

[r e v i s i ó n]

Calorimetría: aplicaciones y manejo

Pedro Marsé Milla, Mónica Díez Poch y Joan M^a Raurich Puigdevall

Servicio de Medicina Intensiva. Hospital Universitario Son Dureta. Palma de Mallorca

Palabras >> RESUMEN

clave La determinación del gasto energético, constituye un paso fundamental en el proceso del soporte nutricional de cualquier tipo de pacientes y sobre

Calorimetría

indirecta. Consumo todo de aquellos enfermos más graves en los que tan perjudicial como la de oxígeno. desnutrición puede ser un exceso en el aporte de nutrientes. También es importante el ajuste del aporte energético en el individuo sano para evitar respiratorio. sobre todo los problemas ligados al exceso de peso. El método más eficaz

~~Fórmulas predictivas~~ para determinar el gasto energético es la calorimetría indirecta respiratoria, que también proporciona el cálculo del cociente respiratorio que indica los nutrientes que preferentemente oxida el sujeto y permite introducir modificaciones en el soporte nutricional. Su medición exige, además de un utillaje específico un completo conocimiento de las estrictas normas en que ha de realizarse para que sus resultados sean fiables. Directamente relacionadas con los métodos calorimétricos, están las fórmulas predictivas del gasto energético, muy extendidas en la valoración cotidiana de pacientes y de grupos de población sana por su mayor facilidad de manejo, pero no exentas de controversias sobre su exactitud y aplicabilidad a cualquier tipo de pacientes.

>> ABSTRACT

The determination of energy expenditure represents a key step in the process of nutritional support of every type of patient, especially of the most severely ill patients in whom an excess of nutrients intake may be as much harmful as hyponutrition. In healthy individuals adjusting energy intake is also important to prevent overweight-related conditions. The most effective method to determine the energy expenditure is respiratory indirect calorimetry that also brings the calculation of the respiratory ratio indicating the nutrients being preferentially oxidized by the individual and allows introducing nutritional support modifications. Besides specific tools, this measurement requires a full knowledge of the stringent conditions under which it must be performed in order to obtain accurate data. Predictive calculations of the energy expenditure are directly related with calorimetric methods, these calculations being commonly used in routine evaluation of patients and healthy population samples because of their easiness, although they are not devoid of controversies regarding their accuracy and applicability to every type of patient.

Kew words: Indirect calorimetry. Oxygen consumption. Respiratory ratio. Predictive calculations.

Correspondencia:

Dr. Pedro Marsé Milla. Servicio de Medicina Intensiva. Hospital Universitario Son Dureta. C/ Andrea Doria 55. 07015 Palma de Mallorca.
pmarse@telefonica.net

>> INTRODUCCIÓN

La asociación de las ideas calor-vida ha estado siempre en el subconsciente del hombre, pero ha de pasar mucho tiempo hasta que este pensamiento se materializa en técnicas y fórmulas precisas para su aplicación práctica. En 1782, Lavoisier y Laplace introducen el término “caloría” y en 1789, el mismo Lavoisier y Seguin, estudian el consumo de oxígeno (VO_2) en diferentes situaciones y realizan las primeras mediciones del consumo energético por calorimetría directa. Es la demostración científica de la idea clásica: el metabolismo energético humano, produce calor y consume oxígeno; a principio del s. XIX, Auguste Comte, establece: “hemos dicho que se admite hoy en día que la causa del calor animal, es la combustión del hidrógeno y del carbono de la sangre venosa por el oxígeno del aire inspirado”.

La evolución y desarrollo de las técnicas de medición del gasto energético en humanos por calorimetría indirecta (CI), más sencillas y accesibles han desplazado a la calorimetría directa al campo de la investigación o como valoración de los instrumentos para las técnicas de CI. La posibilidad de monitorizar las respuestas metabólicas tanto de pacientes como de sujetos sanos, calcular sus necesidades nutricionales y conocer el tipo de sustratos que utilizan, es un avance clínico reseñable y convierten a las técnicas de CI respiratoria en el patrón oro para el cálculo cotidiano de las necesidades energéticas.

La malnutrición afecta a los pacientes aumentando la mortalidad¹ y la morbilidad (infección nosocomial, peor curación de heridas, disfunción muscular y fallo respiratorio), las intervenciones terapéuticas y la estancia hospitalaria con el aumento de costes que comporta. Pero, la sobrealimentación también aumenta las complicaciones: hiperlipidemia, sobrehidratación, disfunción inmune, disfunción hepática, hiperglucemia, dificultad de desconexión de ventilación mecánica, entre otras. Por esto el uso de la CI para conocer las necesidades reales en cada momento de la evolución de los enfermos, permite optimizar el soporte nutricional (SN) evitando estas complicaciones^{1,2,3,4}.

Al mismo tiempo que se desarrollaban las técnicas de CI, aparecen las fórmulas estimativas o predictivas. Suelen desarrollarse a partir de poblaciones y situaciones específicas. De estas fórmulas, las más difundida y todavía utilizada para el cálculo del gasto energético en una población sana

normal, es la ecuación de Harris-Benedict, que se formuló en 1919⁵ y a partir de la cual se desarrolla una larga serie de formulas (se calculan en más de 200 las existentes) que intentan adaptar los cálculos a grupos concretos de pacientes pero que deben aplicarse teniendo en cuenta sus limitaciones innatas.

>> CALORIMETRÍA TERMINOLOGÍA. COMPONENTES DEL GASTO ENERGÉTICO

La sencilla definición de metabolismo, como proceso en que el sustrato se convierte en energía se complica por la utilización de diferentes términos al definir los componentes del metabolismo energético, que pueden crear situaciones confusas y considerar similares conceptos diferentes; en este apartado trataremos de definir y aclarar los conceptos en base a entender posteriormente los principios de la medición y valoración de la calorimetría indirecta o lo que es lo mismo: evaluar el estado metabólico del sujeto, estimar la oxidación de sustratos y hacer un seguimiento de la respuesta al soporte nutricional.

Forman parte del gasto energético total del individuo: el gasto metabólico basal, la termogénesis inducida por los alimentos, la termogénesis debida al ejercicio físico, así como variaciones en la temperatura corporal en situaciones fisiológicas como la gestación, la lactancia, el crecimiento y el envejecimiento, y en situaciones patológicas, que también son determinantes del gasto energético^{6,7}.

El gasto metabólico basal (GMB)*^{7,8,9} es la energía consumida en reposo en cama por la mañana –despierto–, en ayunas (10-12 h) y en condiciones ambientales confortables (temperatura, luz, ruido,...); es la extrapolación a 24 horas del Índice Metabólico Basal (IMB) que es en realidad, la medición que se hace en las condiciones descritas. El GMB es el principal componente del gasto energético y se expresa en kilocalorías (kcal) en 24 horas. Debido a la dificultad para medir en

* BEE (Basal Energy Expenditure), BMR (Basal Metabolic Rate)

las condiciones habituales el GMB, habitualmente se usa el gasto energético en reposo (GER).

El GER*^{7,8,9} representa el gasto energético mínimo de un sujeto sano, en completo reposo, sin observar

un ayuno estricto de varias horas, por lo tanto se trata del GEB al que hay que añadir la energía resultante del estado de vigilia y del efecto térmico retardado de los alimentos. En general suele ser un 10-20% mayor que el gasto metabólico basal. Se expresa en kcal/día. Las variaciones interindividuales del GER se relacionan con distintos factores como edad, sexo, genéticos, de composición corporal y en menor grado de la actividad nerviosa simpática y el nivel de entrenamiento físico.

El efecto térmico de los alimentos (ETA) o termogénesis inducida por la dieta representa el coste energético debido al consumo de los alimentos. Depende de factores como la cantidad de comida ingerida, la proporción de hidratos de carbono, proteínas y grasas de la dieta, el momento en que se realiza la ingesta y componentes como el café, alcohol y tabaco. El ETA supone un aumento aproximado del 10% en el gasto energético diario. Cuando el aporte del soporte nutricional administrado en perfusión continua por vía enteral o parenteral es similar a las necesidades del GER, solo es responsable de un 3% de incremento en el mismo¹⁰.

El gasto energético total (GET)**^{7,8,9} añadiría al GER, las modificaciones que inducen las actividades corporales, voluntarias o involuntarias. El efecto térmico del ejercicio (ETE) o termogénesis inducida por el ejercicio representa el gasto energético debido a la actividad física que realiza una persona ya sea de forma espontánea o de forma voluntaria. Hay una gran variabilidad que supone un aumento del gasto energético que va desde un 10% en el caso de individuos encamados hasta un 50% en personas más activas. Depende de factores como el sistema nervioso simpático, factores genéticos y de la calidad del entrenamiento físico cuando es voluntario.

Otros componentes del gasto energético lo constituyen el crecimiento o la síntesis de los tejidos, que requieren un coste determinado en función del tipo de tejido en crecimiento (por ejemplo se precisan 12 kcal para sintetizar 1 gr de grasa y 8,7 kcal para 1 gramo de proteínas). También las

hormonas son responsables en parte de modificaciones en el gasto metabólico; estados fisiológicos como el embarazo y la lactancia suponen un aumento del gasto energético diario debido a la síntesis de nuevos tejidos y al aumento del trabajo respiratorio y cardíaco.

Otra situación diferente son los cambios que inducen los diversos estados patológicos que condicionan modificaciones a veces muy importantes en el gasto energético. También hay que tener en cuenta que determinados fármacos^{11,12} o tratamientos ejercen un efecto mensurable en el gasto metabólico. En las Tablas I y II se resumen los factores y los fármacos que influyen modificando el GER medido.

Se ha considerado que el tipo de lesión (trauma, sepsis,...) influye en el gasto energético del paciente crítico, aunque se ha de tener en cuenta que la evolución del tratamiento en la fase aguda de estos enfermos (sedación, ventilación mecánica,...) hace que en esta situación, los pacientes en ventilación mecánica, adecuadamente sedoanalgesiados y con características antropométricas similares (edad, sexo, peso) no difieran en sus necesidades, con independencia de la patología inicial¹³. La presencia de hipertermia, se convierte en estos casos en el principal factor diferencial.

En el aspecto práctico, se debe considerar el llamado gasto energético calculado (GEC), obtenido a partir de fórmulas muy variadas que constituyen un intento de determinación del GEB y del GER, basándose en parámetros diversos y que a veces pueden inducir errores de apreciación importantes. Dado su amplio uso en la práctica cotidiana, se dedicará un apartado para comentar la utilidad de estas fórmulas. Las determinaciones del GER por cualquiera de los métodos calorimétricos se agrupan en el concepto de GER medido (GEm) en contraposición al GEC.

>> MÉTODOS DE MEDIDA

Calorimetría directa

AUMENTAN GER:

- Vasopresores: Catecolaminas, β miméticos
- Teofilina
- Anorexígenos
- Antineoplásicos

DISMINUYEN GER:

- Sedantes

* Resting Energy Expenditure (REE); ** Total Energy Expenditure (TEE); Total Daily Expenditure (TDE)

Es la medición directa de la energía en forma de calor, perdida por un individuo dentro de una cámara de aislamiento, integrando el calor disi-

Tabla II. INFLUENCIA DE LA MEDICACIÓN
SOBRE EL GER

Tabla I. FACTORES QUE MODIFICAN GER

AUMENTAN GER: – Sexo masculino – Crecimiento – Tipo de enfermedad – Fiebre (+ 7% por 1°C) – Dolor – Movimientos patológicos (Contracturas, convulsiones,...) – Medicación (ver Tabla II) – Cuidados y maniobras de enfermería – Sobrealimentación. Nutrición en bolo. – Hiperventilación. Tipo de ventilación mecánica. Desconexión	
DISMINUYEN GER: – Sexo femenino – Edad: envejecimiento – Tipo de enfermedad – Hipotermia (– 7% por 1°C) – Medicación (ver Tabla II) – Desnutrición. Ayuno – Hipoventilación. Ventilación mecánica.	
GER: Gasto energético en reposo	
– Analgésicos (opiáceos) – Betabloqueantes – Relajantes musculares	

pado por varios métodos; radiación, convección, conducción a través de la superficie corporal, evaporación de la piel y pulmones, excreción por la orina y heces.

Es el método más preciso (cuantifica GET) y costoso, actualmente limitado al campo de la investigación, ya que exige un aparataje complejo, un largo tiempo de estabilización y estudio y no puede valorar pacientes en ventilación mecánica ni permite identificar el tipo de nutriente oxidado preferentemente.

Calorimetría indirecta

Método de determinación de las necesidades energéticas de un individuo mediante el cálculo del gasto energético en reposo (GER) como mayor componente del GET. Este método permite estimar el gasto metabólico de forma indirecta mediante el estudio del intercambio gaseoso, midiendo el consumo de O₂ (VO₂) y la producción de CO₂ (VCO₂). Se asume, por lo tanto, que la oxidación de los sustratos consume O₂ y produce CO₂ y H₂O, y que las pérdidas urinarias de Nitrógeno reflejan la oxidación de las proteínas en un organismo.

Es una técnica no invasiva, reproducible y fiable, que a la vez exige una metodología estricta y con unas limitaciones en su uso rutinario que se describen más adelante.

La calorimetría indirecta estaría indicada en situaciones clínicas donde se altera considerablemente el metabolismo energético basal, especialmente el enfermo crítico. También estaría indicada para lograr un balance equilibrado en

sujetos que no responden al aporte nutricional indicado. Y también en enfermos obesos o de edad avanzada, porque son un grupo de población con necesidades energéticas basales distintas. Es también el soporte con el que se validan y elaboran las fórmulas predictivas.

Hay dos tipos de calorimetría indirecta:

1. Calorimetría indirecta circulatoria.

Basada en la determinación del oxígeno en la sangre arterial y venosa mixta, el gasto cardíaco y la hemoglobina^{14,15} y la posterior aplicación de la ecuación de Fick: $GE = GC \times Hb (SaO_2 - SvO_2) \times 95,18$. Varios estudios han demostrado que presenta una buena correlación con la calorimetría ventilatoria en pacientes en condiciones estables y en respiración espontánea^{14,15}; en enfermos cuyo consumo de O₂ está aumentado (estado hiperdinámico) o lesión pulmonar aguda, no es un método válido.

Su inconveniente es, que precisa de la inserción de un catéter de Swan-Ganz para determinar el gasto cardíaco y obtener la muestra de sangre venosa mixta, lo que la convierte en una técnica invasiva. Además tiene la desventaja de que no permite la medición continua del GER y el inconveniente de la acumulación de posibles errores de medida del gasto cardíaco o de laboratorio en la medición de la hemoglobina y la saturación de oxígeno, que influyen en la precisión de las medidas con errores que pueden oscilar entre 2-8%⁷.

2. Calorimetría indirecta ventilatoria.

Mide el intercambio gaseoso mediante la determinación del consumo de O₂ (VO₂) y la producción de CO₂ (VCO₂), junto con las pérdidas de Nitrógeno urinario (NU) que reflejan la oxidación proteica.

De los parámetros indirectos medidos por el calorímetro se obtiene el cálculo del gasto energético en reposo (GER) si aplicamos la fórmula de Weir^{9,16}:

$$\text{GER} = [3.941 (\text{VO}_2) + 1.11 (\text{VCO}_2)] 1.44 - 2.17 (\text{NU})$$

En la práctica clínica es válido el uso de la ecuación abreviada de Weir, ya que las diferencias entre ambas son inferiores al 1- 2%. En la ecuación abreviada de Weir no se incluyen las pérdidas de nitrógeno urinario⁹:

$$\text{GER} = [3.941 (\text{VO}_2) + 1.11 (\text{VCO}_2)] 1.44$$

La utilización de esta técnica, asume que todo el oxígeno inspirado se utiliza completa y rápidamente en el metabolismo oxidativo y que todo el CO₂ medido deriva solo de la oxidación completa de los nutrientes; y, todo el nitrógeno de la oxidación proteica puede ser recogido y medido en la orina.

El principal determinante de la fórmula es el VO₂ (un error de un 5% en su medición va a traducirse en un error del 3,5% en el gasto energético); un error similar en la medida de la VCO₂ solo se deriva en un 1,1% de error en la determinación final. Como ya se ha señalado, un 100% de error en la medición del nitrógeno ureico, solo va a representar una diferencia del 1% por lo que se puede prescindir de su medida.

En la **calorimetría indirecta ventilatoria mediante circuito abierto** el paciente respira aire ambiente o aire mezclado con O₂ a una concentración determinada, a través de una boquilla cerrando la nariz con una pinza, a través de una mascarilla, tubo oro-traqueal/traqueostomía o una caperuza (canopy). El aire espirado se separa del inspirado mediante una válvula unidireccional y se colecta en una bolsa o reservorio a una temperatura y durante un tiempo determinados (Figura 1). Mediante analizadores, se realizan mediciones de la fracción de O₂ y CO₂ en el total del aire espirado regularmente, asumiendo según el principio de Haldane⁶, que la concentración de N₂ en los gases inspirados y espirados permanece constante, y que el O₂ y el CO₂ se intercambian continuamente en el pulmón en función del metabolismo oxidativo. El principal inconvenientes los errores crecientes en la medi-



FIGURA 1. Bolsa de Douglas.

ción de O₂ al incrementar su concentración. Por esto no se consideran fiables mediciones con fracciones inspiradas de oxígeno (FIO₂) superiores a 0,6. Esto constituye una limitación de esta técnica en los grupos de enfermos que suelen ser los más graves.

Si conocemos el volumen de aire inspirado (Vi) y espirado (Ve), la fracción inspirada y espirada de O₂ (FiO₂ y FeO₂) y la fracción inspirada y espirada de CO₂ (FiCO₂ y FeCO₂), podemos calcular el consumo de O₂ (VO₂) y la producción de CO₂ (VCO₂) aplicando los factores de corrección adecuados para la temperatura corporal y la presión de los gases saturados.

$$\text{VO}_2 (\text{l/min}) = (\text{FiO}_2 \times \text{Vi}) - (\text{FeO}_2 \times \text{Ve})$$

$$\text{VCO}_2 (\text{l/min}) = (\text{FeCO}_2 \times \text{Ve}) - (\text{FiCO}_2 \times \text{Vi})$$

Algunos de los sistemas de circuito abierto utilizados en la práctica clínica, son la bolsa de Douglas con una capacidad de 50-250 litros^{6,9}, la bolsa de Lacoste con capacidad de 7-8 litros, y los monitores metabólicos como el Deltatrac y el MCOVX (Datex-Ohmeda, Helsinki).

Estos métodos se pueden emplear tanto en pacientes con respiración espontánea como en ventilación mecánica. La ventaja de estos sistemas es que no aumentan el trabajo respiratorio.

Los inconvenientes son el elevado coste del calorímetro y los errores de medición cuando se emplean FiO₂ elevadas⁹, personal entrenado y tiempo. La bolsa de Douglas es el sistema más antiguo, pero todavía utilizado, que mide O₂ y CO₂ a través de un analizador de gases y requiere personal entrenado en su manejo⁹. El monitor metabólico Deltatrac (Figura 2) es considerado el de mayor

precisión en pacientes críticos, pero tiene un elevado coste y requiere un periodo de calibración de 30 minutos antes de la medición. Integra una cámara mixta para la medición de gases y mediante una técnica de dilución de gases permite minimizar los errores debido a las interferencias en los sensores de flujo y debido al empleo de FiO_2 elevadas. El monitor M-COVX usa un sistema de medición respiración a respiración, es más económico, su calibración es automática y de menor tamaño, pero se le atribuyen defectos de medición en pacientes críticos, al ser muy dependiente del modo de ventilación, especialmente a las fluctuaciones de presión, y al nivel de sedación del enfermo¹⁷.

Los **calorímetros de circuito cerrado** son de diseño más sencillo y baratos. El sujeto respira a través de una válvula de doble flujo que conecta con un sistema de campana, que obtiene un registro de los cambios en el volumen pulmonar de la cámara, volumen que irá disminuyendo a medida que se consume el O_2 de la cámara ya que el CO_2 que se produce, se recoge por un absorbedor de CO_2 . Este registro obtenido permite el cálculo del O_2 consumido. Por lo tanto, estos calorímetros no emplean analizadores de O_2 y las fluctuaciones en la FIO_2 no alteran los resultados, permitiendo mediciones con FIO_2 desde 0,21 a 1¹⁸. Un inconveniente es que estos sistemas aumentan el trabajo respiratorio al menos en un 10%¹⁹ y que, al igual que en los de circuito abierto, no son métodos válidos si hay fugas en el sistema o cambios en el volumen pulmonar. Al carecer de valores de VCO_2 , tampoco puede obtenerse el cociente respiratorio ni de los sustratos oxidados. Estos sistemas, usan una modificación de la fórmula de Weir que sustituye VCO_2 por VO_2 :

$$1,44 \times \text{VO}_2 (3,941 + 1,11 \times \text{CR})$$

El valor del cociente respiratorio (CR) es preasumido; el error es pequeño y no excede al 7 % cuando el CR oscila entre 0,7 y 1 y no pasa del 3,5% cuando se asume un CR de 0,85 de una oxidación de sustratos mixtos^{7,18}.

Existen aparatajes de menor tamaño, portátiles (p.e. Body-Gem[®]), que durante 5-10 minutos son capaces de determinaciones de GER midiendo



FIGURA 2. Dispositivo para la medición del Gasto Energético: Deltatrac.

VO_2 , ventilación, humedad, temperatura y presión, a través de una boquilla o mascarilla; actúa con un CR prefijado de 0,85 y la fórmula de Weir modificada: Pueden aplicarse en sujetos sanos y en el manejo de trastornos de peso corporal, aunque teniendo en cuenta los sujetos de estudio; existen trabajos que no validan estos métodos en una población de ancianos sanos^{20,21}.

La decisión de elegir un determinado sistema y equipo, viene dado en primer lugar por la disponibilidad económica, pero deben tenerse en cuenta factores como: facilidad de manejo y limpieza, posibilidad de interacción con los respiradores disponibles, rapidez de calibrado, las prestaciones del software incorporado y su tamaño, facilidad de transporte y de almacenamiento.

Condiciones de exploración, preparación del paciente y utillaje

Condiciones y preparación del calorímetro. El sistema debe pasar una fase de calentamiento o puesta a punto de varios minutos, según el modelo, para posteriormente proceder a la calibración (ya se manual o automática) del neumotacógrafo y de los analizadores de gases (generalmente con FiO_2 0,21%).

Preparación del paciente y condiciones de exploración^{22,23}

Las condiciones que pueden afectar la validez de la medición de la CI ventilatoria son múltiples; el cumplimiento de estas condiciones es más difícil cuanto más grave e inestable está el paciente, dándose la paradoja que aquellos pacientes que más se beneficiarían de un estricto control de sus necesidades nutricionales, son los que más dificultades encuentran para obtener un seguimiento

fiable; existen trabajos que sitúan el porcentaje de pacientes críticos en que es muy difícil una correcta medición de la CI en un 43%²⁴. Las principales condiciones de exploración, son:

- El paciente debe permanecer en reposo en decúbito supino por lo menos 30 min antes de la realización de la calorimetría indirecta. Si se trata de un sujeto en régimen ambulatorio y ha realizado ejercicio moderado se esperará al menos 2 horas y hasta 14 horas tras un ejercicio vigoroso.
- En los pacientes con nutrición oral, o soporte nutricional enteral o parenteral intermitentes deben pasar por lo menos 2 horas desde la última ingesta o cese de la nutrición.
- La ingesta de alcohol o nicotina debe suprimirse desde 2 horas antes y la de cafeína desde 4 horas⁹.
- En pacientes con nutrición continua no modificar el ritmo de infusión ni la composición durante el estudio ni durante las 12 horas previas al estudio. La influencia metabólica de una nutrición continua es mínima, en el resto se observarán las normas de ayuno previo⁹.
- El ambiente debe ser tranquilo y con una temperatura neutra (20-25°C); todas las mediciones deben ser registradas en la misma posición.
- La FiO₂ debe permanecer constante durante todo el estudio.
- Durante el estudio es normal que el paciente presente actividad muscular voluntaria, sobretodo movimiento de extremidades. Si el paciente tiene dolor o está agitado o con actividad muscular patológica, y si no está previamente sedoanalgesiado, administrar sedantes/analgésicos al menos 30 min antes del estudio.
- Comprobar que no hay fugas en el sistema. Tampoco debe existir una fístula broncopleuraleal ni fugas por drenajes torácicos. No deben emplearse aerosoles durante la exploración.
- Si es preciso algún cambio en los parámetros respiratorios el estudio debe ser pospuesto durante 90 min.

- Si es preciso introducir o alterar dosis de drogas vasoactivas por inestabilidad hemodinámica, posponer la exploración al menos por dos horas.
- Previo al estudio el paciente no debe haber recibido anestesia general, por lo menos en las 6-8 horas anteriores.
- En pacientes en hemodiálisis la medición debe posponerse hasta 3-4 horas después de la sesión; también hay que considerar cualquier otra alteración posible en el pool de CO₂: infusión de bicarbonato o pérdidas renales o digestivas o administración de acetazolamida.
- Tras un procedimiento doloroso esperar al menos 1 hora antes de la realización de la calorimetría.
- Los cuidados de enfermería o exploraciones de rutina deben evitarse durante la realización del estudio. Las maniobras de cuidados básicos o exploraciones, suponen grandes cambios en el GER, que oscilan entre el 10-15% (exploración física, Rx de tórax,...) y el 35% (fisioterapia, aseo,...); aunque el impacto acumulativo es mínimo por su carácter transitorio y no alcanzan el 10% en el cómputo global diario¹⁹.
- VO₂ y VCO₂ deben expresarse en condiciones constantes (STPD) para neutralizar los efectos de temperatura, humedad o presión sobre los gases
- Las mediciones obtenidas durante el estado de equilibrio o fase estable del paciente serían representativos del GER de 24 horas.

Se define el estado metabólico de equilibrio como aquel intervalo de 5 min en los cuales las variaciones en el VO₂ y el VCO₂ son inferiores al 10% y los cambios en el cociente respiratorio son inferiores al 5%²⁵⁻²⁸.

En la Tabla III, se resumen los factores que más habitualmente afectan a la precisión en la medición del gasto energético por calorimetría indirecta.

>> COCIENTE RESPIRATORIO (CR)

El **agua doblemente marcada** usa dos isótopos: deuterio (^2H) y ^{18}O , que midiendo el intercambio de agua, entre $^2\text{H}_2\text{O}$ y H_2^{18}O y la VCO_2 , permite calcular el gasto energético, medir el agua corporal y a través de ella, la composición corporal.

Mide el gasto energético a medio plazo (alrededor de

Tabla III. FACTORES QUE AFECTAN A LA PRECISIÓN EN CI RESPIRATORIA

- | |
|--|
| – $\text{FIO}_2 > 0,6$. PEEP $> 12 \text{ cm H}_2\text{O}$ |
| – Inestabilidad de FIO_2 |
| – Presencia de gases diferentes de O_2 , CO_2 , N_2 : Anestésicos inhalados |
| – Presencia de vapor de agua |
| – Hiper/Hipoventilación o cambios en compartimentos de CO_2 (diálisis) |
| – Cambios de parámetros respiratorios |
| – Fugas en el sistema |
| – Errores de calibración |

La relación entre VO_2 y VCO_2 ($\text{CR} = \text{VCO}_2 / \text{VO}_2$) que se obtiene de la medición de la CI, permite estimar los sustratos utilizados. La oxidación completa de la glucosa tiene un CR de 1 y la de los lípidos 0,7, con valores intermedios para las proteínas (0,83). La desviación del CR por encima de la unidad representa una mayor síntesis grasa, que podría atribuirse a un exceso de aporte de hidratos de carbono y la desviación del límite inferior, sería expresión de lipólisis. Un CR medido en condiciones adecuadas, sería una ayuda para planificar el soporte nutricional en proporción y calidad de nutrientes.

El CR es un test indirecto de calidad de los estudios calorimétricos, si manteniéndose en el rango normal (0,67-1,3) es consecuente con el aporte de nutrientes^{6,12,23}.

>> MÉTODOS NO CALORIMÉTRICOS

Existen otros métodos para la medición del gasto energético basados en determinaciones fisiológicas o diferentes registros, que no pueden competir con las técnicas de CI sobre todo cuando se practican en sujetos enfermos; únicamente, una técnica de dilución isotópica es de uso actual:

dos semanas), por lo que no es útil en pacientes agudos y al medir solo VCO_2 , incrementa la posibilidad de error en los cálculos, estos inconvenientes, unidos a su coste, limitan su uso en patologías agudas⁷.

De modo experimental, se estudia la cinética del ^{13}C en el CO_2 espirado, tras la administración oral de bicarbonato sódico marcado con ^{13}C ²⁹.

Medidores portátiles (SWA[®]) colocados con una banda sobre el tríceps, monitorizan parámetros fisiológicos: flujo de calor, temperatura de la piel,... y movimientos (acelerómetros), deduciendo el gasto energético, pero comparados con la CI, en sujetos sanos y en obesos, han mostrado una pobre concordancia para su uso en la práctica clínica³⁰. El uso de otros tipos de monitores de actividad, asociados a cuestionarios de actividad física, exige más estudios comparativos para adoptar su uso cotidiano.

La mayor parte de sistemas no calorimétricos, aunque ideados en busca de una mayor accesibilidad y comodidad, precisan validaciones más estrictas para incluirlos en los métodos habituales de medida del gasto energético.

>> FÓRMULAS PREDICTIVAS

Incluso antes de que los sistemas de CI entraran en la práctica clínica rutinaria, se empiezan a desarrollar las fórmulas o ecuaciones predictivas para el cálculo del gasto energético. Las múltiples fórmulas existentes (se calculan en más de 200), los parámetros usados, los grupos a quien se aplican y su validación, merecen una específica y extensa revisión; pero no se puede tratar sobre calorimetría, sin abordar de un modo genérico sus relaciones con las determinaciones medidas.

La razón principal para avalar el uso de fórmulas predictivas, es su facilidad (más relativa en las ecuaciones más reciente y complejas), su nulo coste (no precisan utillaje ni personal) y su disponibilidad en cualquier momento. En contra, tienen que al tratarse de unas formulaciones muy estáticas, no pueden captar todas las circunstancias que influyen cuando se efectúa la medición por CI y los otros cambios en el gasto energético de los pacientes.

La primera consideración a hacer, es el tipo de población sobre la que se elabora la fórmula; que nos puede orientar sobre quienes aplicarla y sus posibles debilidades. Las primeras ecuaciones, se elaboraban generalmente en poblaciones sanas y sobre datos antropométricos: sexo, edad, peso y talla; en la actualidad, su aplicación ya puede comportar una serie de desviaciones: en un reciente trabajo⁹, se señala la diferencia existente entre la población sobre la que en 1919 se elaboró la ecuación –todavía la más usada–, de Harris-Benedict⁵ y la población estadounidense de 2002: el IMC de las mujeres ha pasado de 21,5 kg/m² a 28 kg/m² y en los hombres de 21,7 kg/m² a 28 kg/m². Su elaboración sobre grupos concretos y en situaciones clínicas concretas hace inexacta cualquier extrapolación a otros grupos o situaciones, o su generalización³¹.

Intentando considerar aquellas circunstancias que hacían que cuanto más inestable estaba un paciente, más difícil era la validación con el GERm, se elaboran modificaciones como la de Long³², para compensar estas diferencias, multiplicando la ecuación de Harris-Benedict por unos factores de actividad y de agresión. Estos factores que clasificaban la patología del paciente de un modo muy general, subjetivo y estático, no consideraban los cambios en la evolución clínica y el tratamiento, y variaciones publicadas posteriormente sobre los mismos³³, han sido utilizadas durante mucho tiempo en unidades clínicas que carecen de acceso a la

determinación del GER por CI, sobrevalorando por lo general las necesidades del paciente.

Las fórmulas predictivas generan controversias en la introducción de determinados datos antropométricos; el peso a considerar en el caso del sujeto obeso, se somete a su vez a sub-fórmulas que relacionan el peso actual con el peso ideal, lo cual puede inducir a su vez un nuevo factor de error³⁴. Tampoco existe un consenso sobre el efecto metabólico que pueden ejercer los cambios de peso ligados a la sobrehidratación y al agua extracelular (ascitis,...) sobre el gasto energético³⁵. En sujetos enfermos, las fórmulas de elaboración más reciente, incluyen una serie de parámetros más dinámicos (fiebre, volumen minuto del respirador,...) que intentan evolucionar en el cálculo de necesidades, con la situación clínica del paciente y que se validan con la medición de CI y su uso, pero siempre en función de que se apliquen al grupo y situación concretas^{24,36-38}. En la Tabla IV se recogen los parámetros utilizados en algunas de las ecuaciones más utilizadas.

A pesar de ello y de la asunción en la literatura de que las diferencias entre el GERm y el GERc, que se consideran aceptables son de un $\pm 10\%$ en sujetos normales, existen publicadas variaciones desde el 0,3 hasta el 23,5%³¹. En tipo de paciente tan concreto como es el traumatismo craneal, el nivel metabólico, expresado como porcentaje del GERm en relación a los valores deducidos de la fórmula de Harris-Benedict y sus modificaciones, oscila en los distintos estudios desde el 86% a más del 200%, aceptándose en la actualidad como más reales, valores alrededor del 120-130% en la fase aguda³⁹.

Muchas unidades de críticos que carecen de medición de CI y ante la múltiple y dispar utilización de las fórmulas predictivas, utilizan la recomendación de aportar 25 kcal/kg de peso/día^{40,41} que se puede aumentar hasta 30 kcal/kg de peso/día en fases de retirada de ventilación mecánica o de sedación; la Sociedad Americana de Nutrición Parenteral y Enteral, sugiere también para pacientes catabólicos aportes de 25-30 kcal/kg de peso/día⁴².

La disyuntiva entre GERm y GERc en el manejo nutricional del individuo sano y enfermo, se mantiene actual⁴³, pese a la evolución de los modernos calorímetros, más sofisticados, transportables y con mejores programas informáticos, que siguen teniendo en su contra su coste y disponibilidad. La facilidad de uso y la diversidad actual de las fórmulas predictivas tiene en

contra, que al partir del concepto de que la respuesta metabólica de los pacientes es predecible y uniforme ante un proceso patológico dado, llevan en si mismas la posibilidad de error por la gran variabilidad personal ante el mismo proceso y la multitud de posibles complicaciones.

Una alternativa intermedia, puede plantearse utilizando la fórmula que a criterio del clínico parezca la más adecuada en cada caso, complementada con los datos que puede aportar el laboratorio (prealbúmina, transferrina, etc.), reservando el uso de la calorimetría medida para aquellos pacientes que no muestran mejoría de sus

Tabla IV. FÓRMULAS PREDICTIVAS

Autor	Año	Parámetros
Harris-Benedict *	1919	Sexo, edad, peso; talla
Owen *	1980	Sexo, peso
FAO-OMS *	1985	Sexo, edad, peso
Mifflin-St.Jeor *	1990	Sexo, edad, peso, talla
Swinamer **	1990	Superficie corporal, edad, temperatura, frecuencia respiratoria, volumen espirado
Ireton-Jones **	1992	Edad, peso, sexo, trauma, quemado
Frankenfield **	1994	GEB, volumen minuto, sepsis, temperatura, dobutamina
Penn-State **	1998	GEB, volumen minuto Temperatura máxima
Faisy **	2003	Peso, altura, volumen minuto, temperatura

* Elaborada en individuos sanos, sin patología
 ** Elaborada en individuos enfermos, basadas en patología.
 GEB: Gasto energético basal (Harris-Benedict x factor)

La CI proporciona además de su fiabilidad y especificidad en cada caso estudiado, la posibilidad de modular la composición de la dieta gracias al CR.

parámetros nutricionales con el tratamiento; a los que por su proceso se prevea que el GERc no será fia-

Es, sin embargo, difícil atribuir directamente las ventajas económicas ligadas a un mejor uso del soporte nutricional (disminución de infecciones, de estancias hospitalarias, etc...) como justificante del aumento de coste del utillaje y manejo de la CI ventilatoria.

BIBLIOGRAFÍA

ble o que presenten problemas en su evolución (dificultad de desconexión del respirador,...) y que pueden estar relacionados con la cantidad y calidad del soporte nutricional que reciben.

1. Faisy C, Lerolle N, Dachraoui F et al. Impact of energy deficit calculated by a predictive method on outcome in medical patients requiring prolonged acute mechanical ventilation. *Brit J Nutr.* 2008; 9: 1-9.
2. Rubinson L, Diette GB, Song X, Brower R, Krishnan JA. Low caloric intake is associated with nosocomial bloodstream infections in patients in the medical intensive care unit. *Crit.Care Med.* 2004; 32: 350-357.
3. Liposky JM, Nelson LD. Ventilatory response to high caloric loads in critically ill patients. *Crit. Care Med* 1994; 22: 796802.
4. Talpers SS, Romberger DJ, Bunce SB, Pingleton SK. Nutritionally associated increased carbon dioxide production. Excess total calories vs high proportion of carbohydrate calories. *Chest* 1992, 102: 551-555
5. Harris JA, Benedict FG. Biometric studies of basal metabolism in man. Carnegie Institute of Washington. Washington DC. Publication 279, 1919.
6. Moreira da Rocha EE, Alves VGF, Fonseca RBV. Indirect calorimetry: methodology, instruments and clinical application. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care* 2006; 9: 247-256.
7. García de Lorenzo A, Álvarez J. Requerimientos energéticos en situaciones patológicas, en Tratado de nutrición Tomo IV. A. Gil ed. Acción Médica. Madrid 2005. pp. 29-52.
8. A. García de Lorenzo. Diccionario de metabolismo y nutrición. 2007. LID editorial. Madrid. p. 189.

9. Haugen HA, Chan LN, Li F. Indirect calorimetry: A practical guide for clinicians. *Nutr Clin Pract.* 2007; 22: 377-388.
10. Raurich JM, Ibáñez J, Marsé P. Producción de CO₂ y termogénesis inducidas por la nutrición enteral y parenteral. *Nutr. Hosp.* 1996; 11: 108-113.
11. Dickerson RN, Roth-Yousey L. Medication effects on metabolic rate: A systematic review (Part 1). *J Am Diet Assoc.* 2005; 105: 835-843.
12. Dickerson RN, Roth-Yousey L. Medication effects on metabolic rate: A systematic review (Part 2). *J Am Diet Assoc.* 2005; 105: 1002-1009.
13. Raurich JM, Ibáñez J, Marsé P, Riera M, Homar X. Resting energy expenditure during mechanical ventilation and its relationship with the type of lesion. *JPEN* 2007; 31: 1-5.
14. Raurich JM, Ibáñez J. Gasto energético en reposo: calorimetría indirecta frente a Fick. *Nutr Hosp.* 1998; 13: 303-308.
15. Brandi LS, Grana M, Mazzanti T, Giunta F, Natali A, Ferrannini E. Energy expenditure and gas exchange measurements in postoperative patients: thermolulution versus indirect calorimetry. *Crit Care Med* 1992, 20: 1273-1283.
16. Weir JBV. New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. *J Physiol (Lond)* 1949 ; 109: 1-9.
17. Singer P, Pogrebetsky I, Attal-Singer J, Cohen J. Comparison of metabolic monitors in critically-ill ventilated patients. *Nutrition* 2006; 22: 1077-1086.
18. Raurich JM, Ibáñez J, Marsé P. Validation of a new closed circuit indirect calorimetry method compared with the open Douglas bag method. *Intensive Care Med.* 1989; 15: 274-278.
19. McClave SA, Zinder HL, Greene L et al. Effective utilization of indirect calorimetry during critical care. *Intensive Care World* 1992; 9: 194-200.
20. Nieman DC, Trone GA, Austin MD. A new handheld device for measuring resting metabolic rate and oxygen consumption. *J Am Diet Assoc.* 2003; 103: 588-593.
21. Fares S, Miller MD, Masters S, Crotty M. Measuring energy expenditure in community-dwelling older adults: Are portable methods valid and acceptable? *J Am Diet Assoc.* 2008; 108: 544-548.
22. Compber C, Frankenfield D, Keim N, Roth-Yousey L, and Evidence Analysis Working Group. Best practice methods to apply to measurement of resting metabolic rate in adults: A systematic review. *J Am Diet Assoc.* 2006; 106: 881-903. 23. AARC Clinical Practice Guidelines. Metabolic measurement using indirect calorimetry during mechanical ventilation. 2004 revision and update. *Resp Care* 2004; 49: 1073-1079.
24. Faisy C, Guerot E, Diehl JL, Labrousse J, Fagon JY. Assessment of resting energy expenditure in mechanically ventilated patients. *Am J Clin Nutr.* 2003; 78: 241-249.
25. Cunningham KF, Aeberhardt LE, Wiggs BR, Phang PT. Appropriate interpretation of indirect calorimetry for determining energy expenditure of patients in intensive care units. *Am J Surg.* 1994; 167: 547-549.
26. Marsé P, Raurich JM, Homar X, Riera M, Ibáñez J. Calorimetría indirecta en el enfermo crítico: Validez de la medición durante 10 minutos. *Nutr Hosp.* 2004; 19: 95-98.
27. McClave SA, Spain DA, Skolnick JI et al. Achievement of steady state optimizes results when performing indirect calorimetry. *JPEN*, 2003; 27: 16-20.
28. Frankenfield DC, Saison GY, Cooney RN, Smith JS. Validation of a 5-minutes steady state indirect calorimetry protocol for resting energy expenditure in critically-ill patients. *J Am Coll Nutr.* 1996 15: 397-402.
29. Junghans P, Jentsch W, Derno M. Non-invasive ¹³C bicarbonate tracer technique for measuring energy expenditure in men: A pilot study. *Clin Nutr.* 2008; doi 10.1016/j.clnm.2008.01.001.
30. Bertoli S, Posata A, Battezzati A, Spadafranca A, Testolin G, Bedogni G. Poor agreement between a portable armband and indirect calorimetry in the assessment of resting energy expenditure. *Clin Nutr.* 2008; 27: 307-310.
31. Moreira da Rocha EE, Alves VGF, Silva MHN, Chiera CA, Fonseca RBV. Can measured resting energy expenditure be estimated by formulae in daily clinical nutrition practice? *Curr Opin Clin Nutr Metab Care* 2005; 8:319-328.
32. Long CL, Blakemore WS. Energy and protein requirements in the hospitalized patient. *JPEN* 1979; 3: 69-71.
33. Boullata J, Williams J, Cottrell F, Hudson L, Compber C. Accurate determination of energy needs in hospitalized patients. *J Am Diet Assoc.* 2007; 107: 393-401.

34. Ireton-Jones C. Adjusted body weight, con: Why adjust body weight in energy-expenditure calculations? *Nutr Clin Pract.* 2005; 10: 474-479.
35. Dolz C, Raurich JM, Ibáñez J, Obrador A, Marsé P, Gayá A. Ascites increases the resting energy expenditure in liver cirrhosis. *Gastroenterology* 1991; 100: 738-734.
36. Raurich JM, Ibáñez J, Marsé P, Velasco J, Bergadá J. Energy expenditure in patients with multiple organ failure. *Clin Nutr.* 1997; 16: 307-312.
37. Savard JF, Faisy C, Lerolle N, Guerot E, Diehl JL, Fagon JY. Validation of a predictive method for an accurate assessment of resting energy expenditure in medical mechanically ventilated patients. *Crit Care Med.* 2008; 36: 1175-1183.
38. Frankenfield D, Hise M, Malone A, Russell M, Gradwell E, Compher C. Prediction of resting metabolic rate in critically ill adult patients: results of a systematic review of the evidence. *J Am Diet assoc.* 2007; 107: 1552-1561.
39. Raurich JM, Ibáñez J. Metabolic rate in severe head trauma. *JPEN* 1994; 18: 521-524.
40. Cerra FB, Benítez MR, Blackburn GL et al. Applied nutrition in ICU patients: A consense statement of the American College of Chest Physicians. *Chest* 1997; 111: 769-778.
41. Ortiz-Leyba C, Gómez-Tello V, Serón C. Requerimientos de macronutrientes y micronutrientes. *Nutr Hosp.* 2005; 20: 13-17.
42. ASPEN Board of the Directors and the Clinical Guidelines Task Force. Guidelines for the use of parenteral and enteral nutrition in adult and pediatric patients. *JPEN* 2002; 26(S) 1SA-138 SA.
43. Davis KA, Kinn T, Esposito TJ, Reed RL, Santaniello JM, Luchette T. Nutritional gain versus financial gain: the role of metabolic carts in the surgical ICU. *J Trauma* 2006; 61: 1436-1440.