

Efecto del tempol en la preeclampsia experimental

Effect of tempol in experimental preeclampsia

ELSA CAMACHO, JOSÉ ANTONIO SILVA Y ANITA ISRAEL*

Resumen

La preeclampsia (PE) es un trastorno multisistémico del embarazo caracterizado por hipertensión, proteinuria y edema, que se asocia con la disfunción endotelial generalizada y el estrés oxidativo. En el embarazo normal, los mecanismos de vasodilatación sugieren que el óxido nítrico (ON) es el más importante mediador en la reducción de la resistencia vascular, mientras que en la PE la respuesta dilatadora dependiente de endotelio y mediada por el ON se encuentra reducida. Se ha demostrado que la inhibición de la síntesis del ON mediante la administración crónica de L-NAME en ratas preñadas, resulta en un modelo animal que ocasiona un síndrome similar a la PE, el cual cursa con hipertensión, proteinuria, trombocitopenia y retardo de crecimiento intrauterino. En el presente estudio caracterizamos las alteraciones renales que ocurren durante la PE experimental, para lo cual empleamos el modelo animal de preeclampsia inducido por la inhibición de la síntesis de óxido nítrico, en ratas de 13 días de gestación. Se cuantificó la posible alteración en la actividad de las enzimas antioxidantes como la catalasa (CAT), superóxido dismutasa (SOD) y glutatión peroxidasa (GPx) renal. El tratamiento crónico con L-NAME en ratas preñadas incrementó la PAM (+20 mmHg), produjo proteinuria, redujo el peso promedio de los fetos, sin embargo no alteró significativamente el número de ellos. El estudio histológico de los riñones de animales pre-eclámpicos mostró que los mismos presentan tumefacción turbia de epitelios tubulares, focos hemorrágicos y congestión de capilares glomerulares. La inhibición de la sintasa del óxido nítrico en las ratas preñadas redujo la actividad de las tres enzimas antioxidantes evaluadas. El tratamiento crónico con tempol, un compuesto que mimetiza a la actividad de la SOD, previno el incremento de la presión arterial, la proteinuria, la evidencia morfológica de endoteliosis glomerular, la reducción del peso de feto y la disminución de la actividad de las enzimas antioxidantes inducida por el L-NAME en ratas preñadas. Estos hallazgos sugieren que la PE experimental cursa con alteración de la función renal asociada a la reducción de la actividad antioxidante. Igualmente indican que estas acciones están mediadas por un incremento de la producción de especies reactivas de oxígeno, por lo que el uso terapéutico de los antioxidantes como estrategia farmacológica en la preeclampsia parece ser prometedor.

Palabras clave: preeclampsia, tempol, catalasa, superóxido dismutasa, glutatión peroxidasa.

Abstract

Preeclampsia (PE) is a multisystem disorder of pregnancy characterized by hypertension, proteinuria and edema. PE is associated with endothelial dysfunction, oxidative stress and decreased endothelial nitric oxide synthase activity. The mechanisms of normal pregnancy-associated vasodilatation suggest that nitric oxide (NO) is the most important mediator for the reduction of vascular resistance. Many studies demonstrated reduction of endothelium-dependent dilator response mediated by NO in PE. Inhibition of NO synthesis is an animal model which results in a PE-like syndrome such as hypertension, proteinuria, thrombocytopenia and intrauterine growth retardation. In order to assess the possible renal alteration in this animal model of preeclampsia induced by chronic administration of L-NAME, we determined the activity of three antioxidant enzymes: catalase, superoxide dismutase and glutathione peroxidase in the rat kidney. Chronic L-NAME treatment in pregnant rats increased MAP (+20 mmHg), produced proteinuria, reduced fetuses mean weight, while did not change their number. Histological examination of the kidneys showed cloudy swelling PE tubular epithelia, hemorrhagic foci and congestion of glomerular capillaries. Likewise, inhibition of ON synthesis reduced CAT, SOD, GPx activity in the kidney. Tempol treatment blunted hypertension, proteinuria, reduction in fetus weight, morphological evidences of endotheliosis and decreased antioxidant enzyme activity induced by L-NAME in pregnant rats. These findings suggest that in experimental preeclampsia, renal alterations are associated with a reduction in the antioxidant enzyme activity. In addition, they suggest a role of reactive oxygen species production in renal dysfunction indicating the possible use of antioxidants as a therapeutic tool in preeclampsia.

Key words: preeclampsia, tempol, catalase, superoxide dismutase, glutathione peroxidase.

Laboratorio de Neuropeptidos. Facultad de Farmacia. Universidad Central de Venezuela. Caracas - Venezuela.

* Correspondencia: Apartado Postal 50176, Sabana Grande 1050A, Caracas, Venezuela. E-mail: astern88@gmail.com
teléfonos: 0414-121-0405, oficina: 605-2689; hogar: 9790025.

Introducción

La preeclampsia se considera como un desorden hipertensivo que ocurre principalmente por una mala adaptación placentaria, que involucra disfunción endotelial y que afecta consistentemente al riñón (Shah, 2005). La génesis del proceso reside, probablemente, en una implantación anómala del trofoblasto placentario mediado por mecanismos inmunológicos y quizás genéticos. Esto provoca hipoperfusión útero-placentaria, la cual favorece a la liberación de sustancias citotóxicas que lesionan difusamente al endotelio causando disfunción endotelial y vasoconstricción generalizada (riñón, cerebro, hígado, etc), así como activación de la cascada de la coagulación. Además se produce la activación del sistema nervioso simpático y el desequilibrio entre la síntesis de sustancias vasodilatadoras (prostaciclina y óxido nítrico) y vasoconstrictoras (tromboxano A_2 y endotelina), desviándose el equilibrio hacia estas últimas (Seligman y col., 1994; Lyall y Greer, 1996; Silver y col., 1996; Dekker y Sibai, 1998; Clambers y col., 2001; Roberts y Cooper, 2001; Pacheco, 2003).

Además de la liberación de sustancias vasoactivas y angiogénicas, como la angiotensina II, se liberan sustancias como el anticuerpo anti-receptor AT_1 (AT_1 -AA) y de un antagonista del factor de crecimiento endotelial vascular (VEGF) el sFlt-1 (*placental soluble fms-like tyrosine kinase 1*). Este último, al reducir los niveles circulantes del VEGF y del factor de crecimiento placentario (PIGF), contribuyen a la hipertensión, la disfunción endotelial y al daño renal (Bank y col., 1998; Tsatsaris y col., 2003). Aún más, el predominio de la liberación de sustancias vasoactivas que ocurre en la placenta, a su vez favorece a la activación de vías intrínsecas y extrínsecas de la coagulación, y con ello se genera incremento de tromboxanos, citoquinas, factor de necrosis tumoral que afecta también la integridad endotelial vascular.

Como consecuencia al daño endotelial que ocurre en los vasos sanguíneos, se produce un incremento del estrés oxidativo y por ende de la producción de especies reactivas de oxígeno (ERO), lo cual conlleva a un aumento de la reactividad vascular a la angiotensina II periférica y al daño renal (Shah, 2005). Otro de los factores que influyen en el daño renal en la preeclampsia, es la disminución de la actividad de las enzimas antioxidantes SOD y GPX placentarias, a los altos niveles de malonil-dialdehído (MDA) (producto final de peroxidación lipídica), al incremento de tromboxanos y lipoperóxidos. Por ello, la desregulación funcional está asociada a una baja protección oxidativa que favorece a la insuficiencia renal (Balal y col., 2003).

La disfunción endotelial en el riñón en la preeclampsia se manifiesta por disminución del flujo plasmático renal (FPR) y de la tasa de filtración glomerular (TFG), presencia de proteinuria que puede estar en rango nefrótico, así como también evidencia morfológica de endoteliosis glomerular (Munkhaugen y Egil, 2009). La evidencia indica que durante el embarazo normal existe una adaptación fisiológica vascular, que comprende un incremento en el volumen sanguíneo, un aumento del gasto cardíaco y una disminución de la resistencia periférica vascular, acompañada de un incremento endógeno en la producción de óxido nítrico (ON), y un aumento en la respuesta vascular dependiente del endotelio intacto (Buhimschi y col., 1998). Actualmente no existen dudas que el incremento de la producción de ON en el endotelio vascular y su biodisponibilidad normal constituyen mecanismos críticos que explican la adaptación hemodinámica en el embarazo normal (López-Jaramillo y col., 2008).

Ahora bien, la característica más importante observada en la preeclampsia es la vasoconstricción generalizada. Debido a ello, se ha propuesto la existencia de una alteración en la síntesis de ON endotelial. En efecto, se ha demostrado que durante la preeclampsia ocurre una disminución de la concentración de nitratos y nitritos, asociada a disminución de los niveles de GMPc, cuando se compara con pacientes controles. Además, existe una disminución de la biodisponibilidad del ON, posiblemente mediado por la acumulación de la dimetilarginina asimétrica (ADMA), un inhibidor endógeno de la sintasa de óxido nítrico endotelial (Slaghekkee y col., 2006), al posible incremento de la actividad arginasa endotelial (Demougeot y col., 2005) y a un incremento del estrés oxidativo responsable de la rápida degradación del ON, especialmente debido a su gran reactividad con el anión superóxido para formar peroxinitrito, lo cual explicaría la vasoconstricción periférica, la disfunción endotelial y las manifestaciones clínicas de la enfermedad (López-Jaramillo y col., 2008).

Debido a la fuerte evidencia que indica el papel primordial del ON y su desregulación en la preeclampsia, se generó un modelo experimental que resulta de la inhibición crónica de la síntesis de ON mediante la administración de L-NAME a ratas preñadas. En este modelo los animales desarrollan hipertensión, y cambios fisiológicos como la potenciación de la respuesta presora a la angiotensina II, vasopresina y noradrenalina, proteinuria e incremento de la agregación plaquetaria, similar a los cambios que ocurren en la preeclampsia humana (Molnar y Hertelendy, 1992). El tratamiento con L-NAME en ratas preñadas produce disfunción renal, vasoconstric-

ción en las arterias renales, y una disminución en la tasa de filtración glomerular, alteraciones en la placenta y trombosis en los vasos sanguíneos. De manera que la reducción de la síntesis óxido nítrico en ratas preñadas desarrolla un buen modelo de preeclampsia muy similar a la preeclampsia desarrollada en humanos (Pandhi y col., 2001).

En la actualidad se conocen algunas de las generalidades de este modelo experimental, sin embargo aun no se ha caracterizado la contribución relativa del estrés oxidativo y de la actividad de las enzimas antioxidantes en la alteración de la función renal en este modelo de preeclampsia.

Materiales y métodos

ANIMALES Y PROTOCOLOS DE EXPERIMENTACIÓN

Como animales de experimentación se utilizaron ratas hembras primigestas, de la cepa Sprague-Dawley, de 12-13 semanas de edad, provenientes del Bioterio del Instituto de Medicina Experimental (Caracas), mantenidas bajo libre acceso al agua y a la comida (Ratarina®) hasta el momento del experimento. Después del apareamiento, la presencia del espermatozoide en el frotis vaginal marca el día 1 de la gestación. A partir del día 13 de la gestación, los animales se distribuyeron aleatoriamente en cuatro grupos. Los animales del grupo I que recibieron una dosis de 50 mg/kg/día de N-nitro-L-arginina (L-NAME) administrada por vía intraperitoneal, durante 7 días. El grupo II recibió solo vehículo (solución fisiológica). El grupo III recibió tempol (20 mg/kg/día, i.p.) durante 7 días y el grupo IV recibió el tratamiento combinado de L-NAME+tempol durante 7 días. Todos los animales fueron pesados dos veces a la semana y se les determinó la presión arterial sistólica, diastólica y frecuencia cardíaca.

Al día 20 de la gestación, los animales fueron colocados en jaulas metabólicas individuales para la recolección de orina de 24 horas. Inmediatamente después de la recolección de las muestras de orina los animales fueron sacrificados por decapitación, se recolectaron muestras del riñón y fetos los cuales fueron colocadas inmediatamente en hielo. Los fetos fueron cuantificados y pesados y las cortezas renales fueron homogenizadas y congeladas a -20 °C, hasta su utilización en los ensayos respectivos.

Los procedimientos empleados en los experimentos fueron sometidos para su aprobación, al Comité de Bioterio de la Facultad de Farmacia, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. Todos los experimentos fueron realizados siguiendo las buenas prácticas para el manejo de animales de laboratorio (NIH Guide, 1996).

DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN ARTERIAL (PA) Y DE LA FRECUENCIA CARDÍACA (FC)

Para la determinación de la PA (PAS y PAD) y FC se utilizó el método indirecto no invasivo mediante el empleo de un pletismógrafo digital de cola (Digital Pressure Meter LE 5000, LETICA y el Pressure Cylinder LE 5100, LETICA® Scientific Instruments, Barcelona, España). Para ello, las ratas fueron calentadas en una estufa graduada a 42 °C durante 15 minutos, y luego colocados en un cepo para la determinación no invasiva de los parámetros cardiovasculares. Estos fueron determinados a la misma hora del día durante los períodos de entrenamiento y del experimental. La PAM fue calculada de acuerdo a la fórmula: $PAD + 1/3(PAS - PAD)$.

CUANTIFICACIÓN DE LA EXCRECIÓN URINARIA DE PROTEÍNAS

Se empleó el método colorimétrico basado en el método de Biuret, en el cual se determina la cantidad de proteínas presentes en la orina mediante la formación de un quelato coloreado, donde ocurre una reacción entre los iones cúprico y los enlaces peptídicos. El método se fundamenta en la co-precipitación de proteínas, en presencia del reactivo de rojo Ponceau y la adición del ácido tricloroacético. La concentración de proteínas urinaria se cuantificó espectrofotométricamente a una longitud de onda de 560 nm, su concentración se calculó mediante la utilización de una curva estándar de albúmina sérica de bovino. Los resultados se expresaron como mg de proteínas/100 g de rata (Pesce y Strande, 1973).

DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD ENZIMÁTICA DE LA CATALASA (CAT)

La actividad de la catalasa fue determinada empleando una modificación del método de Aebi (1984), que se basa en la disminución de la absorbancia del H₂O₂ debido a su degradación enzimática y monitoreada a una longitud de onda de 240 nm, a 25 °C. Brevemente, en una celda de cuarzo se colocan 25 µL de homogenizado del tejido diluido 1:33 en amortiguador de fosfatos 10 mM (pH 7,0), se adiciona 725 µL de H₂O₂ 7,7 mM e inmediatamente se mide el cambio de absorbancia a 240 nm, a los 15 y 30 segundos. De acuerdo a Aebi, se utiliza la constante de reacción de primer orden (k) como la unidad de actividad de la CAT, la cual queda definida de acuerdo a la siguiente fórmula: $k = (1/t) (2,3 \times \log A_1/A_2)$, donde t es el intervalo de tiempo medido (seg), A₁ y A₂ son las absorbancias del H₂O₂ en los tiempos t₁ y t₂. Los resultados se expresan como k/mg de proteína.

DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD DE LA ENZIMA SUPERÓXIDO DISMUTASA (SOD)

La actividad de SOD se determinó mediante una modificación del método de Oberley y col. (1984), el cual mide la capacidad SOD presente en la muestra para inhibir la reducción del azul de nitrotetrazolio (NBT) por el anión superóxido generado a través del sistema de la xantina-xantina oxidasa presente en la mezcla de reacción. Los resultados son expresados como U/mg proteína. Una U de actividad SOD se define como la cantidad de enzima requerida para inhibir en un 50% la formación de los cristales de formazán.

DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD DE LA GLUTATIÓN PEROXIDASA (GPx)

La actividad de la glutatión peroxidasa (GPx) fue determinada de forma indirecta de acuerdo al método descrito por Flohé (1984), mediante una reacción acoplada con la glutatión reductasa. El glutatión reducido es empleado por la GPx para reducir el peróxido de hidrógeno, el cual es regenerado por la glutatión reductasa a partir de glutatión oxidado y NAD(P)H. La reacción mide la disminución de la absorbancia a 340 nm debido a la desaparición de NAD(P)H. Los resultados fueron expresados como actividad enzimática en U/mg proteína ($\epsilon = 6.22 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$). Una U de GPx representa un mmol de NAD(P)H oxidado/min por mg proteína.

DETERMINACIÓN LAS PROTEÍNAS TISULARES

Las proteínas tisulares totales fueron determinadas por el método de Lowry y col. (1951) utilizando albúmina sérica de bovino como patrón. Los resultados fueron expresados como mg de proteínas/ml.

Histología renal

Los animales fueron sacrificados mediante decapitación, se practicó una incisión en la parte media del abdomen, y el riñón izquierdo fue extraído, decapsulado y pesado. El riñón derecho, fue fijado en formalina y embebido en parafina para los estudios histopatológicos, utilizando rebanadas de riñón de unas 4-6 micras. Los estudios morfológicos fueron realizados por un observador ciego con respecto al grupo de tratamiento al que pertenece el animal.

El daño tubulointestinal, fue evaluado mediante el uso de una escala semicuantitativa. Las rebanadas de riñón embebidas en parafina, fueron teñidas con hematoxilina y eosina y observadas bajo un microscopio de luz.

Análisis estadístico

Todos los resultados fueron expresados como la

media más o menos el error estándar de la media ($X \pm \text{EEM}$). Las diferencias entre los grupos se determinó mediante el uso de la prueba de «t» de Student y el análisis de varianza de una vía (ANOVA). Un valor de $p < 0.05$ fue considerado como estadísticamente significativo.

Resultados

Presión arterial media y excreción urinaria de proteínas en ratas con preeclampsia experimental inducida mediante el tratamiento con L-NAME. Efecto del tratamiento con tempol.

El tratamiento a ratas preñadas con L-NAME durante 7 días consecutivos produjo un incremento significativo de la presión arterial media, cuyos valores alcanzaron a $157,3 \pm 3 \text{ mmHg}$ (Figura 1). De igual forma, el tratamiento con L-NAME elevó significativamente la excreción urinaria de proteínas (Tabla I y Figura 2). Aun cuando no se observaron reducciones en el número de fetos después del tratamiento con L-NAME, si se produjo una reducción significativa en el peso promedio de los fetos asociada con incremento de la resorción (Tabla I). La observación al microscopio de luz (Figura 3) muestra que el riñón de la rata preñada sin tratamiento presenta tumefacción turbia y edema glomerular, mientras que en el riñón proveniente de las ratas preñadas y tratadas con L-NAME presentan tumefacción turbia de epitelios tubulares, focos hemorrágicos y congestión de capilares glomerulares. El tratamiento con tempol (20 mg/kg/día) durante 7 días consecutivos redujo en forma significativa el incremento de la presión arterial media inducido por la inhibición de la síntesis de ON en ratas preñadas (Figura 1). El tempol por sí mismo no alteró significativamente el curso temporal de la presión arterial media en ratas preñadas (Figura 1). De igual forma, el tratamiento con tempol revirtió completamente la proteinuria, la reducción de los pesos promedio de los fetos y la resorción observada en este modelo de preeclampsia experimental (Figura 2, Tabla I).

Efectos histológicos

La observación al microscopio de luz (Figura 3) muestra que el riñón de la rata preñada sin tratamiento presenta tumefacción turbia y edema glomerular (CONTROL); mientras que en el riñón proveniente de las ratas preñadas y tratadas con L-NAME presenta tumefacción turbia de epitelios tubulares, focos hemorrágicos y congestión de capilares glomerulares (L-NAME). Los riñones provenientes de animales tratados con tempol muestran tumefacción turbia de epitelios tubulares, edema glomerular (TEMPOL);

mientras que el tratamiento simultáneo con L-NAME + tempol muestra riñones con tumefacción turbia de epitelios tubulares, congestión de capilares glomerulares, pequeños focos hemorrágicos.

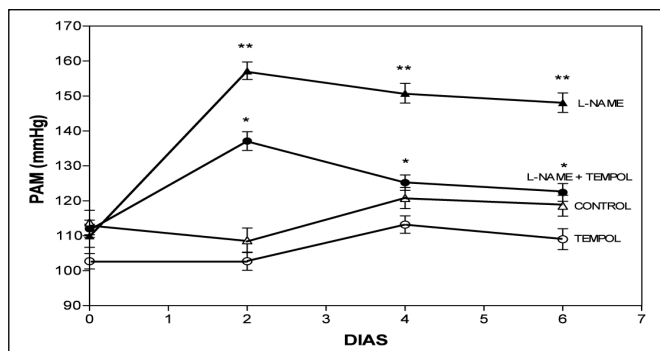


Figura 1. Curso temporal del efecto del tempol (20 mg/kg/día) durante 7 días, sobre el incremento de la presión arterial inducido por el L-NAME en ratas preñadas. N= 8 por grupo. *p<0,01 comparado con ratas tratadas con tempol, **p<0,001 comparado con ratas tratadas con L-NAME.

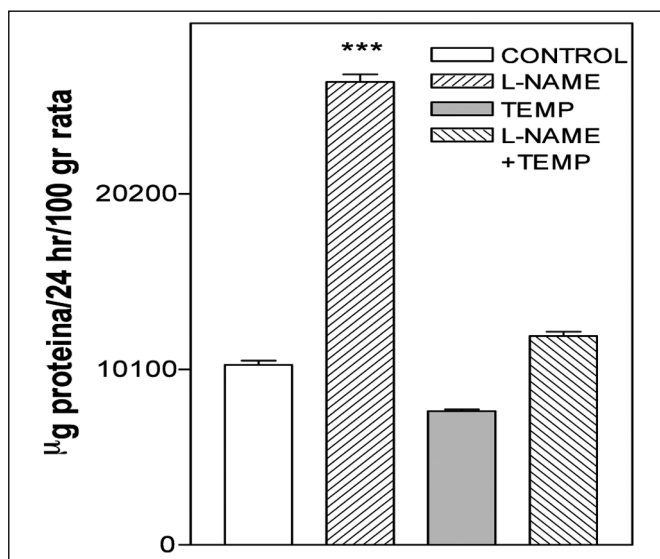


Figura 2. Efecto del tempol (20 mg/kg/día) durante 7 días, sobre la excreción urinaria de proteínas en ratas con preeclampsia inducida por el tratamiento con L-NAME. N = 8 animales por grupo. ***p<0,0001 comparado con ratas preñadas control.

Efecto del tempol sobre la actividad de las enzimas antioxidantes renales en ratas con preeclampsia experimental inducida mediante el tratamiento con L-NAME.

Como se observa en las figura 4, la actividad renal de las enzimas antioxidantes superóxido dismutasa (-54%), catalasa (-55%) y glutatión peroxidasa (-42%) se encuentran significativamente disminuidas en la corteza renal de las ratas con preeclampsia experimental inducida por el tratamiento con L-NAME. El tratamiento crónico con tempol previno la reducción de la actividad de las enzimas antioxidantes SOD y CAT inducida por el L-NAME en ratas preña-

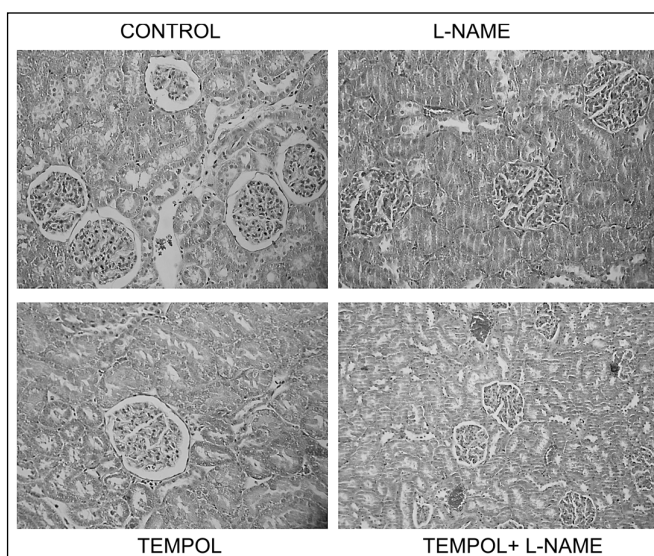


Figura 3. CONTROL: Riñón de ratas preñadas tratadas con vehículo: tumefacción turbia. Edema glomerular; L-NAME: Riñón de ratas tratadas con L-NAME: tumefacción turbia de epitelios tubulares, focos hemorrágicos, congestión de capilares glomerulares; TEMPOL: Riñón de ratas tratadas con tempol: tumefacción turbia de epitelios tubulares, edema glomerular; TEMPOL+ L-NAME: Riñón de ratas preñadas tratadas con Tempol+L-NAME: tumefacción turbia de epitelios tubulares, congestión de capilares glomerulares, pequeños focos hemorrágicos. Tinción con eosina y hematoxilina.

das, pero afectó solo parcialmente la reducción de la GPx (-33%).

Discusión

Los resultados del presente trabajo están en concordancia con las evidencias acerca de un modelo experimental de preeclampsia que resulta de la inhibición crónica de la síntesis de ON mediante la administración de L-NAME a ratas preñadas y ratifican el papel primordial del ON y su desregulación en la preeclampsia humana (Molnar y Hertelendy, 1992). Efectivamente, la preeclampsia es un desorden hipertensivo que ocurre principalmente por una mala adaptación placentaria, que involucra disfunción endotelial, la cual afecta consistentemente al riñón (Shah, 2005). Nuestros hallazgos apoyan este concepto ya que la PE inducida por la inhibición de la síntesis de óxido nítrico (Camacho y col., 2011), estuvo asociada a disfunción endotelial en el riñón que se manifestó por proteinuria, así como evidencias morfológicas de endoteliosis glomerular (Munkhaugen y Egil, 2009). Así, se observó una lesión renal precisa, identificable mediante microscopía de luz, caracterizada por tumefacción turbia de las células endoteliales tubulares, focos hemorrágicos y congestión de capilares glomerulares,

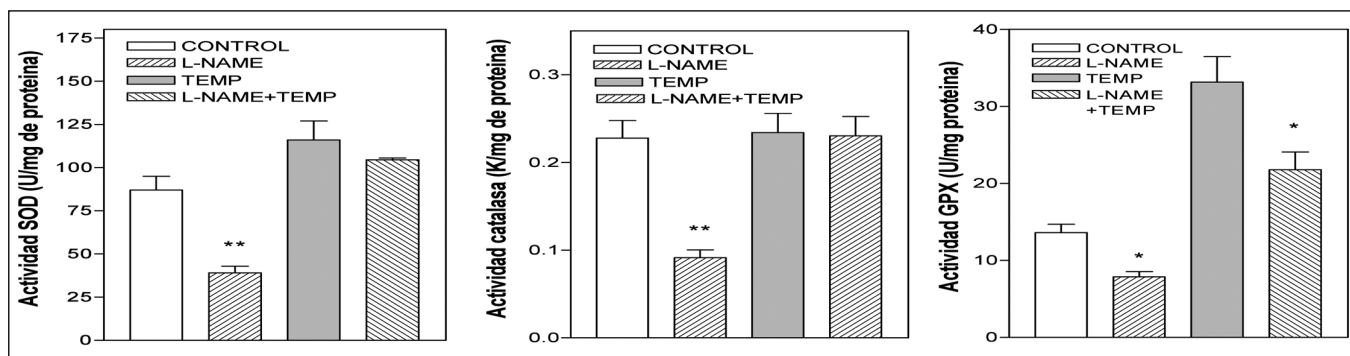


Figura 4. Efecto del tempol (20 mg/kg/día) durante 7 días, sobre la actividad de las enzimas antioxidantes renales: superóxido dismutasa, catalasa y glutatión peroxidasa (N=8 por grupo), en ratas con preeclampsia inducida por el tratamiento con L-NAME. *p<0,01 y **p<0,001 comparado con ratas preñadas control; #p<0,01 comparado con TEMP.

Tabla I

	CONTROL	L-NAME	TEMPOL	L-NAME + TEMPOL
Número de fetos	10,11 ± 0,5	9,0 ± 0,5	10,01 ± 1,02	11,1 ± 0,9
Pesos /no. de fetos (g)	3,24 ± 0,2	1,95 ± 0,1*	3,8 ± 0,3	2,13 ± 0,1
Necrosis	0	1,5 ± 0,1 *	0	0,33 ± 0,02

*p<0,01 comparado con control. N= 28-40 por grupo.

posibles responsables de las alteraciones de la función renal. Al respecto, se ha demostrado que mientras que en el embarazo normal, aumenta la tasa de filtración glomerular (TFG), por un aumento del flujo plasmático renal (FPR), las alteraciones funcionales a nivel renal en la mujer preecláptica incluyen disminución del flujo plasmático renal (FPR) y la tasa de filtración glomerular (TFG), como también proteinuria que puede estar en rango nefrótico (Moran y col., 2003).

Otro hallazgo significativo en este estudio fue la observación de los signos clásicos de la preeclampsia en ratas, como lo es el retardo en el crecimiento intrauterino e incremento de la resorción fetal; signos que probablemente son debidos a la vasoconstricción y a la isquemia de la unidad feto-placentaria descrita en la preeclampsia.

Ahora bien, el estrés oxidativo es un desbalance entre las fuerzas pro-oxidantes y anti-oxidantes y se ha demostrado que en los embarazos con preeclampsia ocurre una disminución significativa de la protección antioxidante. Muchas son las causas que parecen estar involucradas en el incremento del estrés oxidativo en la preeclampsia. Se ha postulado que el incremento del estrés oxidativo y la producción de anión superóxido en la preeclampsia (Biri y col., 2007) se asocia a una temprana placentación anormal con isquemia placentaria e hipoxia (Gilbert y col., 2007); a la pre-

sencia de anticuerpos anti-receptores AT₁ de angiotensina II (Xia y col., 2003), a alteraciones en el metabolismo de carbohidratos asociado a la resistencia a la insulina con sobrepeso y obesidad (Joffe y col., 1998) y a la presencia de infecciones subclínicas en la vagina, sistema urinario y enfermedad periodontal (Herrera y col., 2007). Todas estas alteraciones conducen a una reacción inflamatoria intravascular generalizada y un estado de estrés oxidativo que produce disfunción endotelial que predispone a la mujer embarazada a desarrollar preeclampsia (Herrera y col., 2001). En estudios de placentas de mujeres con preeclampsia comparadas con placentas normales, se ha demostrado en las primeras un aumento de la peroxidación de lípidos mitocondriales y de la generación de aniones superóxidos, lo que podría contribuir y ser una fuente importante de estrés oxidativo en la placenta (Wang y Walsh, 1998). Debido a este desbalance oxidativo de origen placentario, se ha postulado que la hipoperfusión sanguínea mediada por la angiotensina II, la vasoconstricción sistémica y el estrés oxidativo placentario, son factores responsables de la disfunción endotelial vascular renal, y que contribuye con el desarrollo de la preeclampsia (Shah, 2005).

Uno de los factores que podrían influir en daño renal en la preeclampsia, es el estrés oxidativo local que resultaría, entre otras causas, por la disminución de la actividad de las enzimas antioxidantes renales. Nuestros resultados apuntan a esa posibilidad ya que la inhibición de la síntesis de ON que se demuestra por la reducción de la actividad de la sintasa de óxido nítrico renal (Camacho y col., 2011), genera un modelo de PE experimental con endoteliosis glomerular que está asociado a la disminución significativa de tres de las enzimas antioxidantes renales: la catalasa, la superóxido dismutasa y glutatión peroxidasa. La disminución de la actividad de las enzimas antioxidantes, las cuales son mecanismos enzimáticos que defienden en situaciones de estrés oxidativo, sugiere

que la desregulación de la funcionalidad renal está asociada a una baja protección oxidativa que condiciona a la insuficiencia renal (Balal y col., 2003).

El organismo normalmente contiene mecanismos enzimáticos antioxidantes que limita este proceso. Sin embargo, en ciertas circunstancias estos mecanismos regulatorios no pueden controlar el balance redox intracelular, generando elevadas concentraciones de peróxidos lipídicos (Buhimschi y col., 1998) y del anión superóxido, el cual es capaz de unirse al ON y formar peroxinitrito, este último al unirse a proteínas es altamente citotóxico; además, los niveles elevados de peroxinitrito reducen la biodisponibilidad de ON con todos los efectos perjudiciales que a nivel vascular y renal esto implica.

Se ha sugerido que el incremento temprano del estrés oxidativo placentario, que cursa antes del inicio de los síntomas maternos, juega un papel fundamental en la disfunción endotelial generalizada y el daño renal, por lo que el tratamiento temprano con antioxidantes podría interrumpir el proceso de la enfermedad. Nuestros resultados apoyan esta posibilidad ya que demuestran que el tratamiento crónico con un compuesto que mimetiza a la SOD, el tempol, fue capaz de reducir significativamente la hipertensión y bloquear completamente la proteinuria. Así mismo el tempol fue capaz de revertir la disminución de la actividad de dos de las enzimas antioxidantes y los daños a nivel renal. Todo ello sugiere un papel determinante del estrés oxidativo en las manifestaciones disfuncionales en este modelo experimental de preeclampsia. En apoyo a nuestros hallazgos se encuentran los descritos por Hoffmann y col. (2008), quienes demostraron que el tempol es capaz de prevenir la hipertensión, la proteinuria y la función fetoplacentaria en un modelo de preeclampsia en ratón, el BPH/5, el cual desarrolla de forma espontánea las características clínicas de la preeclampsia humana.

En conclusión, en la preeclampsia experimental inducida por la inhibición crónica de la SON, la disfunción renal se asocia a una disminución de los mecanismos antioxidantes renales, lo que conduce a un incremento del estrés oxidativo. La producción de especies reactivas de oxígeno parece ejercer un efecto causal importante en la disfunción endotelial generalizada y del daño renal, y por ello el uso de terapéutico de los antioxidantes como tratamiento de la preeclampsia parece ser prometedor.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Sr. Banny Caraballo por su ayuda técnica en los experimentos y al Departamento de Patología del Instituto de Higiene «Rafael

Rangel» por los estudios histológicos. Este trabajo fue subvencionado por el Ministerio Popular de Ciencia Tecnología e Industrias, Proyecto Misión Ciencia, Subproyecto 7, ECCV No. 2007001585.

Referencias bibliográficas

- Aebi H. 1984. Catalase in vitro. *Methods Enzymol* 105:121-126.
- Balal M, Karayaylah I, Paydaç S, Seyrek N, Canacankatan N, Kayrin L. 2003. Oxidative anti-oxidative system In peripartum acute renal failure and preeclampsia –eclampsia. *Journal of the Turkish Society of Sephrology* 12 (3): 141-147.
- Banks RE, Forbes MA, Searles J, Pappin D, Canas B, Rahman D, Kaufmann S, Walters CE, Jackson A, Eves P, Linton G, Keen J, Walker JJ, Selby PJ. 1998. Evidence for the existence of a novel pregnancy-associated soluble variant of the vascular endothelial growth factor receptor, Flt-1 *Mol Hum Reprod* 4(4):377-86.
- Biri A, Bozkurt N, Gunaydina G, Korucuoglu U, Durakb IM, Kavutcu C. 2007. Antioxidant enzyme activities and lipid peroxidation in preeclampsia. *Intern J Gynecol Obst* 96: 196-207.
- Bredt DS, Snyder SH. 1990. Isolation of nitric oxide synthetase, a calmodulin-requiring enzyme. 87:682-685.
- Buhimschi IA, Saade GR, Chwalisz K, Garfield RE. 1998. The nitric oxide pathway in pre-eclampsia: pathophysiological implications *Human Reproduction Update*. European Society for Human Reproduction and Embryology 4:25-42.
- Camacho E, Silva JA, Matos MG, Garrido MR, Israel A. 2011. Actividad de las enzimas antioxidantes en el riñón de la rata con preeclampsia experimental. *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica* 30:44-50.
- Clambers JC, Fusi L, Malik IS, Haskard DO, De Swiet M, Kooner JS. 2001. Association of Maternal Endothelial Dysfunction with Preeclampsia. *JAMA* 285(12): 1607-1612.
- Dekker GA, Sibai BM. 1998. Etiology and pathogenesis of preeclampsia: Current concepts. *Am J Obstet Gynecol* 179: 1359-75.
- Demougeot C, Prigent-Tessier A, Marie C, Berthelot A. 2005. Arginase inhibition reduces endothelial dysfunction and blood pressure rising in spontaneously hypertensive rats. *J Hypertens* 23:971-978.
- Flohé L, Günzler WA. 1984. Assays of glutathione peroxidase. 105:114-21.
- Gilbert JS, Ryan MJ, LaMarca BB, Sedeek M, Sydney R, Murphy, Joey P Granger. 2008. Pathophysiology of hypertension during preeclampsia: linking placental ischemia with endothelial dysfunction. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 294: H541-H550.
- Herrera JAG, Chaudhuri G, López-Jaramillo P. 2001. Is infection a major risk for preeclampsia? *Med. Hypotheses* 57:393-397.

- Herrera JA, Parra B, Herrera E, Botero JE, Arce RM, Contreras A, López-Jaramillo P. 2007. Periondontal disease severity related to high levels C-reactive protein in preeclampsia. *J Hypertens* 25:1459-1464.
- Hoffmann DS, Weydert Ch J, Lazartigues E, Kutschke WJ, Kienzle MF, Leach JE, Sharma JA, Sharma EV, Davison RL. 2008. Chronic tampol prevents hypertension, proteinuria, and poor feto-placental outcomes in BPH/5 mouse model of preeclampsia. *Hypertension* 51: 1058-1065.
- Joffe GM, Esterlitz J, Levine R, Clemens J, Ewell M, Sibai B, Catalano P. 1998. The relationship between abnormal glucose tolerance and hypertensive disorders of pregnancy in healthy nulliparous women. Calcium for Preeclampsia Prevention. (CPEP) Study Group. *Am J Obstet Gynecol* 179: 1032-1037.
- López-Jaramillo P, Arenas WD, García R, Rincón MY, López M. 2008. The role of the L-arginine-nitric oxide pathway in preeclampsia. *Therapeutic Advances in Cardiovascular Disease* 2: 1-10.
- Lowry OH, Rosbrough NJ, Farr AL, Randall RJ. 1996. *J. Biol Chem* 1951; 193:265.
- Lyll F, Greer A. The vascular endothelium in normal pregnancy and pre-eclampsia. *Reviews of Reproduction* 1:107-116.
- Molnar M, Hertelendy F. 1992. N^o-Nitro-L-arginine, an inhibitor of nitric oxide synthesis, increases blood pressure in rats and reverses the pregnancy-induced refractoriness to vasopressor agents. *Am J Obstet Gynecol* 166:1560-1567.
- Moran P, Baylis PH, Lindheimer MD, Davison JM. 2003. Glomerular ultrafiltration in normal and preeclamptic pregnancy. *14(3):648-52.*
- Munkhaugen J, Egil BV. 2009. News aspects of preeclampsia: lessons for the nephrologist. *Nephrol Dial Transplant* 1-3.
- NIH Guide for the care and use of laboratory animals. NIH Guide 1996; 25: 1-111.
- Oberley L, Spitz D. 1984. Assay of superoxide dismutase activity in tumor tissue. *Meth Enzymol* 105:457-464.
- Pacheco Romero J. 2003. Disfunción endotelial en la preeclampsia. *Anales de la Facultad de Medicina. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.* 64: 43-54.
- Pandhi P, Saha L, Malhotra S. 2001. Prolonged blockade of nitric oxide synthesis in pregnant rats as a model of pre-eclampsia. *Indian J Pharmacol* 133: 92-95.
- Pesce M, Strande D. 1973. A New micromethod for determination of protein in cerebrospinal fluid and urine. *Clin Chem* 19:1265-1267.
- Roberts JM, Cooper DW. 2001. Pathogenesis and genetics of preeclampsia. *Lancet* 357: 53-56.
- Seligman SP, Buyon, JP, Clancy RM, Young BK, Abramson SB. 1994. The role of nitric oxide in the pathogenesis of preeclampsia. *Am J Obstet Gynecol* 171:944-948.
- Shah DM. 2005. Role of the renin-angiotensin system in the pathogenesis of preeclampsia. *Am J Physiol Renal Physiol* 288: F614-F625.
- Slaghekkee F, Dekker G, Jeffries B. 2006. Endogenous inhibitors of nitric oxide and preeclampsia: a review. *J Matern Fetal Neonatal Med* 19: 447-452.
- Silver RK, Kupfermanc MJ, Russell TL, Adler L, Mullen TA, Caplan MS. 1996. Evaluation of nitric oxide as a mediator of severe preeclampsia. *Am J Obstet Gynecol* 175: 1013-1017.
- Tsatsaris V, Goffin F, Munaut C, Brichant JF, Pignon MR, Noel A, Schaaps JP, Cabrol D, Frankenne F, Foidart JM. 2003. *J Clin Endocrinol Metab* 88(11):5555-5563.
- Wang Y, Walsh SW. 1998. Placental mitochondria as a source of oxidative stress in pre-eclampsia. *Placenta* 19: 581-586.
- Xia Y, Hong H, Sol B, Day M-C, Rodney KE. 2003. Maternal autoantibodies from preeclamptic patients activate angiotensin receptors on human trophoblast cells. *J Soc Gynecol Inv* 10: 82-93.