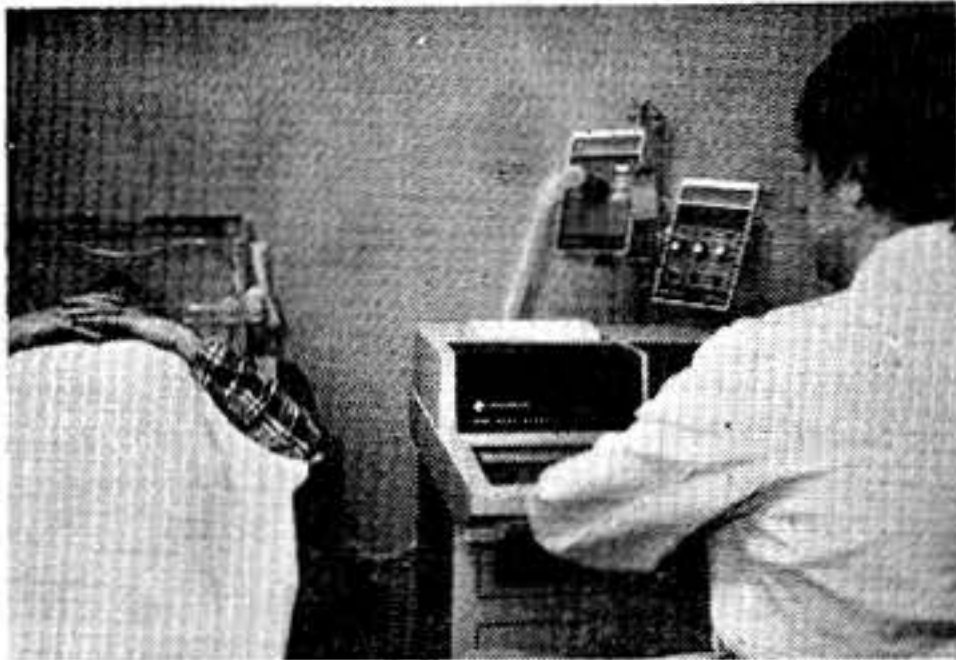
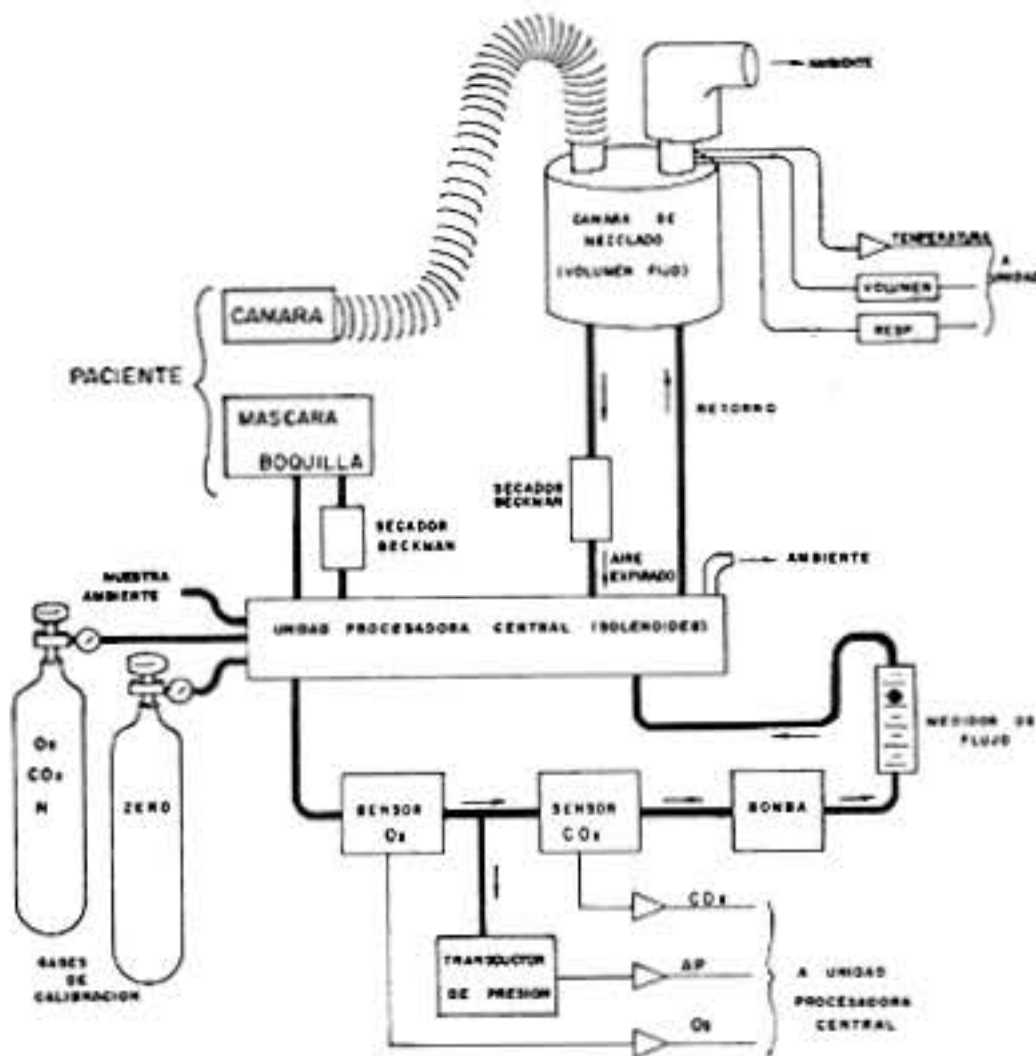


Figura 1
Calorímetro Indirecto portátil Beckman MMC Horizon System.

FIGURA 2
REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL CALORIMETRO INDIRECTO



- a) Sensor de Oxígeno; es un analizador polarográfico que consiste en un cátodo de oro y un ánodo de plata, montados detrás de una membrana permeable difusora de Oxígeno e inmerso en un gel de Cloruro de Potasio. Rango dinámico de 0-100 por ciento y Resolución 0,01%.
- b) Sensor de Dióxido de Carbono; utiliza una técnica de análisis infrarroja no dispersiva, que se basa en el fenómeno que tienen las moléculas de varios gases de absorber energía de diferentes porciones del espectro infrarrojo. Rango dinámico de 0-10% y Resolución 0,01%.
- c) Transductores de volumen (Rango dinámico 2-250 Litros, Resolución 0,04 Lts x min.), temperatura; respiración y presión.
- d) Unidad procesadora central computarizada Intel 8085A, de configuración multibus.
- e) Cámara de mezcla de gases expirados.
- f) Gases y procedimientos de calibración completamente automáticos.
- g) Sistemas de recolección de gases expirados (cámara, máscara y boquilla).

Para la medición del Nitrógeno urinario se utilizó un analizador quimioluminescente producido por la ANTEK CORP.; y para la determinación de la urea urinaria se usó el método enzimático adaptado a un analizador centrifugado Cobas Fara producido por la ROCHE DIAGNOSTIC.

2. Principios básicos:

La oxidación de sustratos con generación de calor y producción de energía para operar la maquinaria orgánica corporal es la base del Metabolismo. Cuando el organismo está inmóvil, el consumo de Oxígeno y la producción de Dióxido de Carbono por unidad de tiempo está directamente relacionado con la liberación de energía a nivel tisular.

El Gasto Energético Basal es el porcentaje de gasto metabólico después de 12-18 horas de ayuno y haber reposado completamente al menos por 30 minutos. Estas condiciones basales cuidadosamente controladas son sumamente difíciles de conseguir en todos los pacientes, especialmente en aquellos críticamente enfermos; por esta razón, el Gasto Energético debe ser catalogado como Gasto Energético de Reposo (G.E.R.), en vez de Basal. Esta diferencia ha sido calculada ser menor de 10% (10). Este, entonces, reflejará la velocidad a la cual el paciente metaboliza sus alimentos en condiciones de reposo.

Para individuos sanos el G.E.R. consiste en una interrelación entre peso, altura, sexo y edad. Cuando los valores normales varían, éste variará en unos cuantos cientos de calorías por día. Para muchas categorías de pacientes médicos y quirúrgicos, el G.E.R. varía entre 50 a 200% de su valor base.

CALORIMETRIA INDIRECTA

Las variables claves a medir por medio de la Calorimetría Indirecta de circuito abierto son: volumen expirado total o flujo por unidad de tiempo, ventilación minuto, fracción inspirada de Oxígeno (FI_{O2}), fracción inspirada de Dióxido de Carbono (FICO₂), concentración fraccional de mezcla expirada de Oxígeno y Dióxido de Carbono, presión barométrica, temperatura de los gases expirados, y tiempo.

El porcentaje de producción de energía puede ser calculado por la ecuación clásica:

$$\begin{aligned} \text{G.E.R.} &= (3.94 \times \text{VO}_2 + 1.11 \times \text{VCO}_2) \\ \text{VO}_2 &= \text{ml consumo O}_2 \times \text{min.} \\ \text{VCO}_2 &= \text{ml producción CO}_2 \times \text{min.} \end{aligned}$$

El VO₂ refleja ventilación, circulación y metabolismo tisular, promediándose aproximadamente 5 calorías por Kg

$$\text{Gasto metabólico ajustado} = \text{G.E.R.} - 2.17 \times \text{Nitrógeno Urinario (Grs.} \times \text{ día)}$$

$$\text{Cociente Respiratorio No Proteico} =$$

de peso liberadas por cada litro de Oxígeno consumido. En individuos en reposo el consumo de Oxígeno por el hígado, músculo esquelético y cerebro constituyen la mayor parte de la producción de calor.

El metabolismo humano al ser analizado desde el punto de vista proteico se considera incompleto como lo refleja la excreción de Nitrógeno urinario y fecal. La rata de oxidación de las proteínas puede ser calculada midiendo la cantidad de Nitrógeno excretado en 24 horas. El Nitrógeno ureico representará aproximadamente el 85% del Nitrógeno urinario total, ya que las pérdidas como Nitrógeno fecal son usualmente pequeñas.

Para ajustar el G.E.R. se utiliza la siguiente fórmula (27):

$$\frac{\text{VCO}_2 - 4.8 (\text{Nitrógeno Ureico})}{\text{VO}_2 - 5.9 (\text{Nitrógeno Ureico})}$$

El ajuste realizado permitirá calcular la cantidad relativa de energía producida por la oxidación de carbohidratos, grasas y proteínas, basándose en que:

1. Proteínas = 6.25 × 4.2 × Nitrógeno Ureico.
2. Carbohidrato + Grasa = Gasto metabólico ajustado — Proteínas.

Cuando clínicamente es impráctico obtener el Nitrógeno urinario en 24 horas, se asume que el cociente respiratorio de las proteínas es igual a 0.82, lo que produciría un error de aproximadamente 2-8% (15.28) del G.E.R.

Con la Calorimetría Indirecta podemos indirectamente, en forma no invasiva y automática, obtener el G.E.R. y observar la forma cómo estos procesos metabólicos ocurren midiendo en el aire expirado el porcentaje y velocidad con que el Oxígeno es utilizado (VO₂) y el Dióxido de Carbono producido (VCO₂). La relación entre la producción de Dióxido de Carbono y el consumo de Oxígeno es referida como cociente respiratorio C.R. = VCO₂/VO₂. Su aplicabilidad en monitoreo metabólico es muy importante debido a que se identifica muy claramente el sustrato utilizado (25). El C.R. para la oxidación de carbohidratos es de aproximadamente 1, para las grasas 0.7 y para las proteínas 0.8. Durante el ayuno cuando los ácidos grasos suplen principalmente la energía, el C.R. se encuentra entre 0.7 a 0.8; después de una comida la oxidación de los carbohidratos aumentan el C.R. hasta aproximadamente 1.0. Un valor mayor que 1 significa Lipogénesis a menos que sea consecuencia de hiperventilación o exceso de administración de glucosa durante la hiperalimentación endovenosa, pues eleva en 23% la producción de CO₂ (1,25), pudiendo precipitar el distress respiratorio (debido a hipercapnia y acidosis respiratoria) en

pacientes con reserva pulmonar marginal. En pacientes hipermetabólicos una sobrecarga de carbohidratos puede estar asociada con un gran aumento en el consumo de Oxígeno y solamente producirá un pequeño incremento en el C.R.; a pesar de que el cociente respiratorio en estos pacientes hipermetabólicos no es necesariamente mayor de 1, éstos se beneficiarían con emulsiones grasas; ya que al ser oxidadas con un C.R. de 0.7 se disminuirá significativamente la producción de CO₂.

3. Técnica clínica:

El volumen, temperatura, sensores y presión barométrica son calibrados diariamente utilizando gases de concentración conocida (Tabla 1), los cuales se aproximan a la composición del aire expirado en el sistema de recolección utilizado (9). La estabilidad de los gases a analizar debe ser asegurada permitiendo un adecuado calentamiento del Instrumento antes de su uso.

TABLA 1

Selección del gas de calibración

% O ₂ Inspirado	% Mezclas de Gas		
	O ₂	CO ₂	N ₂
21 (Máscara-Boquilla)	16	4	80
22-40 (Ventilador)	40	4	56
41-60 (Ventilador)	60	4	36
20 (Cámara)	20	0,75	79,25

Cuando se utiliza máscara o boquilla, el aire expirado es recogido y llevado a través de válvulas a la cámara de mezclado para ser analizado. Cuando se utiliza la cámara, la cabeza del paciente es introducida en una cámara plástica transparente con un sello flexible confortable alrededor del cuello, no permitiendo así fuga de aire (Figura 3). Un succionador recoge el aire expirado y lo lleva a la cámara de mezclado manteniendo un flujo regular de tal forma que el FCO_2 permanezca entre 0,0065 y 0,0085.



Figura 3
Sistema de cámara: cámara plástica transparente con sello cervical flexible. Obsérvense las ventanas laterales para acceso interno

Cuando se utiliza la máscara, ésta se asegura con bandas elásticas a un arnés colocado en la cabeza del paciente con la finalidad de evitar fugas en el sistema (Figura 4). Cuando se utiliza la boquilla (pieza flexible que se coloca entre los labios y encías), un clip nasal ocluye ambas fosas nasales con igual finalidad (Figura 5).



Figura 4
Sistema de máscara: máscara adaptable con bandas elásticas al arnés colocado en la cabeza.



Figura 5
Sistema de boquilla: pieza flexible que se coloca entre labios y encías. Obsérvese el clip nasal.

Las condiciones durante las mediciones de pacientes fueron las siguientes:

- a) Acostado confortable por \pm 10-15 minutos antes de las mediciones.
- b) Cuarto con claridad, tranquilo y termoneutral.
- c) No practicar actividad durante la medición.
- d) Ayuno mayor de 4 horas.
- e) No dormirse (el G.E.R. puede disminuir hasta 80%).
- f) 10 medidas de 3 minutos de intervalo (30 minutos total) de donde se promedian las 4 últimas siempre que toda información recogida sea en el período de equilibrio o "STEADY STATE".
- g) No haber fuga en el sistema.

Todos los equipos que entran en contacto con la piel, secreciones y aire expirado son esterilizados o desechados después de su uso.

INVESTIGACIONES

A. Precisión del instrumento:

I. Estabilidad de los sensores de O_2 y CO_2

El instrumento fue apagado por diferentes períodos de tiempo (5, 10, 15, 20 y 30 minutos; 1 y 14 horas); permitiendo luego su calentamiento por períodos similares, con la excepción del de 14 horas, el cual se realizó por 1 hora. Posteriormente se realizan mediciones consecutivas cada 5 minutos del gas conocido (16% O_2 , 4% CO_2) durante 30 minutos para los tiempos 5, 10, 15, 20 y 30 minutos; y 60 minutos para 1 y 14 horas.

II. Linearidad de los sensores de O_2 y CO_2

La linearidad de los sensores se determinó realizando mediciones únicas de gases de concentración conocida (Oxígeno 7, 12, 16; 20; 30; 40 y 60%, y Dióxido de Carbono 0.4; 0.75; 4; 7 y 10%).

III. Reproducibilidad de las medidas

Previo calentamiento y calibración del Instrumento se realizaron 40 mediciones consecutivas (1 diaria durante 2 meses) con cada uno de los gases de concentración conocida (Oxígeno 7, 12, 16, 20; 30; 40 y 60%; y Dióxido de Carbono 0.4; 0.75; 4; 7 y 10%). Se calcula el porcentaje del gas medido, desviación standard y coeficiente de variación.

Posteriormente, se realizaron 40 mediciones de gases de igual concentración y técnica anterior, pero alternando entre cada una de ellas mediciones de sujetos sanos durante 20-30 minutos con el sistema de la cámara, con la finalidad de observar diferencias en las variables cuando se introduce el método clínico.

B. Evaluación de la calorimetría indirecta vs. ecuación de Harris-Benedict para la estimación del G.E.R.

Se tomaron 8 sujetos sanos (5 varones y 3 hembras) a los cuales se les calculó el G.E.R. por medio de la ecuación tradicional de Harris-Benedict (12):

$$\text{Mujeres} = 655 + (9.6 \times \text{peso en Kg}) + (1.7 \times \text{altura en cm}) - (4.7 \times \text{edad en años})$$

$$\text{Hombres} = 66 + (13.7 \times \text{peso en Kg}) + (5 \times \text{altura en cm}) - (6.8 \times \text{edad en años})$$

Posteriormente se calculó el G.E.R. por intermedio del Calorímetro Indirecto previo calentamiento y calibración siguiendo la técnica clínica con el sistema de la cámara.

C. Evaluación de los sistemas de cámara, máscara y boquilla para la determinación del G.E.R.

Nueve sujetos sanos (4 varones y 5 hembras) fueron sometidos a mediciones consecutivas por medio del Calorímetro Indirecto con cada uno de los diferentes sistemas para la determinación del G.E.R. Previo calentamiento y calibración siguiendo la técnica clínica se inició el estudio con la cámara, seguido por la máscara y boquilla. Al finalizar el procedimiento se repartió un cuestionario (que debió ser llenado por cada uno de los sujetos) solicitando información acerca de los pro y contras de cada sistema utilizado. Se tabulan y comparan resultados.

D. Variaciones diurnas del gasto energético de reposo y nitrógeno urinario

Trece sujetos sanos fueron admitidos a la Unidad de Soporte Nutricional para un estudio sobre 36 horas. Ingresaron a las 7:00 p.m. manteniéndose cinco de ellos en ayuno total durante todo el estudio. Los ocho restantes ayunaron hasta la primera medida a las 7:30 a.m. del día siguiente, después de lo cual se les permitió comer su dieta normal durante intervalos de 30 minutos a las 8:00 a.m., 1:00 p.m. y 6:00 p.m.

Se realizaron mediciones con el Calorímetro Indirecto con el sistema de la cámara siguiendo la técnica clínica cada cinco horas (4 horas c/u), siendo la última de cuatro horas de intervalo durante el período de 24 horas. La orina fue colectada durante los intervalos correspondientes de medición, después de un completo vaciado de la vejiga a las ocho de la mañana, en un recipiente de orina para 24 horas conteniendo 6 cc de 6 N HCL como preservativo, y refrigerada a 4° centígrados de temperatura hasta ser analizada (dentro del período de una semana).

RESULTADOS

La estabilidad de los sensores de Oxígeno y Dióxido de Carbono durante la calibración resultó ser más estable cuando el Instrumento fue apagado y calentado por 30 minutos o menos respectivamente. El porcentaje de variación mayor para el Oxígeno antes de los 30 minutos fue entre 0,01% y 0,04%, en cambio cuando éste fue manipulado por 1 y 14 horas se incrementó a 0,07% y 0,13% respectivamente (Figura 6). Al observar el Dióxido de Carbono vemos que el porcentaje de variación mayor antes de los 30 minutos fue entre 0,04% y 0,08%; en cambio con 1 y 14 horas se incrementó a 0,16% y 0,18% (Figura 7).

Al evaluar la linealidad de ambos sensores vimos que su comportamiento es linealmente correcto a las diferentes concentraciones de gas utilizado (Figura 8).

FIGURA 6 ESTABILIDAD DEL SENSOR DE OXIGENO

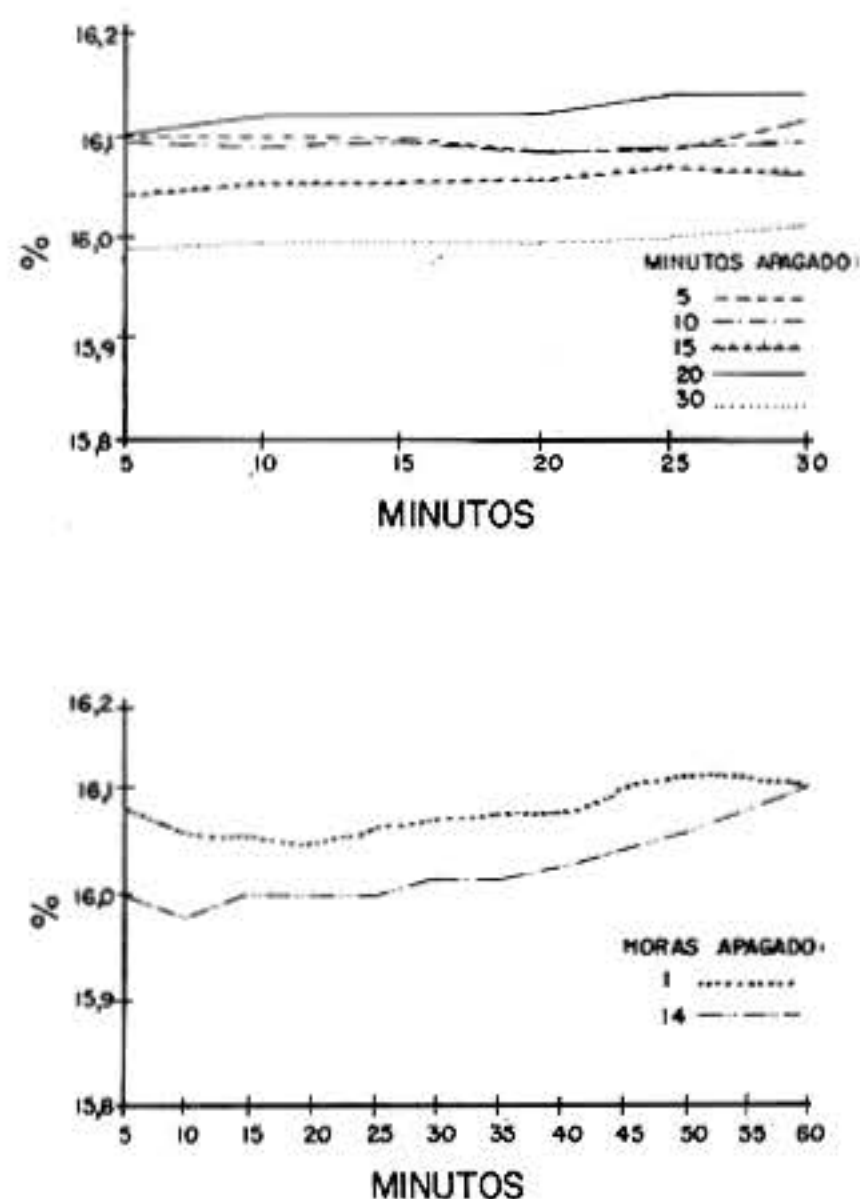
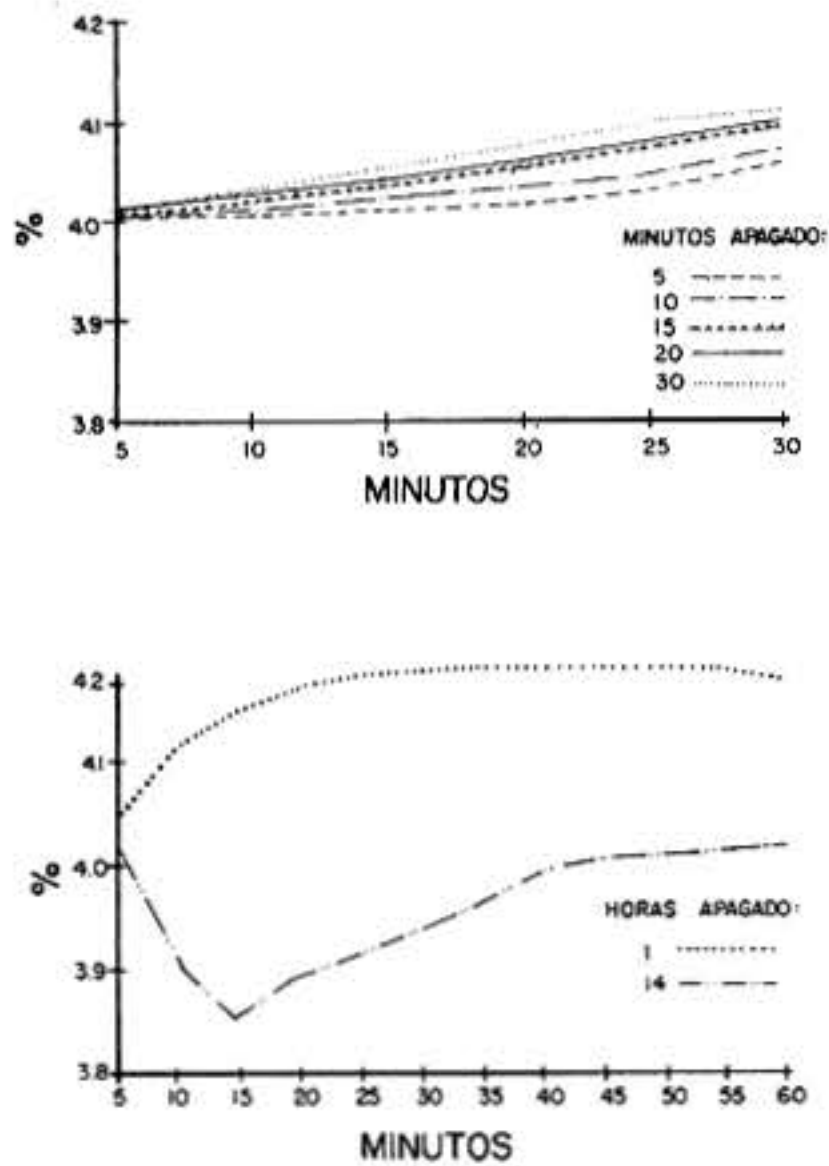


FIGURA 7
ESTABILIDAD DEL SENSOR DE DIOXIDO DE CARBONO



La reproducibilidad de las medidas fue evaluada por 2 métodos diferentes (consecutivo y alterno), observando que el coeficiente de variación para el Oxígeno fue menor que 0,38% y para el Dióxido de Carbono menor de 0,78%, a pesar de las múltiples mediciones realizadas (Tablas 2 y 3). Asimismo, no encontramos diferencias apreciables en las respuestas obtenidas cuando el Instrumento fue calibrado con gases de concentración diferente (20% O₂, 0,75% CO₂ o 16% O₂, 4% CO₂).

TABLA 2

Reproducibilidad de las medidas. Método consecutivo				
	% Gas Utilizado	% Promedio Gas medido	Desviación Standard (±)	% C.V.
O ₂	7	7.11	0.013	0.19
	12	12.24	0.017	0.14
	16	15.98	0.017	0.11
	20	19.98	0.015	0.07
	30	29.87	0.002	0.006
	40	40.16	0.007	0.018
CO ₂	60	60.002	0.003	0.004
	0.4	0.399	0.003	0.778
	0.75	0.75	0	0
	4	3.98	0.003	0.078
	7	7.173	0.006	0.077
	10	10.299	0.003	0.03

Comparando los resultados obtenidos del G.E.R. por medio del Calorímetro Indirecto y la ecuación de Harris-Benedict (12), observamos que existe una diferencia de 192 cal./día (10.7%) a expensas de los cálculos realizados por dicha ecuación; un coeficiente de variación del 14.56 % siendo P menor que 0,05 (Tabla 4).

TABLA 3

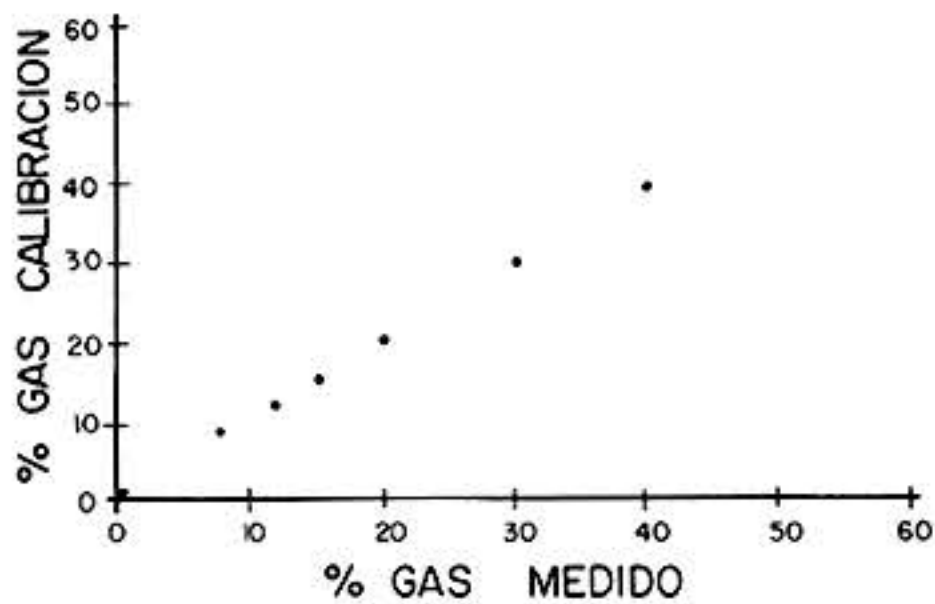
Reproducibilidad de las medidas. Método alternante				
	% Gas Utilizado	% Promedio Gas medido	Desviación Standard (±)	% C.V.
O ₂	7	6.95	0.02	0.34
	12	12	0	0
	16	16.01	0.04	0.26
	20	20.05	0.06	0.28
	30	30.12	0.1	0.34
	40	39.22	0.15	0.38
CO ₂	60	60.18	0.22	0.37
	0.7	0.7	0	0
	0.75	0.75	0	0
	4	3.95	0.009	0.25
	7	6.95	0.02	0.34
	10	9.85	0.04	0.44

TABLA 4

Calorimetría Indirecta vs. Ecuación de Harris-Benedict			
Sujeto	Calorimetría Indir.(Cal./Día)	H-B (Cal./Día)	% Diferencia
1	1633	1726	5,3
2	1273	1460	12,8
3	1299	1385	6,2
4	1703	2110	19,3
5	1186	1888	37,2
6	1704	1709	0,3
7	1386	1390	0,3
8	1315	1372	4,2
Promedio	1437.3	1630.0	10,7

Al comparar los 3 diferentes sistemas de recolección de gases observamos que la cámara produjo el más bajo promedio de G.E.R. (1.472 cal./día), mientras que el método clínico más ventajoso correspondiente a la máscara mostró el promedio más alto (1.549 cal./día) (Tabla 5). Analizando la información recogida en relación a estos sistemas, las respuestas fueron unánimes en decir que la máscara incrementa el trabajo respiratorio y ansiedad, debido a la alta resistencia al flujo de aire que producen las válvulas. La boquilla fue bastante incómoda debido a sus características físicas propias y al clip nasal de que se acompaña, por lo que varios de los sujetos no resistieron el tiempo total de medición.

FIGURA 8
LINEARIDAD SENSORES
OXIGENO



DIOXIDO DE CARBONO

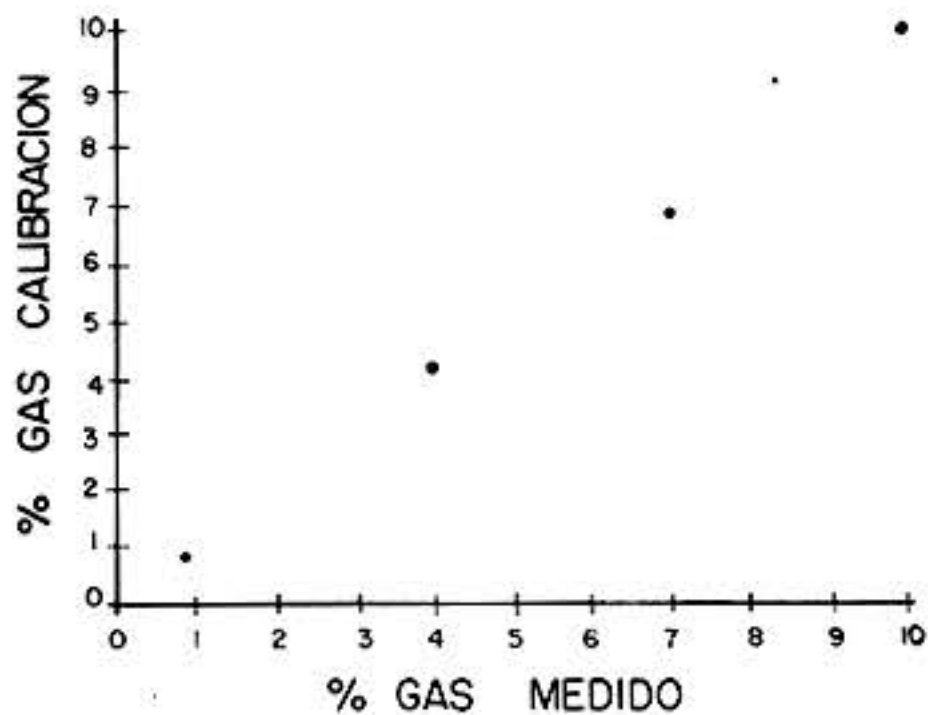


TABLA 5

Cámara vs. Máscara vs. Boquilla

Sujeto	Cámara ± D.S.	Máscara ± D.S.	Boquilla ± D.S.
1	1725±60	1924±58	1887±57
2	1312±52	1231±78	1270±28
3	1019±19	1177±18	1128±30
4	1692±134	1686±54	1498±50
5	1600±52	1866±68	1670±35
6	1210±40	1419±21	1393±63
7	1703±65	1830±82	2048±25
8	1441±175	1539±52	1458±20
9	1543±19	1230±28	1238±28
Promedio	1471,6±68,4	1549,1±51	1510±37,3

Al observar las modificaciones diurnas del G.E.R. vimos que fue altamente variable en todos los sujetos. La desviación máxima de la media en 24 horas varió entre 5 y 89%. La desviación promedio para todos los puntos fue de $22 \pm 28\%$. El coeficiente de variación fue menor del 5% y el promedio de fluctuación para todos los pacientes en 24 horas fue de $12 \pm 10\%$ (Figura 9).

Para asegurar que la variación observada no correspondía a la acción dinámica específica de los alimentos, se realizó igual investigación con 5 pacientes en ayuno completo, observando fluctuaciones similares al igual que alta variabilidad del G.E.R. (Figura 10).

La excreción del Nitrógeno urinario no mostró el mismo patrón al observado en la determinación del G.E.R. (el sujeto N° 7 fue eliminado debido a recolección impropia de la muestra de orina) (Figura 11).

La desviación máxima para las 24 horas fue de 57% (varió de 18-57%), con un promedio de desviación máxima de $38 \pm 12\%$ para todos los sujetos. El porcentaje de la desviación de todos los puntos fue de $23 \pm 14\%$. La media de Nitrógeno urinario excretado como urea fue de $84 \pm 10\%$ (Rango 59-104), con una desviación máxima de 25% (Figura 12).

FIGURA 9
VARIACION DIURNA DEL G.E.R.

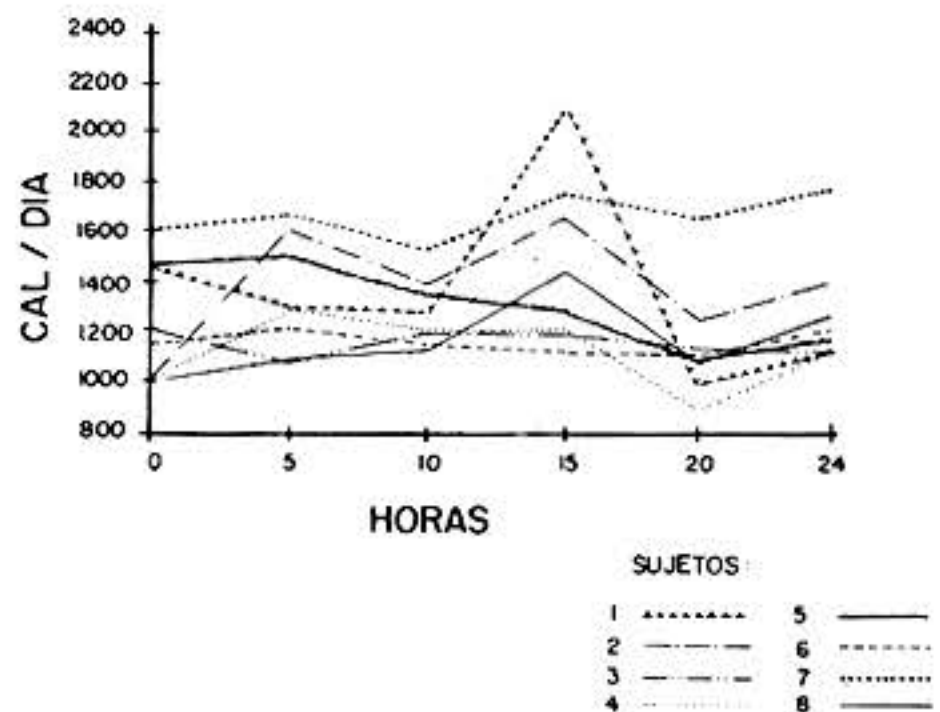


FIGURA 10
VARIACION DIURNA DEL G.E.R. EN AYUNO

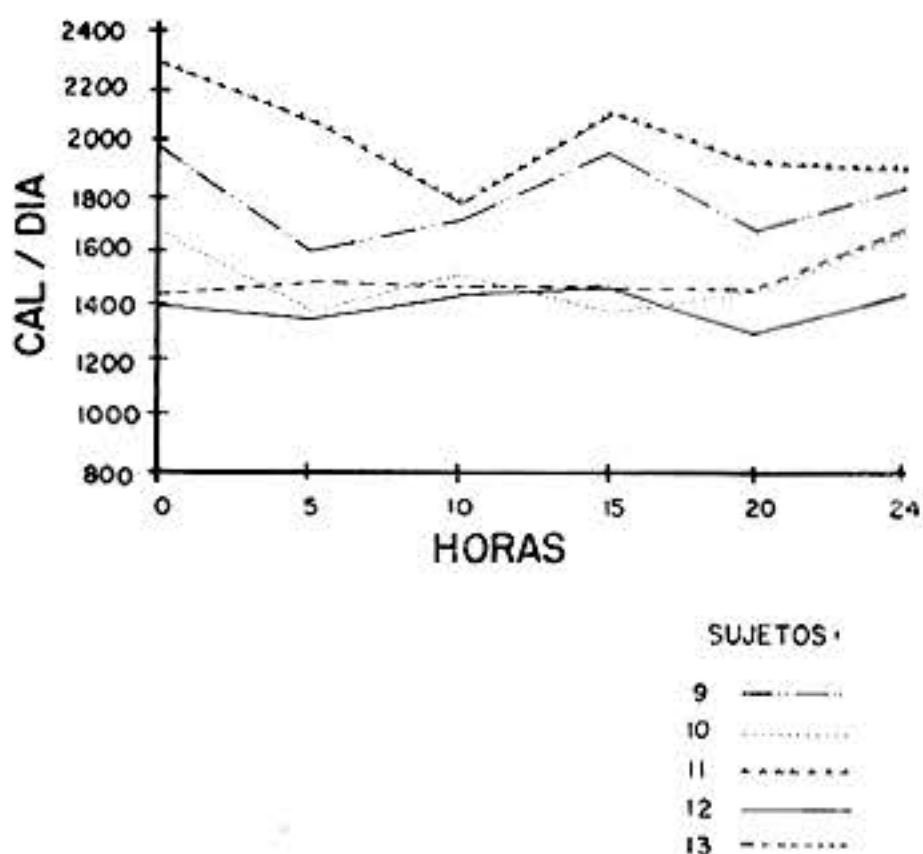


FIGURA 12
VARIACION DIURNA DEL NITROGENO URINARIO EXCRETADO COMO UREA

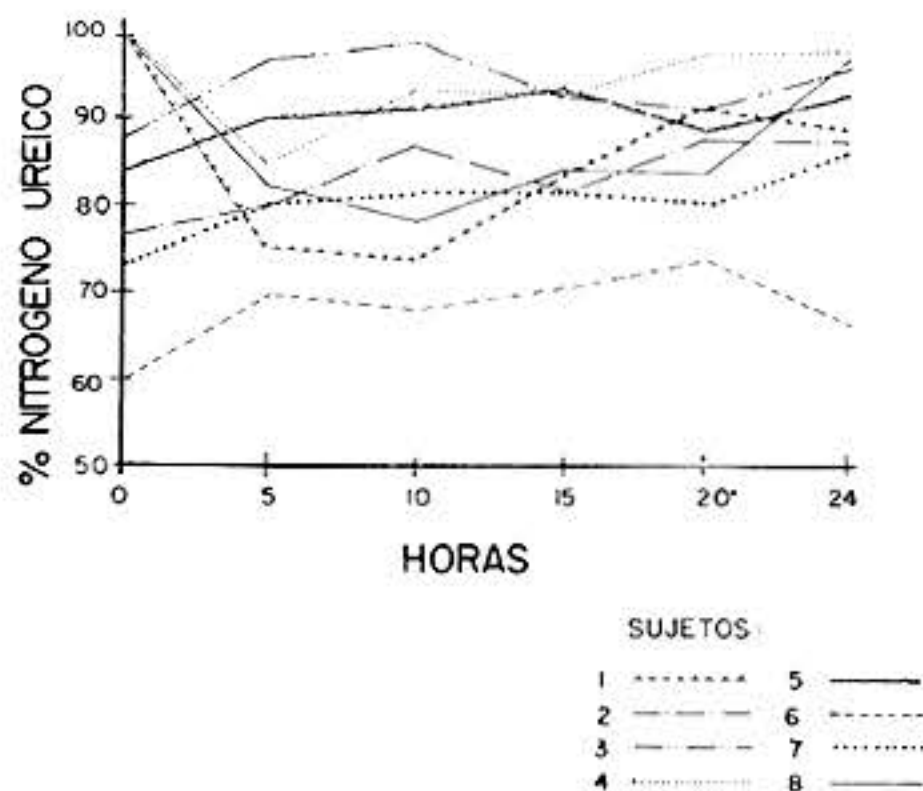
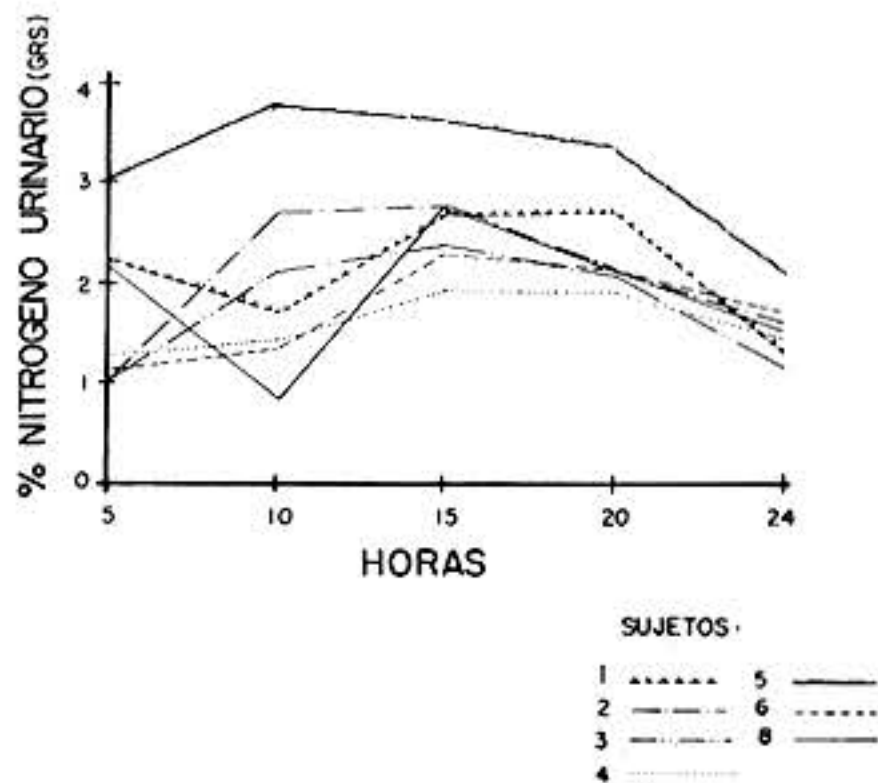


FIGURA 11
VARIACION DIURNA DEL NITROGENO URINARIO



DISCUSION

La introducción de la Nutrición Parenteral Total dentro de la medicina clínica por Dudrick y colaboradores en 1968 (7), permitió un mayor entendimiento de los cambios metabólicos y químicos que ocurren durante el stress y la desnutrición. Cuando el paciente se encuentra en circunstancias de trauma los estados metabólicos y la pérdida de energía se encuentran aumentados, por lo que el aporte y depleción de los depósitos son requeridos para mantener el balance energético. Si una mayor cantidad de energía es ofrecida que gastada para el trabajo externo y pérdidas como calor, el exceso de energía será almacenado como grasa; pero si más energía es gastada que recibida, los depósitos de los compartimientos orgánicos serán depletados.

Debido a que las grasas no pueden ser utilizadas por todos los tejidos orgánicos y el glicógeno es insuficiente, las proteínas deben ser fraccionadas y convertidas a glucosa para suplir los requerimientos energéticos elevados. Si el catabolismo proteico es lo suficientemente severo llevará al paciente a la muerte, por lo tanto, la prevención de pérdidas severas de masa corporal en todo paciente, especialmente en los críticamente enfermos, requiere de una muy cuidadosa y precisa manipulación de la cantidad de energía y proteínas administradas.

Para manejar racionalmente los pacientes desnutridos, el grado de depleción nutricional así como los requerimientos energéticos individuales deben ser determinados. Esto es mejor implementado con un programa comprensivo de evaluación nutricional integrado por un equipo multidisciplinario de médicos, nutricionistas, dietistas, enfermeras y técnicos de laboratorio.

Existen diversas formas o técnicas de practicar evaluación nutricional (6,11,16,23): 1. - La información subjetiva es obtenida a través de la historia clínica; 2. - La información objetiva incluye el examen físico, medidas antropométricas (peso, altura, pliegue del tríceps, circunferencia del brazo y muñeca) y test bioquímicos (balance nitrogenado, creatinina urinaria, y 3-metilhistidina, índice creatinina/altura, albúmina sérica, prealbúmina unida a tiroxina, transferrina; proteína unida al retinol, fibronectina circulatoria; hemoglobina y conteo total de linfocitos). Las pruebas cutáneas determinarán la Inmunocompetencia.

Los pioneros investigadores en el ramo de la Calorimetría fueron Black, Lavoisier y Renault alrededor del siglo XVII y XVIII; sin embargo, no es sino hasta el siglo XIX cuando éste comienza a ser utilizado para estudiar el efecto de varias enfermedades en el metabolismo humano (10).

Idealmente el gasto energético debe ser determinado por la Calorimetría Directa, la cual mide la pérdida de calor tanto secas (radiación, convección y conducción) como húmedas (evaporación y respiración) de un individuo en una cámara sellada y aislada. A pesar de que este método todavía está a la disposición para el uso clínico, no es comúnmente utilizado debido a que su uso es complicado, costoso, incómodo y las determinaciones deben ser realizadas por largos períodos de tiempo (15). Muchos autores han documentado la importancia de las técnicas analíticas de medición, así como del diseño y construcción de calorímetros indirectos. A pesar de que existe cierta discusión acerca de las diferentes opciones con que se cuenta hoy en día, los fundamentos y técnicas son similares.

La colección de muestras del aire expirado puede ser realizada en forma conceptualmente directa por los métodos básicos (Bolsas de Douglas, Gasómetros de Tissot, analizadores de gas de Haldane o Scholander, etc.), siendo altamente dependientes de la capacidad de los operadores técnicos, y se convierten en mediciones tediosas cuando medidas sucesivas son necesitadas.

Numerosos reportes (2,14) demuestran la importancia de utilizar la Calorimetría Indirecta como método preciso para la determinación del G.E.R. en vista de las diferencias notables encontradas por medio de los métodos habituales en pacientes sanos, quemados o con cáncer; o de las complicaciones del tracto gastrointestinal y/o hepático producidas por la sobrealimentación (11).

Utilizando gases de concentraciones conocidas los sensores de Oxígeno y Dióxido de Carbono del Calorímetro Indirecto Beckman demostraron ser sumamente rápidos, estables, remarcablemente lineales y exactos, como también lo demostró Kappagoda (13) al reportar 4% de diferencia. Debido a que los cambios son mínimos durante los cortos períodos de tiempo apagado y tiempos más prolongados de calentamiento son necesarios para minimizar las variaciones en la calibración (30 minutos); nosotros rutinariamente mantenemos el Instrumento prendido a menos que anticipemos períodos prolongados sin usarlo.

La ecuación desarrollada por Harris y Benedict en 1919 (12) proveniente del estudio biométrico humano, arrojó información sobre el metabolismo basal standard de hombres y mujeres. Múltiples fórmulas derivadas de ésta han sido desarrolladas con la finalidad de incluir las situaciones de stress y otras variables, pero no han sido consistentemente seguras. Encontramos un 10% de diferencia al comparar esta ecuación con la Calorimetría Indirecta, lo que coincide con otros reportes (15), pero han sido publicadas diferencias mayores hasta de 50% cuando se emplea este método en pacientes quemados o críticamente enfermos (17,26). Quebbeman (22) concluye que estas fórmulas son altamente dependientes del peso corporal, y que consistentemente se subestima los requerimientos energéticos en aquellos pacientes de bajo peso, y sobrestima a aquellos de gran peso corporal. Feurer (10) afirma que esta ecuación fue creada para individuos sanos, por lo tanto, al aplicarla en enfermos, su valor final no será preciso.

Los candidatos para la medición del G.E.R. por medio de la Calorimetría Indirecta son aquellos pacientes mal nutridos o depletados por: quemaduras, cáncer, fistulas u otros trastornos metabólicos; así como también todos aquellos bajo soporte nutricional. El sistema de cámara además de resultar el más confortable y preciso para los sujetos evaluados, tiene la ventaja de poderse utilizar en pacientes con sondas nasogástricas, estructura facial anormal, patología bucal, o en los casos que amerite mediciones prolongadas (9). Este sistema no puede ser utilizado en pacientes con traqueostomías, conectados a ventiladores, con patología de la piel del cuello (quemaduras, infección), infección severa del oído medio o senos paranasales (se ven afectados con la succión) (9). No es recomendable medir niños por debajo de 20 Kg de peso debido a que su baja producción de CO₂ no es suficiente para obtener niveles posibles de medición (19).

Para la mayoría de los pacientes como también lo reporta Long (15), las máscaras y boquillas resultaron ser sumamente incómodas no pudiendo ser soportadas sino por períodos de medición cortos, al igual que, produjeron los más altos porcentajes de G.E.R.; esto se debe a su configuración física, implementos asociados, interferencia con los patrones normales de respiración y ansiedad. Es indudable el beneficio que aporta para la práctica diaria y circunstancias especiales (tubos nasogástricos, quemaduras, etc.), pero hasta tanto no se diseñen y construyan implementos y equipos más adaptables y cómodos para el paciente, éstos no superarán al sistema de la cámara.

Existen una serie de factores ya mencionados en la técnica clínica que son capaces de modificar los resultados del G.E.R. Hemos visto que el calentamiento de los microprocesadores es un factor importante que influencia la exactitud. Otros factores son: 1. - Edad; la producción de calor por metro cuadrado de superficie corporal por hora disminuye rápidamente hasta que el infante llega a la pubertad, después muestra una pequeña y gra-

dual disminución a medida que aumenta la edad (15); 2. - Temperatura; ambientes por encima de la zona termoneutral causará un aumento del G.E.R. debido a incremento en la respiración, gasto cardíaco y otras adaptaciones fisiológicas que requieren energía para mantener constante la temperatura corporal (15); 3. - Contaminación con cantidades desconocidas de vapor de agua, Oxígeno o Dióxido de Carbono extracorporales; o cambios de presión del sistema de muestra (19); 4. - La ansiedad asociada al desconocimiento del procedimiento, disconfor de las máscaras y boquillas al igual que el trauma externo aumentan el consumo de Oxígeno.

Damask (4) demostró que con un procedimiento relativamente menor como la biopsia muscular percutánea, se pueden inducir aumentos grandes (90-100%) aunque temporales en el intercambio gaseoso y por consiguiente del G.E.R.; 5. - Fiebre, el incremento de un grado centígrado de temperatura por encima de la temperatura corporal normal, causará un incremento del 12.5% en el G.E.R. (15); 6. - La termogénesis dietética inicialmente descrita por Rubner (24) como acción dinámica específica (A.D.E.) se calcula en aproximadamente 10-20% sobre el valor base del G.E.R. en 24 horas. Esta es transitoria, su pico máximo es de 7% a la primera hora y posteriormente retorna lentamente a lo normal en las horas subsiguientes. La A.D.E. producida por las proteínas es del 20 al 30%, de los carbohidratos 5 al 10% y para las grasas aproximadamente 3% (3,8). Estudios preliminares en nuestro laboratorio sugieren que esta respuesta es altamente variable y dependiente del tipo y cantidad de calorías ingeridas (observaciones no publicadas); y que 4,5 horas de intervalo son necesarias para anular la influencia de la A.D.E., como lo demuestra el estudio en sujetos en ayuno.

Pocos artículos han sido publicados que incluyan la importancia de variables biológicas como la variación diurna tanto en el G.E.R. como en la excreción urinaria de Nitrógeno (5). Grant (11) afirma que el G.E.R. es estable, pudiendo extrapolarse el resultado de una medición única a períodos de 24 horas. Creemos que el tiempo del día en el cual se realizan las mediciones es sumamente importante no pudiendo extrapolarse, ya que hemos demostrado que en intervalos de 4-6 horas el G.E.R. puede desviarse en un 30-40%.

La experiencia que hemos tenido es que para minimizar las variables secundarias a la variación diurna, las medidas deben ser hechas entre 20 y 30 minutos, al menos en cuatro intervalos separados para 24 horas. La causa de esta fluctuación no está clara, pero los ritmos circadianos ligados a períodos de luz que regulan la liberación de hormonas que ejercen una profunda influencia tanto en el metabolismo basal como en los procesos anabólicos y catabólicos pudiera ser la explicación.

La excreción urinaria de Nitrógeno describió un pico máximo durante el día cuando los patrones de actividad son mayores, y disminuye durante los períodos de reposo o inactividad. No encontramos correlación entre el volu-

men total de orina y el total de Nitrógeno excretado. El hecho de que los patrones de excreción de Nitrógeno no se "miran en espejo" con el G.E.R., tiene gran significancia para las personas que utilizamos los niveles de Nitrógeno para la predicción del porcentaje de proteínas, carbohidratos y grasas a utilizarse para las necesidades calóricas.

Las investigaciones futuras en el campo de la nutrición y análisis metabólico en general, estará ayudada de tecnología muy avanzada como lo es el análisis de compartimientos corporales por dilución de isótopos o activación de neutrones como el Sodio, Hidrógeno y Potasio; así como la determinación del flujo de Nitrógeno intertissue en diferentes estados (11). Su factor limitante sería indudablemente el costo del equipo. Otras investigaciones pendientes corresponden al estudio de las variaciones del G.E.R. y C.R. durante la administración de medicamentos de uso diario.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

Con el advenimiento de la nutrición parenteral en el soporte de los pacientes críticamente enfermos, se ha agudizado el control, tratamiento y prevención de las complicaciones metabólicas. Su manejo debe estar a cargo de un equipo multidisciplinario entrenado para tal fin.

Períodos de calentamiento mayores de lo recomendado por su fabricantes, son necesarios para minimizar las variaciones en la calibración del Calorímetro Indirecto cuando éste es apagado por más de 30 minutos. Diferencias del gasto energético de reposo son encontrados entre sujetos controles medidos por los sistemas de cámara, máscara y boquilla, probablemente relacionado con la ansiedad y características físicas de cada instrumento. Igualmente, hubo diferencias estadísticamente significativas cuando fue comparada con los cálculos realizados por medio de la ecuación de Harris Benedict ($P < 0.05$). La inexactitud también estará relacionada con el uso impropio, o el fallo en considerar las variables biológicas como flujo ventilatorio, alimentación, composición de las comidas, o variación diurna y excreción urinaria (describen ritmos circadianos).

En el pasado, la Calorimetría Indirecta fue básicamente utilizada como una herramienta experimental. Debido a su costo, esta máquina no está fácilmente accesible en pequeñas comunidades hospitalarias, pero en las instituciones de gran calibre, su integración dentro del armamentario de evaluación metabólica, representa el método más seguro, objetivo y exacto, aumentando la posibilidad y habilidad para monitorear y optimizar los requerimientos nutricionales de cada paciente en diferentes estados de enfermedad.

BIBLIOGRAFIA

- 1 Askanazi, J.; Weissman, C.; Rosenbaum, S. M.; Hyman, A. I.; Millie - Emil J. Nutrition and the respiratory system. Crit. Care Med. 10:163-72, 1972.

CALORIMETRIA INDIRECTA

- 2 **Bartlett, R. H.; Allyn, P. A.; Medley, T.; Wetmore, N.** Nutritional therapy based on positive caloric balance in burn patients. *Arch. Surg.* 112:974-80, 1977.
- 3 **Boothby, W. M.; Sandiford, T.** Laboratory manual of the technique of basal metabolic rate determinations. Philadelphia, Saunders 24, 1920.
- 4 **Damask M. C.; Askanazi, J.; Weissman, C.; Elwyn, D. H.; Kinney, J. M.** Artifacts in measurement of resting energy expenditure. *Crit. Care Med.* 11:750-2, 1983.
- 5 **Drummond, R. W.; Guthrie, P. D.; Mazzagatti, L. M.; Dudrick, S. J.** Evaluation of a chemiluminescence nitrogen. Analysis technique for use in nutritional assessment studies. (Not published).
- 6 **Dudrick, S. J.; Coopeland, III E. M.; Daly, J. M.; Long III J. M. et al.** A clinical review of nutritional support of the patient. *J. Pen.* 3:444-51, 1979.
- 7 **Dudrick, S. J.; Wilmore, D. W.; Vars, H. M.; Rhoads, J. E.** Long term total parenteral nutrition with growth, development, and positive nitrogen balance. *Surgery* 64:134-42, 1968.
- 8 **Elwyn, D. H.; Kinney, J. M.; Askanazi, J.** Energy expenditure in surgical patients. *Surg. Clin. North Am.* 61:545-56, 1982.
- 9 **Feurer, I.; Mullen, J. L.** Bedside measurement of resting energy expenditure and respiratory quotient via indirect calorimetry. *Nutr. Clin. Prac.*, 2:43-49, 1986.
- 10 **Feurer, I. D.; Mullen, J. L.** Measurement of energy expenditure. In: *Clinical nutrition*. Rombeau J., Cadwell M., Chapter 11:224-36, 1985.
- 11 **Grant, J. P.** Nutritional assessment in clinical practice. *Nutr. Clin. Practice.* 2:3-11, 1986.
- 12 **Harris, J. A.; Benedict, T. G.** Biometric studies of basal metabolism in man. Washington D.C., Carnegie Institute of Washington. Publication 279.
- 13 **Kappagoda, C. T.; Stoker, J. B.; Linden, R. J.** A method for the continuous measurement of oxygen consumption. *A. Appl. Physiol.*, 37:604-7, 1974.
- 14 **Knox, L. S.; Crosby, L. O.; Feurer, I. D.; Buxby, G. P.; Miller, C. L.; Mullen, J. L.** Energy expenditure in malnourished cancer patients. *Ann. Surg.* 197:152-62, 1983.
- 15 **Long, C. L.** The energy and protein requirements of the critically ill patients. In: *Nutritional assessment*. Wright R. A., Hemsfield S., 157-61, 1984.
- 16 **Long, C. L.** Nutritional assessment. Wright, R. A., Hemsfield, S. 15-26, 1984.
- 17 **Mann, S.; Westenskow, D. R.; Heutchen, D. A.** Measured and predicted caloric expenditure in the acutely ill. *Crit. Care Med.* 13:173-7, 1985.
- 18 **McKie, D.; Antoine, Lavoisier.** Scientist, economist, social reformer. Henry Shuman. New York 142, 1959.
- 19 **Norton, A. C.** Development and testing of a microprocessor-controlled system for measurement of gas exchange and related variables in man during rest and exercise. Beckman Reprint No. 025, 1-13, 1982.
- 20 **Norton, A. C.** Portable equipment for gas exchange. In: Kinney, J. *Assessment of energy metabolism in health and disease*. Columbus, Ohio: Ross Laboratories, 1980.
- 21 **Norton, A. C.; Mashikian, Y.; Wilmore, J. H.; Badier, U. D.** Development and evaluation of a metabolic measurement cart. *Proc. 2. Diago Biomed. Symp.* 15:120-45, 1976.
- 22 **Quebbeman, E. J.; Ausman, R. K.** Estimating energy requirements in patients receiving parenteral nutrition. *Arch. Surg.* 117:1281-4, 1982.
- 23 **Reilly Jr., J.J.; Gerhardt, A. L.** Modern surgical nutrition. *Current problems in surgery.* 22:1-81, 1985.
- 24 **Rubner, M.** The laws of energy consumption in nutrition. Leipzig, Vienna: Franz Deuticke, 1902.
- 25 **Silberman, H.; Silberman, A. W.** Parenteral nutrition biochemistry and respiratory gas exchange. *J. Pen.* 10:141-4, 1986.
- 26 **Turner, W. W.; Ireton, C. S.; Hunt, J. L.; Baxter, C. R.** Predicting energy expenditures in burned patients. *J. Trauma* 25:11-6, 1985.
- 27 **Weir, J. B.** New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. *J. Physiol.* 1:109, 1949.
- 28 **Wilmore, D. W.** The metabolic management of the critically ill. New York, Plenum Medical Book Co., 1977.