

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BÁSICAS DA SAÚDE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS: BIOQUÍMICA

**EFEITOS COMPORTAMENTAIS E NEUROQUÍMICOS DA HARMINA EM  
MODELOS ANIMAIS DE DEPRESSÃO**

**JUCÉLIA JEREMIAS FORTUNATO**

ORIENTADOR

Prof. Dr. João Luciano de Quevedo

Porto Alegre, 2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BÁSICAS DA SAÚDE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS: BIOQUÍMICA

**EFEITOS COMPORTAMENTAIS E NEUROQUÍMICOS DA HARMINA EM  
MODELOS ANIMAIS DE DEPRESSÃO**

**JUCÉLIA JEREMIAS FORTUNATO**

ORIENTADOR

Prof. Dr. João Luciano de Quevedo

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas:  
Bioquímica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à  
obtenção do grau de Doutor em Ciências Biológicas: Bioquímica.

Porto Alegre, 2009

*“Todo homem pode ser,  
se assim se propuser,  
escultor do seu próprio cérebro.”*

*Santiago Ramón y Cajal (1852 – 1934)*

*Às três pessoas mais importantes da minha vida,*

*Terezinha, minha mãe e incentivadora,*

*Laury, meu pai e grande companheiro,*

*e*

*Marcelo, meu maior amor, que esteve ao meu lado  
em todos os momentos e acreditou que eu fosse capaz.*

## AGRADECIMENTOS

### ***Ao mestre:***

Ao **Prof. João**, exemplo de pesquisador, por ter me concedido a oportunidade de trabalhar sob sua orientação tanto no mestrado como no doutorado, e também por sua ajuda, dedicação, confiança no meu trabalho, amizade e experiência.

### ***À família:***

Aos meus pais, **Laury** e **Terezinha**, meus primeiros orientadores, meus maiores torcedores. Devo muito a vocês, este aqui é outro degrau que alcanço graças a vocês. Aos irmãos, cunhados, sobrinhos e sogra pela confiança, carinho e apoio constantes. Ao **Marcelo**, meu marido maravilhoso, que durante todo o tempo me ajudou, ouviu e amparou nos momentos difíceis. Essa tese é tua também!

### ***Ao Laboratório de Neurociências:***

À todos os pesquisadores do Laboratório de Neurociências da UNESC, em especial a **Gislaine Zilli Réus**, que teve participação integral no desenvolvimento deste trabalho. Esta tese tem todos os teus dedos.

### ***Ao Laboratório de Anatomia:***

À todos os companheiros do Laboratório de Anatomia da UNISUL, pela convivência diária.

## SUMÁRIO

### PARTE I

i. Resumo .....	2
ii. Abstract .....	3
iii. Lista de Figuras .....	4
iv. Lista de Abreviaturas .....	7
v. Introdução .....	9
vi. Objetivos .....	21

### PARTE II

<b>Capítulo 1.</b> Acute harmine administration induces antidepressive-like effects and increases BDNF levels in the rat hippocampus ( <i>Prog Neuro-Psychopharmacol Biol Psychiatry</i> , 2009) .....	23
<b>Capítulo 2.</b> Chronic administration of harmine elicits antidepressant-like effects and increases BDNF levels in the rat hippocampus ( <i>Neurotoxicity Res</i> , 2009) .....	30
<b>Capítulo 3.</b> Effects of beta-carboline harmine on behavioral and physiological parameters observed in the chronic mild stress model: further evidence of antidepressant properties ( <i>Brain Res Bull</i> , 2009) .....	56

### PARTE III

i. Discussão .....	64
ii. Conclusões .....	74
iii. Perspectivas .....	76
iv. Referências .....	77



## RESUMO

Harmina é uma  $\beta$ -carbolina que atua sobre o SNC, inibindo a enzima monoaminoxidase tipo A-MAO. Esse alcalóide liga-se com relativa afinidade a receptores cerebrais de serotonina como a 5-hidroxitriptamina, subtipos 5-HT<sub>2C</sub> e 5-HT<sub>2A</sub> e receptores imidazólicos (I<sub>2</sub>). O objetivo deste estudo foi investigar os efeitos comportamentais e fisiológicos da administração aguda e crônica de harmina (5, 10 e 15 mg/kg) e imipramina (10, 20 e 30 mg/kg), utilizando o teste do nado forçado (TNF) e o protocolo de estresse crônico moderado (ECM) em modelo animal. Os resultados mostraram que os ratos tratados aguda e cronicamente com harmina e imipramina diminuíram o tempo de imobilidade no TNF, aumentaram o tempo de clímbings e de nado quando comparados com o grupo controle, sem, no entanto, afetar a atividade locomotora avaliada pelo teste de exploração ao campo aberto. Os níveis do fator neurotrófico derivado do cérebro (BDNF) no hipocampo dos ratos também foram aumentados pelos tratamentos agudo e crônico com harmina. Os animais submetidos ao protocolo de ECM apresentaram comportamento anedônico, aumento do peso médio da glândula adrenal e aumento nos níveis de ACTH e BDNF. O tratamento crônico com harmina durante 7 dias consecutivos, reverteu a anedonia e a hipertrofia da glândula adrenal, além de normalizar os níveis de ACTH e BDNF. O conjunto desses resultados auxiliam a compreensão do mecanismo de ação neuroprotetor da harmina e sugerem que este alcalóide possa representar um novo alvo farmacológico para o tratamento da depressão.

**Descritores:** Harmina. Depressão. BDNF.



**ABSTRACT**

Harmine is a  $\beta$ -carboline that acts on the CNS, by inhibiting the enzyme monoamine oxidase type A-MAO. This alkaloid binds with affinity to receptors on serotonin as 5-hydroxytryptamine, 5-HT<sub>2C</sub> subtypes and 5-HT<sub>2A</sub> receptors and imidazole (I<sub>2</sub>). The objective of this study was to investigate the physiological and behavioral effects of acute and chronic administration of harmine (5, 10 and 15 mg / kg) and imipramine (10, 20 and 30 mg / kg) using the forced swimming test (TNF) and the protocol of chronic mild stress (ECM) in an animal model. The results showed that rats treated acutely and chronically with harmine and imipramine reduced the immobility time in the TNF, and increased both climbings and swimming time of rats compared to saline group, without affecting locomotor activity in the open field test. Both acute and chronic administration of harmine increased factor brain-derived neurotrophic (BDNF) protein levels in the rat hippocampus. Our findings demonstrated that chronic stressful situations induced anhedonia, hypertrophy of adrenal gland weight, increase ACTH circulating levels in rats and increase BDNF protein levels. Interestingly, treatment with harmine for 7 consecutive days, reversed anhedonia, the increase of adrenal gland weight, normalized ACTH circulating levels and BDNF protein levels. Finally, these findings further support the hypothesis that harmine could be a new pharmacological tool for the treatment of depression.

**Keywords:** Harmine. Depression. BDNF.

## LISTA DE FIGURAS

## Introdução

**Figura 1.** Sistemas de neurotransmissores e vias de sinalização celular envolvidas na fisiopatologia da depressão ..... 12

**Figura 2.** Fórmula estrutural do alcalóide  $\beta$ -carbólico harmina ..... 18

## Capítulo I

**Figura 1.** Effects of the acute administration of harmine (5, 10 and 15 mg/kg, i.p.) and imipramine (10, 20 and 30 mg/kg, i.p.) on the immobility time (a); on the swimming time (b); and climbing time (c) of rats subjected to the forced swimming test. Bars represent means $\pm$ S.E.M. of 15 rats. \* $p$ <0.05 vs. saline according to ANOVA followed by Tukey *post-hoc* test ..... 26

**Figura 2.** Effects of the acute administration of harmine (5, 10 and 15 mg/kg, i.p.) and imipramine (10, 20 and 30 mg/kg, i.p.) on the number of crossings (a) and rearings (b) of rats subjected to the open-field test. Bars represent means $\pm$ S.E.M. of 15 rats. No significant difference between each group were found ..... 27

**Figura 3.** Effects of the acute administration of harmine (5, 10 and 15 mg/kg, i.p.) and imipramine (10, 20 and 30 mg/kg, i.p.) on the BDNF levels in the rat

hippocampus. Bars represent means $\pm$ S.E.M. of 10 rats. \* $p$ <0.05 vs. saline according to ANOVA followed by Tukey *post-hoc* test .....27

## Capítulo II

**Figura 1.** Effects of the chronic administration of imipramine (10, 20 and 30 mg/kg, i.p.) (A) and harmine (5, 10 and 15 mg/kg, i.p.) (B) on the immobility, swimming and climbing time of rats subjected to the forced swimming test. Bars represent means $\pm$ S.E.M. of 15 rats. \* $p$ <0.05 vs. saline according to ANOVA followed by Tukey *post-hoc* test .....52

**Figura 2.** Effects of the chronic administration of harmine (5, 10 and 15 mg/kg, i.p.) and imipramine (10, 20 and 30 mg/kg, i.p.) on the number of crossings (A) and rearings (B) of rats subjected to the open field test. Bars represent means $\pm$ S.E.M. of 15 rats. \* $p$ <0.05 vs. saline according to ANOVA followed by Tukey *post-hoc* test ..53

**Figura 3.** Effects of the chronic administration of harmine (5, 10 and 15 mg/kg, i.p.) and imipramine (10, 20 and 30 mg/k, i.p.) on the BDNF levels in the rat hippocampus. Bars represent means $\pm$ S.E.M. of 10 rats. \* $p$ <0.05 vs. saline according to ANOVA followed by Tukey *post-hoc* test .....54

**Capítulo III**

- Figura 1.** Effects of CSM procedure on sweet food consumption (A) and on the number of crossings (B) and rearings (C) in the open-field test in rats repeatedly treated with harmine. Bars represent means±S.E.M. \* $p < 0.05$  vs. control saline; \*\* $p < 0.05$  vs. CSM saline, according to ANOVA *post hoc* Tukey's test .....59
- Figura 2.** Effects of CMS procedure on adrenal gland weight of rats repeatedly treated with harmine. Bars represent means±S.E.M. \* $p < 0.05$  vs. other groups, according to ANOVA *post hoc* Tukey's test .....59
- Figura 3.** Effects of CSM procedure on adrenocorticotropic hormone (ACTH) circulating levels in rats repeatedly treated with harmine. Bars represent means±S.E.M. \* $p < 0.05$  vs. other groups, according to ANOVA *post hoc* Tukey's test .....60
- Figura 4.** Effects of CSM procedure on the BDNF levels in the rats hippocampus repeatedly treated with harmine. Bars represent means±S.E.M. \* $p < 0.05$  vs. other groups, according to ANOVA *post hoc* Tukey's test .....60
- Tabela 1.** Schedule of stressor agent used during the chronic treatment .....58

**LISTA DE ABREVIATURAS**

5-HT	serotonina
5-HT(...)	subtipos de receptores serotoninérgicos
ACTH	hormônio adrenocorticotrófico
AMPc	monofosfato de adenosina cíclica
Bcl2	célula-B de linfoma 2
BDNF	fator neurotrófico derivado do cérebro
BZD	receptores benzodiazepínicos
CaMKII	proteína cinase II dependente de Ca <sup>2+</sup> /calmodulina
CREB	proteína ligante de elemento responsivo ao AMPc
CRF	fator liberador de corticotrofina
DSM-IV	Manual de Diagnóstico e Estatística das Doenças Mentais
ECM	estresse crônico moderado
ERK	proteínas cinases reguladas por sinal extracelular
ERO	espécies reativas de oxigênio
GSK-3	glicogênio sintase cinase 3
HHA	eixo hipotálamo-hipófise-adrenal
i.p.	intraperitoneal
iMAO	inibidores da enzima monoamina oxidase
K <sup>+</sup>	potássio
MAO	monoamina oxidase
MAPK	proteína cinase ativada por mitógenos
NGF	fator de crescimento do nervo
NMDA	N-metil-D-aspartato

---

NO	óxido nítrico
NT	neurotrofina
PK	proteína cinase
SNC	sistema nervoso central
TCA	teste de exploração ao campo aberto
TNF	teste do nado forçado
Trk	receptor tirosina quinase

## I INTRODUÇÃO

### 1. DEPRESSÃO

A depressão é um dos mais prevalentes transtornos psiquiátricos, inclui sintomas psicológicos, comportamentais e fisiológicos. Estima-se que 121 milhões de pessoas sejam afetadas mundialmente por este transtorno (SATTLER e ROTHSTEIN, 2007) e, no Brasil, aproximadamente 54 milhões de pessoas em algum momento de suas vidas terão algum tipo de depressão, sendo que 7,5 milhões terão episódios agudos e graves, muitas vezes com risco de suicídio (NARDI, 2000).

A depressão é uma doença heterogênea, embora apresente manifestações fisiológicas, comportamentais e psicológicas semelhantes em diferentes países, grupos culturais, e *status* socioeconômico (SPIEGEL, 1996). Esta neuropatologia é classificada como um transtorno de humor. Os transtornos de humor se dividem em transtornos unipolares, que incluem a depressão maior e a distímia (depressão menor intermitente) e os transtornos bipolares, que incluem o transtorno bipolar (desordem maníaco-depressiva) e a ciclotímia (forma branda da desordem bipolar caracterizada por episódios de hipomania e depressão alternados) (AMERICAN PSYCHIATRY ASSOCIATION, 1994).

De acordo com o Manual Diagnóstico e Estatístico de Doenças Mentais, IV edição (DSM-IV), os transtornos afetivos do tipo depressivo podem se manifestar através de episódios depressivos. A característica essencial do episódio depressivo é a presença de humor deprimido e/ou perda de interesse ou prazer em quase todas as atividades, durante um período de pelo menos duas semanas. Pode-se

experimental alteração do apetite e peso, distúrbio do sono, sentimento de culpa, dificuldade de pensar, falta de energia e idéias suicidas. Além disso, pacientes que sofrem de depressão severa apresentam altas taxas de morbidade e mortalidade, com conseqüências econômicas e sociais profundas (NEMEROFF e OWENS, 2002).

Em muitos casos, a depressão não tem uma causa clínica identificável. Entretanto, existem fatores genéticos, fisiológicos, bioquímicos, morfológicos e ambientais associados ao episódio depressivo (NESTLER *et al.*, 2002a; BERTON e NESTLER, 2006). Dentre os fatores ambientais que influenciam na etiologia da desordem depressiva incluem-se, à exposição a algumas substâncias, como drogas de abuso, organofosforados, e alguns fármacos como agentes anti-hipertensivos, corticosteróides, anticonvulsivantes, dentre outros (KARALLIEDDE *et al.*, 2000). A depressão maior também coexiste com outras desordens (co-morbidade), tais como doenças cardiovasculares, doenças neurológicas e câncer (NESTLER *et al.*, 2002a).

### ***1.1 Sistemas de neurotransmissores e vias de sinalização celular envolvidas na fisiopatologia da depressão***

Durante vários anos a depressão foi considerada como tendo uma origem neuroquímica e tem sido associada a alterações nas vias de sinalização que regulam a neuroplasticidade e a sobrevivência celular. Agentes que atuam diretamente em fatores alvo nestas vias poderiam ser novos compostos promissores para a terapia da depressão (POPOLI *et al.*, 2000; MANJI *et al.*, 2001; TAYLOR *et al.*, 2005).



Apesar da depressão ser tratada farmacologicamente por três décadas, apenas recentemente a compreensão sobre os mecanismos de ação dos antidepressivos tem registrado os maiores avanços.

A teoria monoaminérgica postula que a depressão é causada por uma deficiência na transmissão de monoaminas (noradrenalina, dopamina e serotonina (5-HT)) no sistema nervoso central (SNC), ou ainda de receptores deficientes para estes neurotransmissores (para revisão ver SCHILDKRAUT, 1965). As evidências que apóiam esta teoria é que diversos fármacos utilizados no tratamento da depressão agem aumentando a concentração de monoaminas na fenda sináptica (ANDERSON, 2000). No entanto, esta hipótese não explica a falta de correlação temporal entre os eventos bioquímicos rápidos que aumentam as monoaminas na fenda sináptica e o início tardio dos efeitos clínicos do tratamento com antidepressivos.

Além do sistema monoaminérgico, outros sistemas parecem estar envolvidos na fisiopatologia da depressão, como o sistema glutamatérgico e a via da L-arginina óxido nítrico (NO) (PETRIE *et al.*, 2000), o sistema opióide (GABILONDO *et al.*, 1999), o sistema GABAérgico (NAKAGAWA *et al.*, 1996), os canais de potássio (K<sup>+</sup>) (GALEOTTI *et al.*, 1999) e os canais de cálcio (GALEOTTI *et al.*, 2006). Além disso, a depressão pode ser desencadeada por alterações nas vias de sinalização que regulam a neuroplasticidade e a sobrevivência celular (cálcio calmodulina cinase II (CaMKII), proteína cinase C (PKC), proteína cinase A (PKA), proteína cinase ativada por mitógeno (MAPK)/cinase regulada por sinal extracelular (ERK), proteína ligante ao elemento responsivo ao AMPc (CREB), fator neurotrófico derivado do cérebro (BDNF), proteína antiapoptótica Bcl<sub>2</sub>, glicogênio sintase cinase 3 (GSK-3) e proteína cinase B (PKB) (PERERA *et al.*, 2007; PITTENGER e DUMAN, 2008), aumento do



## 1.2 Depressão e estresse crônico

O estresse tem sido demonstrado como um importante fator envolvido na gênese e sustentação de estados depressivos. Em cerca de 60% dos casos, os episódios depressivos são precedidos pela ocorrência de fatores estressantes, principalmente de origem psicossocial (PARKER *et al.*, 2003).

O sistema biológico que tem sido associado mais diretamente à resposta ao estresse é o eixo HHA, que possui componentes tanto encefálicos quanto endócrinos (FUCHS *et al.*, 2001). A atividade do eixo HHA é governada pela secreção de corticotrofina (CRF) e vasopressina pelo hipotálamo, os quais, por sua vez, ativam a secreção do hormônio adrenocorticotrófico (ACTH) pela glândula hipófise, que finalmente estimula a secreção de glicocorticóides pelo córtex adrenal (para revisão ver NEMEROFF, 1996). Os glicocorticóides interagem com seus receptores em múltiplos tecidos-alvo, incluindo o eixo HHA, onde são responsáveis pela inibição negativa da secreção de ACTH pela hipófise e CRH pelo hipotálamo. No entanto, em grande parte dos pacientes deprimidos, o controle inibitório da atividade do eixo HHA parece estar comprometido, uma vez que podem apresentar níveis basais elevados de cortisol no plasma, na urina e no fluído cérebrospinal; resposta exagerada de cortisol após estimulação com ACTH e aumento tanto da hipófise como das glândulas adrenais. Além disso, alguns estudos pré-clínicos tem demonstrado que a prolongada superprodução de glicocorticóides danifica as estruturas encefálicas (especialmente o hipocampo), essenciais para o controle do eixo HHA (SAPOLSKY, 1986), podendo levar a alterações consideradas patológicas, ou resultantes de uma adaptação inadequada, gerando a situação deletéria denominada estresse crônico.

Além destas alterações bioquímicas, foram observadas alterações anatômicas distintas em regiões específicas do encéfalo de pacientes deprimidos. Estas alterações morfológicas (redução de volume e/ou número de células) foram observadas em regiões límbicas (hipocampo, núcleos da base e amígdala) e em regiões corticais, implicando no aparecimento de déficits cognitivos e problemas no humor (MANJI *et al.*, 2001; D'SA e DUMAN, 2002).

Os efeitos deletérios do estresse crônico também podem estar associados à diminuição de defesas neuronais, incluindo enzimas antioxidantes; ou ainda, se manifestar em tarefas comportamentais, resultando em danos cognitivos nos modelos animais de estudo.

### **1.3 Fatores neurotróficos**

Ao longo da última década tem surgido inúmeros trabalhos que foram dando corpo à teoria da neuroplasticidade e ao estresse como fator etiopatogênico na depressão. O fato de haver um tempo de latência (3-6 semanas) na atuação dos antidepressivos, levanta a hipótese de a inibição da recaptação dos neurotransmissores não é, por si só, suficiente para estabelecer mudanças a longo prazo. Então, alterações como o aumento da neurogênese, crescimento das fibras nervosas, formação de novas sinapses e estabilização das já existentes, podem ser responsáveis por essas mudanças (GONÇALVES e COELHO, 2006).

As neurotrofinas são uma família de proteínas que medeiam a diferenciação e sobrevivência de neurônios, bem como a modulação da transmissão e plasticidade sináptica (PATAPOUTIAN e REICHARDT, 2001; POO, 2001). A família das neurotrofinas inclui, entre outros, o NGF (fator de crescimento do nervo – NGF, da sigla em inglês), BDNF (fator neurotrófico derivado do cérebro – BDNF, da sigla em

inglês), e neurotrofina 3 (NT-3), NT-4/5 e NT-6 (PATAPOUTIAN e REICHARDT, 2001).

Estudos sugerem que o BDNF pode ser uma molécula alvo na fisiopatologia de transtornos humanos relacionados ao estresse (CASTREN *et al.*, 2007). Foram encontrados níveis diminuídos de BDNF em modelos animais de depressão (ROCERI *et al.*, 2002) e efeitos antidepressivos-*like* puderam ser revertidos após aplicação de BDNF no cérebro de ratos (SHIRAYAMA *et al.*, 2002). De modo similar, níveis diminuídos na expressão de BDNF foram observados em áreas cerebrais de vítimas suicidas, diagnosticadas com transtorno de depressão maior (DWIVEDI *et al.*, 2003) e aumento na expressão de BDNF foram reportadas no hipocampo de cérebros *post-mortem* de sujeitos tratados com antidepressivo (CHEN *et al.*, 2001).

NIBUYA *et al.* (1995), foram os primeiros a demonstrar que a administração crônica de vários tipos de antidepressivos, incluindo os inibidores seletivos de serotonina, aumentam a expressão do BDNF no hipocampo. Outro estudo mostrou que a administração central do BDNF produz atividade antidepressiva em dois modelos animais de depressão (TSAI, 2003). Deste modo, o BDNF parece modular a atividade de sistemas neuroquímicos envolvidos na depressão e pode ter um importante papel na neuropatologia e tratamento da doença. Recentemente, os níveis dessa neurotrofina no plasma foram propostos como um possível marcador biológico da depressão (KAREGE *et al.*, 2002; SHIMIZU *et al.*, 2003; LANG *et al.*, 2004; DEVECI *et al.*, 2007; MONTELEONE *et al.*, 2008).

#### **1.4 Modelos animais de depressão**

Avanços em pesquisas biomédicas têm dependido do desenvolvimento de modelos animais dos transtornos humanos. Estudos anteriores descrevem que

para ser válido, um modelo animal em transtornos psiquiátricos deve demonstrar três características principais: mimetizar os sintomas da doença determinada (validade de face); habilidade do modelo em reproduzir alguns aspectos fisiopatológicos da doença (validade de construção) e, finalmente, os agentes terapêuticos usados no tratamento devem reverter os sintomas induzidos no modelo animal (validade preditiva) (ELLENBROEK e COOLS, 1990).

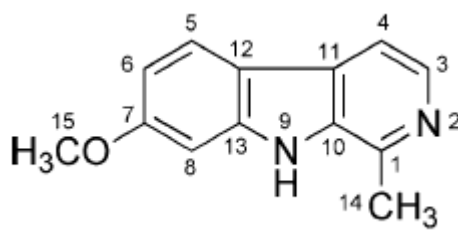
Muitos modelos animais de depressão são utilizados a fim de investigar novos fármacos antidepressivos e conhecer os mecanismos fisiopatológicos da doença. (NESTLER *et al.*, 2002b, CRYAN e SLATTERY, 2007). Entre eles, encontra-se o teste de natação forçada (TNF), descrito primeiramente por Porsolt *et al.* (1977), que é amplamente utilizado em ratos e em camundongos. Este é um modelo animal preditivo de atividade antidepressiva e é baseado na observação do animal em estado de desespero comportamental, que se movimenta para fugir de uma situação inescapável, desenvolvendo após os primeiros minutos uma postura imóvel que pode ser revertida pela administração de antidepressivos. Este teste está entre os mais utilizados para seleção de novos fármacos antidepressivos, é de fácil uso e de boa reprodutibilidade (CRYAN *et al.*, 2002; CRYAN e SLATTERY, 2007).

Outros testes são utilizados como modelos animais de depressão, que além da validade preditiva, possuem validade de face e/ou validade de construção, entre eles está o modelo baseado na indução ao estresse. Em nosso laboratório, nós desenvolvemos um modelo animal de estresse crônico moderado (ECM), adaptado de Gamaro *et al.* (2003b). Este modelo consiste em gerar um comportamento anedônico em ratos, após um período de 40 dias, com aplicação de estressores diversos e moderados, como privação de água, privação de comida, isolamento, exposição à luz estroboscópica. Nossos estudos demonstraram que os animais

submetidos ao protocolo de estresse desenvolveram comportamento anedônico, diminuindo o consumo de sacarose, e, além disso, apresentaram alterações fisiológicas, como diminuição no peso, aumento na glândula adrenal e nos níveis do hormônio ACTH e corticosterona, e ainda, esses efeitos puderam ser revertidos pelo antagonista do receptor NMDA, cetamina (dados submetidos a publicação), mostrando que este modelo animal possui critérios para a validade de um modelo experimental de depressão.

## 2. HARMINA

Harmina (7-methoxy-1-methyl-9H-pyrido[3,4-b]indole) (**Figura 1**) é uma  $\beta$ -carbolina de distribuição bastante diversificada. Pode ser encontrada em plantas da família Zygophyllaceae, Malpighiaceae, Passifloraceae, Leguminosae, Myristicaceae e Ebenaceae. Ocorre também, embora em menor número, na fumaça do cigarro, nos alimentos excessivamente cozidos ricos em proteínas, em alguns animais, inclusive mamíferos e fungos (HASHIMOTO *et al.*, 1988; TOTSUKA *et al.*, 1999).



**Figura 1:** Fórmula estrutural do alcalóide  $\beta$ -carbolínicos harmina (ASTULLA *et al.*, 2008).

A casca e a folha de *Banisteriopsis caapi* (Malpighiaceae), uma planta da América do Sul que contém harmina, são utilizadas na preparação de uma bebida conhecida como ayahuasca (yagé, hoasca, daime ou caapi). Esta bebida é obtida a partir da fervura desta planta junto com folhas de *Psychotria viridis*, que contém triptaminas, resultando em um potente alucinógeno utilizado em rituais religiosos no Brasil, Bolívia, Equador e Peru (CALLAWAY *et al.*, 1996; 1999; FREEDLAND e MANSBACH, 1999).



### **2.1 Harmina como antidepressivo**

A harmina, assim como as demais  $\beta$ -carbolinas, atua sobre o SNC, inibindo a enzima monoamino-oxidase tipo MAO A (KIM *et al.*, 1997; FARZIN e MANSOURI, 2006). A MAO encontra-se na membrana externa das mitocôndrias, localização essa que normalmente protege as monoaminas endógenas contra sua ação oxidativa, mantendo os respectivos teores teciduais dentro dos limites fisiológicos. Devido a isto, a administração de inibidores da MAO (IMAO) acarreta aumento dos depósitos destas aminas, principalmente da dopamina, noradrenalina e serotonina no cérebro. A consequência deste efeito inibitório é um estado de excitação, euforia, aumento da atividade psicomotora (efeito antidepressivo), entre outros (FARZIN e MANSOURI, 2006).

Acredita-se que o efeito alucinógeno das  $\beta$ -carbolinas, entre elas a harmina, além de ocorrer devido a inibição da MAO, aconteça também devido à similaridade estrutural com aminas indólicas, como a triptamina e serotonina. Alguns estudos demonstraram que a harmina interage com moderada afinidade com receptores do SNC. Esse alcalóide liga-se com relativa afinidade a receptores cerebrais de serotonina, subtipos 5-HT<sub>2C</sub> e 5-HT<sub>2A</sub> e receptores imidazólicos (I<sub>1</sub> e I<sub>2</sub>) (GLENNON *et al.*, 2000; HUSBANDS *et al.*, 2001). Em relação aos receptores de serotonina 5-HT<sub>1A</sub>, receptores de dopamina D<sub>1</sub> e D<sub>2</sub> e receptores benzodiazepínicos, a harmina interage com pouca afinidade (GLENNON *et al.*, 2000).

Farzin e Mansouri (2006), demonstraram em seus estudos que a harmina diminuiu o tempo de imobilidade no TNF em camundongos, exercendo um efeito antidepressivo, possivelmente mediado pelos receptores I<sub>2</sub>. Em uma pesquisa realizada por Santos *et al.* (2007), com voluntários saudáveis, os quais ingeriram uma solução contendo alguns compostos, entre eles, a harmina, foi encontrado

mudanças em sintomas de desespero e de pânico, sugerindo-se mais pesquisas para o uso desses compostos para o tratamento desses sintomas.

### **2.2 Harmina e ação antioxidante**

Precusores indólicos das  $\beta$ -carbolinas, como tripfano e triptaminas, são conhecidos por possuírem atividade antioxidante (UEMURA *et al.*, 1988; CHRISTEN *et al.*, 1990), possivelmente por uma ação de detoxificação de espécies reativas de oxigênio (ERO). As  $\beta$ -carbolinas, por sua vez, possuem propriedades semelhantes (TSE *et al.*, 1991).

Em estudo realizado por Tse *et al.* (1991), a harmina inibiu a peroxidação lipídica em preparações microssomais hepáticas em ratos, agindo como seqüestradora de radicais livres, esta ação antioxidante e sua relativa eficácia são altamente dependente das modificações estruturais do anel  $\beta$ -carbolínico. Estes autores demonstram que a substituição do grupo hidroxil pelo grupo metoxil (harmol para harmina) e a desidrogenação do anel piridínico (harmalina para harmina) reduzem drasticamente a eficácia antioxidante *in vitro* das  $\beta$ -carbolinas.

## **II OBJETIVOS**

### **1. Objetivo Geral**

Avaliar os efeitos comportamentais e neuroquímicos do tratamento agudo e crônico de harmina em modelos animais de depressão.

### **2. Objetivos específicos**

- Verificar se a harmina administrada agudamente, em diferentes doses, exerce efeito antidepressivo no TNF.
- Verificar se a harmina administrada cronicamente, em diferentes doses, exerce efeito antidepressivo no TNF.
- Avaliar os efeitos da administração aguda e crônica de harmina nos níveis de BDNF após o TNF.
- Investigar o efeito da harmina, na dose de 15 mg/kg, sobre as alterações comportamentais induzidas pelo modelo de ECM.
- Avaliar os efeitos da administração crônica de harmina, na dose de 15 mg/kg, nos níveis de BDNF após o ECM.
- Avaliar os efeitos da harmina sobre os níveis de ACTH de ratos submetidos ao protocolo de ECM.
- Avaliar os efeitos harmina no peso da glândula adrenal de ratos submetidos ao protocolo de ECM.



## II – CAPÍTULO I

### **Acute harmine administration induces antidepressive-like effects and increases BDNF levels in the rat hippocampus**

Fortunato JJ, Réus GZ, Kirsch TR, Stringari RB, Stertz L, Kapczinski F, Pinto JP, Hallak JE, Zuardi AW, Crippa JA, Quevedo J.

**Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry**

**33 (2009) 1425-1430**

**II – CAPÍTULO II**

**Chronic administration of harmine elicits antidepressant-like effects and  
increases BDNF levels in the rat hippocampus**

**(Neurotoxicity Research – submitted)**

**CHRONIC ADMINISTRATION OF HARMINE ELICITS ANTIDEPRESSANT-LIKE  
EFFECTS AND INCREASES BDNF LEVELS IN THE RAT HIPPOCAMPUS**

Jucélia J. Fortunato<sup>a</sup>, Gislaine Z. Réus<sup>a</sup>, Tamires R. Kirsch<sup>a</sup>,  
Roberto B. Stringari<sup>a</sup>, Gabriel R. Fries<sup>b</sup>, Flávio Kapczinski<sup>b</sup>,  
Jaime E. Hallak<sup>c</sup>, Antônio W. Zuardi<sup>c</sup>, José A. Crippa<sup>c</sup>,  
and João Quevedo<sup>a\*</sup>.

<sup>a</sup>Laboratório de Neurociências and Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia Translacional em Medicina, Programa de Pós-Graduação em Ciências da Saúde, Unidade Acadêmica de Ciências da Saúde, Universidade do Extremo Sul Catarinense, 88806-000 Criciúma, SC, Brazil;

<sup>b</sup>Laboratório de Psiquiatria Molecular and Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia Translacional em Medicina, Centro de Pesquisas, Hospital de Clínicas de Porto Alegre, 90035-003 Porto Alegre, RS, Brazil,

<sup>c</sup>Departamento de Neurociências e Ciências do Comportamento and Instituto de Ciência e Tecnologia Translacional em Medicina, Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, 14049-900 Ribeirão Preto, SP, Brazil.

**\*Corresponding author:**

Prof. João Quevedo, MD, PhD  
Laboratório de Neurociências,  
Programa de Pós-Graduação em Ciências da Saúde,  
Unidade Acadêmica de Ciências da Saúde,  
Universidade do Extremo Sul Catarinense,  
88806-000 Criciúma, SC, Brazil  
Fax: +55 48 3443 4817.  
E-mail: [quevedo@unesc.net](mailto:quevedo@unesc.net)

**Abstract**

A growing body of evidence has pointed to the  $\beta$ -carboline harmine as a potential therapeutic target for the treatment of major depression. The present study was aimed to evaluate behavioural and molecular effects of the chronic treatment with harmine and imipramine in rats. To this aim, rats were treated for 14 days once a day with harmine (5, 10 and 15 mg/kg) and imipramine (10, 20 and 30 mg/kg) and then subjected to the forced swimming and open-field tests. Harmine and imipramine, at all doses tested, reduced immobility time of rats compared to the saline group, imipramine increase the swimming time at 20 e 30 and harmine increase at all doses, the climbing time increase in the rats treated with imipramine (10 and 30 mg/kg) and harmine (5 and 10 mg/kg), without affecting spontaneous locomotor activity. Brain-derived neurotrophic factor (BDNF) hippocampal levels were assessed in imipramine- and harmine-treated rats by ELISA sandwich assay. Interesting enough, chronic administration of harmine at the higher doses (10 and 15 mg/kg), but not imipramine, increased BDNF protein levels in the rat hippocampus. Finally, these findings further support the hypothesis that harmine could be a new drug target for the treatment of depression.

**Keywords:** harmine, imipramine, forced swimming test, monoamine oxidase, depression



## 1. Introduction

Depression is a serious mental illness that affects approximately 17% of the population and is a major cause of disability worldwide. Findings from World Health Organization predict that depression will be the leading cause of disability and premature death in the industrial world by the year 2020 (Mathers and Loncar, 2006).

Major depression encompasses a range of features that strongly suggest a neurobiological substrate. These include symptoms such as include sleep and appetite disturbances (both up and down), loss of interest and pleasure, negative rumination, fatigue, and poor concentration, but also apparent abnormalities of the hypothalamic-pituitary-adrenal axis or of neuroplasticity (Richard and Shelton, 2007; Garcia *et al.*, 2008a,b; Lucca *et al.*, 2008; Lucca *et al.*, 2009; Garcia *et al.*, 2009).

Basically all the clinically-used antidepressants increase the extracellular concentrations of monoamines serotonin or norepinephrine either by inhibiting their reuptake from the synapse or by blocking their degradation by inhibiting monoamine oxidase (Duman *et al.*, 1997; Nestler *et al.*, 2002; Castrén, 2005). Preclinical findings suggest that beta-carboline harmine present antidepressant-like actions in rodents subjected to an animal model of depression (Farzin and Mansouri, 2005; Fortunato *et al.*, 2009a;b). In fact, studies have demonstrated that harmine interact with monoamine oxidase A (MAO-A) (Kim *et al.*, 1997) and several cell-surface receptors, including serotonin receptor 2A (5-HT<sub>2A</sub>) (Glennon *et al.*, 2000) of which were involved in antidepressant pharmacotherapy (Preskorn *et al.*, 2008). Moreover we recently demonstrated that acute treatment with harmine at dose of 15 mg/kg increased BDNF protein levels in hippocampus of rats (Fortunato *et al.*, 2009).

A growing body of evidence has pointed to the role of brain-derived-neurotrophic factor (BDNF) in major depression. Alterations of hippocampal structure and function in response to stress provided the rationale for analysis of neurotrophic factors (Duman and Monteggia, 2006). Reduced brain BDNF levels have been found in *post-mortem* samples from depressed patients (Karege *et al.*, 2002), whereas brain infusion of BDNF produces antidepressant-like action in rats (Siuciak *et al.*, 1997; Shirayama *et al.*, 2002). In addition, exposure to stress decreases levels of BDNF in brain regions associated with depression, while antidepressant treatment produces opposite actions and blocks the effects of stress on BDNF (for a review see: Duman and Monteggia, 2006; Kozisek *et al.*, 2008). Interestingly, chronic, but not acute, antidepressant treatment induces increasing of BDNF expression and BDNF immunoreactive fibers in the hippocampus of rodents (Nibuya *et al.*, 1996; De Foubert *et al.*, 2004). Thus, agents capable of enhancing BDNF levels may lead aid the development of innovative antidepressant drugs (Zarate *et al.*, 2006; Garcia *et al.*, 2008a).

Thus, the main objective of the present study was to compare behavioral and molecular effects induced by chronic administration of harmine and imipramine in rats. The behavioral effects of both drugs were evaluated in the forced swimming test, which is a well valid behavioral despair assay widely used for screening antidepressant drugs (McArthur and Borsini, 2006). The BDNF protein levels were measured using an ELISA kit in the hippocampus of rats chronically treated with harmine and imipramine.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Animals

Male Adult Wistar rats (60 days old) were obtained from UNESC (Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, SC, Brazil) breeding colony. They were housed five per cage with food and water available *ad libitum* and were maintained on a 12-h light/dark cycle (lights on at 7:00 AM). All experimental procedures involving animals were performed in accordance with the NIH Guide for the Care and Use of Laboratory Animals and the Brazilian Society for Neuroscience and Behavior (SBNeC) recommendations for animal care and with approval by local Ethics Committee under protocol number 325/2008.

### 2.2. Drugs and treatments

Harmine was obtained from THC-Pharm/STI-Pharm (Frankfurt, Germany) and imipramine, the standard antidepressant, from Novartis Pharmaceutical Industry (Criciúma, Brazil). Different groups of rats (n=15 each) were administered intraperitoneally (IP) with saline or different doses of harmine (5, 10 and 15 mg/kg) or imipramine (10, 20 and 30 mg/kg) during 14 days (Garcia *et al.*, 2008b; Fortunato *et al.*, 2009). Imipramine and harmine were dissolved in saline immediately before the intraperitoneal injections. All treatments were administered in a volume of 1 mL/kg. Rats were tested in the open field and forced swim test following chronic imipramine and harmine treatments. Beginning on day 12 of chronic treatment, rats were tested in the open field in order to assess the spontaneous locomotor activity. On day 13 and 14 of chronic treatment, rats were then tested in the forced swimming test. From day 12 to 14 of chronic treatment, drug administration was done 60 min. before the

assessment of animal behaviour in the open field (day 12) and forced swimming test (days 13 and 14).

### 2.3. Forced swimming test

The forced swimming test was conducted according to previous reports (Porsolt *et al.*, 1977; Detke *et al.*, 1995; Garcia *et al.*, 2008a,b). The test involves two individual exposures to a cylindrical tank with water in which rats cannot touch the bottom of the tank or escape. The tank is made of transparent Plexiglas, 80 cm tall, 30 cm in diameter, and filled with water (22–23 °C) to a depth of 40 cm. On day 13 of chronic treatment, 1 hr after drug treatment rats were individually placed in the cylinder containing water for 15 min. (pre-test session). On the 14th day, rats received the last intraperitoneal drug treatment, and after 1 hr, they were subjected again to the forced swimming test for a 5-min. session (test session). During the test session some behavioural parameters were recorded in seconds, such as immobility time (i.e. no additional activity is observed other than that required to keep the rat's head above the water), climbing time, which is defined as upward-directed movements of the forepaws along the side of the swim chamber, and swimming time (i.e. movement usually horizontal throughout the swim chamber).

### 2.4. Open-field test

This apparatus consists of a brown plywood arena 45 × 60 cm surrounded by wood 50 cm high walls and containing a frontal glass wall. The floor of the open field was divided into nine rectangles (15 × 20 cm each) by black lines. Animals were gently placed on the left rear quadrant, and left to explore the arena for 5 min. After 12 days of treatment, rats were exposed to the open-field apparatus, and the number

of horizontal (crossings) and vertical (rearings) activity performed by each rat during the 5-min. observation period was counted by an expert observer.

#### 2.4. BDNF analysis

Immediately after the forced swimming test saline, imipramine and harmine-treated rats were sacrificed and the skulls were removed and hippocampus was dissected and stored at  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  for biochemical analysis. BDNF levels in hippocampus were measured by anti-BDNF sandwich-ELISA, according to the manufacturer instructions (Chemicon, USA). Briefly, rat hippocampus was homogenized in phosphate buffer solution (PBS) with 1 mM phenylmethylsulfonyl fluoride (PMSF) and 1 mM (EGTA). Microtiter plates (96-well flat-bottom) were coated for 24 h with the samples diluted 1:2 in sample diluent and standard curve ranged from 7.8 to 500 pg/ml of BDNF. The plates were then washed four times with sample diluent and a monoclonal anti-BDNF rabbit antibody diluted 1:1000 in sample diluent was added to each well and incubated for 3 h at room temperature. After washing, a peroxidase conjugated anti-rabbit antibody (diluted 1:1000) was added to each well and incubated at room temperature for 1 h. After addition of streptavidin-enzyme, substrate and stop solution, the amount of BDNF was determined by absorbance in 450 nm. The standard curve demonstrates a direct relationship between Optical Density (OD) and BDNF concentration. Total protein was measured by Lowry's method using bovine serum albumin as a standard, as previously described by Frey *et al.* (2006).

#### 2.5. Statistical analysis

All data are presented as mean±S.E.M. Differences among experimental groups in the forced swimming, open field test and in the assessment of BDNF levels were determined by one-way ANOVA, followed by Tukey *post-hoc* test when ANOVA was significant; p values less than 0.05 were considered to be statistical significant.

### 3. Results

As depicted in Fig. 1, the chronic administration of the standard antidepressant imipramine reduced, in a significant manner, the immobility time of rats at 10, 20 and 30 mg/kg compared to saline ( $F_{(6-58)} = 3,66$ ;  $P < 0.05$ ; Fig. 1A) imipramine increase the swimming time at 20 and 30 mg/kg ( $F_{(6-64)} = 9,79$ ;  $P < 0.05$ ; Fig.1A) and imipramine also increased the climbing time at 10 and 30 mg/kg ( $F_{(6-54)} = 4,68$ ;  $P < 0.05$ ; Fig. 1A) . The intraperitoneal treatment with harmine at the doses of 5, 10 and 15 mg/kg also decreased significantly the immobility time of rats compared to saline group ( $P < 0.05$ ; Fig. 1B). Moreover harmine also increased the swimming time at all doses ( $F_{(6-64)} = 9,79$ ;  $P < 0.05$ ; Fig. 1B) and increase the climbing at 5 and 15 mg/kg ( $F_{(6-54)} = 4,68$ ;  $P < 0.05$ ; Fig. 1B). In the open-field test, the treatment with harmine and imiprimine at all doses tested did not modify the number of crossing and rearing compared to saline treated-rats (Fig. 2A and B).

Fig. 3 illustrated the effects of the chronic treatment with imipramine (10, 20 and 30 mg/kg), harmine (5, 10 and 15 mg/kg) and saline in BDNF protein hippocampus levels of rats. A statistical significant increase in BDNF protein levels in the hippocampus was observed in rats treated with harmine only at the higher doses (10 and 15 mg/kg;  $F_{(6-64)} = 3.15$ ;  $P < 0.05$ ), but not with imipramine, compared to saline group.

#### 4. Discussion

The present study demonstrates that (i) the chronic treatment with all doses of harmine and imipramine decreased the immobility time of rats in the forced swimming test; (ii) the swimming time increase with harmine at all doses and imipramine at 20 and 30 mg/kg; (iii) the climbing time increase with harmine at 5 and 15 mg/kg and imipramine at 20 and 30 mg/kg; (iv) harmine and imipramine did not affect spontaneous locomotor activity in the open-field test; and (v) chronic treatment with harmine, but not imipramine, increased BDNF protein levels in the rat hippocampus.

In 1995, Detke *et al.* (1995) reported that despite the anti-immobility effects, antidepressant drugs that enhance noradrenergic neurotransmission increase climbing behaviour, whereas the enhancement of serotonergic neurotransmission increases swimming time in the rat forced swimming test.

In fact, findings from our group have demonstrated that a single injection of imipramine (10 and 20 mg/kg) and chronic administration of imipramine (10, 20 and 30 mg/kg) decreased the immobility time of rats in the forced swimming test, without modifying the locomotor activity (Garcia *et al.*, 2008a,b). Moreover chronic treatment with imipramine increased swimming time at doses of 20 and 30 mg/kg and increased climbing time at doses of 5 and 15 mg/kg in rats (Garcia *et al.*, 2008b).

Farzin and Mansouri (2005) demonstrated that acute treatment with harmane, norharmane and harmine dose-dependently reduced the immobility time in the mouse forced swimming test. In same study they demonstrated that flumazenil at a dose ineffective per se on the duration of immobility, antagonized the antidepressant-like effects of harmane, norharmane and harmine, provide evidence that  $\beta$ -carbolines harmane, norharmane and harmine induce an antidepressant-like effect via

stimulation of the benzodiazepine receptor in an inverse manner (Farzin and Mansouri, 2005). Moreover our group demonstrated recently that acute treatment with harmine at doses of 10 and 15 mg/kg decreased the immobility time and increased the swimming and the climbing time of rats (Fortunato *et al.*, 2009a). In this study also were demonstrated that harmine at 15 mg/kg, but did not imipramine increased BDNF protein levels in the rat hippocampus.

Taken together, these findings support rapid effects to harmine on behavioural tests used for screening antidepressant drugs. The present study demonstrates that 14 days of imipramine treatment, at doses of 10, 20 and 30 mg/kg reduced immobility time of rats subjected to the forced swimming test. These findings are in agreement with other authors that support reduction of immobility time in the forced swimming test after repeated administration of imipramine, especially at low doses (such as 10 mg/kg), which were acutely inactive (Gorka and Janus, 1985; Kawashima *et al.*, 1986; Garcia *et al.*, 2008a,b).

Interestingly enough, harmine also reduced immobility time in the forced swimming test at all doses tested, These findings show that chronic administration of harmine at low doses (i.e. 5 mg/kg) induces behavioural responses that were not elicited acutely, while at higher doses (i.e. 10 and 15 mg/kg) no signs of tolerance were observed after the chronic exposure (Fortunato *et al.*, 2009a).

Our findings also showed that chronically administration of harmine (10 and 15 mg/kg), but not imipramine, significantly increased BDNF protein levels in the rat hippocampus compared with saline group. The hippocampus is one of several limbic structures that have been implicated in mood disorders. Included in the functions of hippocampal circuitry are control of learning and memory and regulation of the hypothalamic-pituitary-adrenal (HPA) axis, both of which are altered in depression.



Alterations of hippocampal structure and function in response to stress provided the rationale for analysis of neurotrophic factors (Duman and Monteggia, 2006). Neurotrophic factors are critical regulators of the formation and plasticity of neural networks (Huang and Reichardt, 2001). Moreover, a growing body of evidence supports an important role of neurotrophic factors in mood disorders. Several studies have suggested that normal BDNF-TrkB receptor signaling is both necessary and sufficient for antidepressant drug action (for a review see: Castrén *et al.*, 2007; Kozisek *et al.*, 2008). BDNF-mediated signaling is involved in neuroplastic responses to stress and antidepressants (Krishnan and Nestler, 2008). In fact, reduced brain BDNF levels might be correlated to depression (Karege *et al.*, 2002), whereas increases in brain BDNF levels is suggested to produce an antidepressant action (Siuciak *et al.*, 1997; Shirayama *et al.*, 2002). Moreover, analysis of *postmortem* hippocampus demonstrates that the expression of BDNF is decreased in depressed suicide patients and increased in patients receiving antidepressant medication at the time of death (Chen *et al.*, 2001; Dwivedi *et al.*, 2003; Karege *et al.*, 2005).

Our present findings revealed that chronically administration of  $\beta$ -carboline harmine causes an increase of BDNF hippocampal levels detected immediately after the forced swimming test, which suggests that the antidepressant-like effects of harmine might be due to the increase of hippocampal BDNF protein levels. Our data also imipramine, did not alter BDNF protein levels in the hippocampus of rats subjected to the forced swimming test. Previous studies of our group also demonstrated that chronically administration of imipramine decreased the immobility time of rats in the forced swimming test, but did not alter BDNF protein levels in the hippocampus (Garcia *et al.*, 2008b).

However the antidepressant-like effects of harmine observed in the present study could be due to interactions of harmine with monoamine oxidase A (MAO-A) (Kim et al., 1997), and several cell-surface receptors, serotonin receptor 2A (5-HT<sub>2A</sub>) (Glennon et al., 2000), imidazoline receptors (I<sub>1</sub> and I<sub>2</sub> sites) (Husbands *et al.*, 2001), cyclindependent kinases (CDK1, 2, and 5) (Song *et al.*, 2004) and benzodiazepine receptor in an inverse manner (Farzin and Mansouri, 2005) involved in the modulation of behavioral and molecular actions of antidepressants. Future double-blind, placebo-controlled studies would be necessary and opportune to further confirm these observations in patients with major depression and to evaluate whether harmine could be a new option for this impairment disorder.

**Acknowledgements**

This study was supported in part by grants from CNPq-Brazil (JQ, FK, JAC, AWZ, and JEH), FAPESP-Brazil (JAC, AWZ, and JEH), FAPESC-Brazil (JQ), Instituto Cérebro e Mente-Brazil (JQ and FK) and UNESCO-Brazil (JQ ). JQ, FK, JAC and AWZ are recipients of CNPq (Brazil) Productivity fellowships. GZR is holder of a FAPESC/CAPES studentship. This study was also sponsored by THC-Pharm (Frankfurt, Germany) and STI-Pharm (UK) who kindly provided harmine.

## References

Astulla A, Zaima K, Matsuno Y, Hirasawa Y, Ekasari W, Widyawaruyanti A, Zaini NC, Morita H (2008) Alkaloids from the seeds of *Peganum harmala* showing antiplasmodial and vasorelaxant activities. *Journal Natural Medicine* 62:470-472.

Castrén E (2005) Is mood chemistry? *Nature Review Neuroscience* 6:241–246.

Castrén E, Vöikar V, Rantamäki T (2007) Role of neurotrophic factors in depression. *Current Opinion in Pharmacology* 7:18–21.

Chen B, Dowlathshahi D, MacQueen GM, Wang J-F, Young LT (2001) Increased hippocampal BDNF immunoreactivity in subjects treated with antidepressant medication. *Biological Psychiatry* 50:260 –265.

De Foubert G, Carney SL, Robinson CS, Destexhe EJ, Tomlinson R, Hicks CA, Murray TK, Gaillard JP, Deville C, Xhenseval V, Thomas CE, O'Neill MJ, Zetterström TS (2004) Fluoxetine-induced change in rat brain expression of brain-derived neurotrophic factor varies depending on length of treatment. *Neuroscience* 128:597–604.

Detke MJ, Rickels M, Lucki I (1995) Active behaviors in the rat forced swimming test differentially produced by serotonergic and noradrenergic antidepressants.

*Psychopharmacology* 121:66–72.

Duman RS, Heninger GR, Nestler EJ (1997) A molecular and cellular theory of depression. *Archives of General Psychiatry* 54:597–606.

Duman RS, Monteggia L M (2006) A neurotrophic model for stress-related mood disorders. *Biological Psychiatry* 59:1116–1127.

Dwivedi Y, Rao JS, Hooriyah SR, Kotowski J, Conley RR, Roberts RC, et al (2003) Abnormal expression and functional characteristics of cyclic adenosine monophosphate response element binding protein in postmortem brain of suicide subjects. *Archives of General Psychiatry* 60:273–282.

Farzin D, Mansouri N (2006) Antidepressant-like effect of harmaline and other  $\beta$ -carbolines in the mouse forced swim test. *European Neuropsychopharmacology* 324:328-316.

Frey BN, Andreazza AC, Ceresér KMM, Martins MR, Valvassori SS, Réus GZ, Quevedo J, Kapczinski F (2006) Effects of mood stabilizers on hippocampus BDNF levels in an animal model of mania. *Life Science* 79:281–286.

Garcia LB, Comim CM, Valvassori SS, Réus GZ, Barbosa LM, Andreazza AC, Stertz L, Fries G, Gavioli E, Kapczinski F, Quevedo J (2008a) Acute administration of ketamine induces antidepressant-like effects in the forced swimming test and increases BDNF levels in the rat hippocampus. *Progress in Neuro-Psychopharmacology & Biological Psychiatry* 32:140–144.

Garcia LB, Comim CM, Valvassori SS, Réus GZ, Barbosa LM, Andreazza AC, Stertz L, Fries G, Gavioli E, Kapczinski F, Quevedo J (2008b) Chronic Administration of Ketamine Elicits Antidepressant-Like Effects in Rats without Affecting Hippocampal Brain-Derived Neurotrophic Factor Protein Levels. *Basic & Clinical Pharmacology & Toxicology* 103:502–506.

Garcia LSB, Comim CM, Valvassori SS, Réus GZ, Stertz L, Kapczinski F, Gavioli EC, Quevedo J (2009) Ketamine treatment reverses behavioral and physiological alterations induced by chronic mild stress in rats. *Progress in Neuro-Psychopharmacology & Biological Psychiatry* in press.

Glennon RA, Dukat M, Grella B, Hong S, Costantino L, Teitler M, Smith C, Egan C, Davis K, Mattson MV (2000) Binding of beta-carbolines and related agents at serotonin (5-HT<sub>2</sub>) and 5-HT<sub>1A</sub>), dopamine (D<sub>2</sub>) and benzodiazepine receptors. *Drug Alcohol Dependence* 60:121–132.

Gorka Z, Janus K (1985) Effects of neuroleptics displaying antidepressant activity on behavior of rats in the forced swimming test. *Pharmacology Biochemistry Behavioural* 23:203–6.

Fortunato JJ, Réus GZ, Kirsch TR, Stringari RB, Stertz L, Kapczinski F, Pinto JP, Hallak JE, Zuardi AW, Crippa JA, Quevedo J (2009a). Acute harmine administration induces antidepressive-like effects and increases BDNF levels in the rat hippocampus. *Progress in neuropsychopharmacology biological psychiatry* in press.

Fortunato JJ, Réus GZ, Kirsch TR, Stringari RB, Fries G, Kapczinski F, Hallak JE, Zuardi AW, Crippa JA, Quevedo J (2009b). Effects of Beta-carboline harmine on behavioural and physiological parameters observed in the chronic mild stress model: further evidence of antidepressant properties. *Brain Research Bulletin* in press.

Huang EJ, Reichardt LF (2001) Neurotrophins: roles in neuronal development and function. *Annual Review of Neuroscience* 24:677-736.

Husbands SM, Glennon RA, Gorgerat S, Gough R, Tyacke R, Crosby J, Nutt DJ, Lewis JW, Hudson AL (2001) Betacarboline binding to imidazoline receptors. *Drug Alcohol Dependence* 64:203–208.

Im JH, Jin YR, Lee JJ, Yu JY, Han XH, Im SH, Hong JT, Yoo HS, Pyo MY, Yun YP (2009) Antiplatelet activity of  $\beta$ -carboline alkaloids from *Perganum harmala*: A possible mechanism through inhibiting PLC $\gamma$ 2 phosphorylation. *Vascular Pharmacology* 50:147–152.

Karege F, Perret G, Bondolfi G, Schwald M, Bertschy G, Aubry JM (2002) Decreased serum brain-derived neurotrophic factor levels in major depressed patients. *Psychiatry Research* 15:143–148.

Karege F, Vaudan G, Schwald M, Perroud N, La Harpe R (2005) Neurotrophin levels in postmortem brains of suicide victims and the effects of antemortem diagnosis and psychotropic drugs. *Brain Research Molecular Brain Research* 136:29–37.

Kawashima K, Araki H, Aihara H (1986) Effect of chronic administration of antidepressants on duration of immobility in rats forced to swim. *Japanese journal of pharmacology* 40:199–204.

Kim DH, Jang YY, Han ES, Lee CS (2001) Protective effect of harmaline and harmalol against dopamine- and 6-hydroxydopamine-induced oxidative damage of brain mitochondria and synaptosomes, and viability loss of PC12 cells. *European Journal of Neuroscience* 13:1861-1872.

Kim H, Sablin SO, Ramsay RR (1997) Inhibition of monoamine oxidase A by beta-carboline derivatives. *Archives of Biochemistry and Biophysics* 337:137–142.

Kozisek ME, Middlemas D, Bylund DB (2008) Brain-derived neurotrophic factor and its receptor tropomyosin-related kinase B in the mechanism of action of antidepressant therapies. *Pharmacology & Therapeutics* 117:30–51.

Krishnan V, Nestler EJ (2008) The molecular neurobiology of depression. *Nature* 455: 894-902.

Lucca G, Comim CM, Valvassori SS, Réus GZ, Vuolo F, Petronilho F, Gavioli EC, Dal-Pizzol F, Quevedo J (2008) Increased oxidative stress in submitochondrial particles into the brain of rats submitted to the chronic mild stress paradigm. *Journal Psychiatry Research* 18: in press.



Lucca G, Comim CM, Valvassori SS, Réus GZ, Vuolo F, Petronilho F, Dal-Pizzol F, Gavioli EC, Quevedo J (2009). Effects of chronic mild stress on the oxidative parameters in the rat brain. *Neurochemistry international* 54:358-362.

Mathers C, Loncar D (2006) Projections of global mortality and burden of disease from 2002 to 2030. *PLoS Medicine* 3: 442.

McArthur R, Borsini F (2006) Animal models of depression in drug discovery: a historical perspective. *Pharmacology Biochemistry Behavioral* 84:436–452.

Monteggia LM, Barrot M, Powell CM, Berton O, Galanis V, Gemelli T, Meuth S, Nagy A, Greene RW, Nestler EJ (2004) Essential role of brain-derived neurotrophic factor in adult hippocampal function. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 101:10827–10832.

Moura DJ, Richter MF, Boeira JM, Henriques JAP, Saffi J (2007) Antioxidant properties of b-carboline alkaloids are related to their antimutagenic and antigenotoxic activities. *Mutagenesis* 22:293–302.

Nestler EJ, Barrot M, DiLeone RJ, Eisch AJ, Gold SJ, Monteggia LM (2002) Neurobiology of depression. *Neuron* 34:13–25.

Nibuya M, Nestler EJ, Duman RS (1996) Chronic antidepressant administration increases the expression of cAMP response element binding protein (CREB) in rat hippocampus. *Journal Neuroscience* 16:2365–2372.

Parker, KJ, SCHATZBERG, AF, LYONS, DM. Neuroendocrine aspects of hypercortisolism in major depression. *Hormones and Behavior* 43(1):60-66.

Porsolt RD, Le Pichon M, Jalfre M (1977) Animal model of depression. *Nature* 266:730–732.

Preskorn SH, Baker B, Kolluri S, Menniti FS, Krams M, Landen JW (2008) An innovative design to establish proof of concept of the antidepressant effects of the NR2B subunit selective N-Methyl-D-Aspartate antagonist, CP-101,606, in patients with treatment-refractory major depressive disorder. *Journal Clinical Psychopharmacology* 28: 631-637.

Richard C, Shelton MD, (2007) The molecular neurobiology of depression. *The Psychiatric clinics of North America* 30: 1-11.

Seifert A, Allan LA, Clarke PR (2008) DYRK1A phosphorylates caspase 9 at an inhibitory site and is potently inhibited in human cells by harmine. *FEBS Journal* 275:6268–6280.

Sitz JH, Baumgärtel K, Hämmerle B, Papadopoulos C, Hekerman P, Tejedor FJ, Becker W, Lutz B (2008) The Down Syndrome candidate dual-specificity tyrosine phosphorylation-regulated kinase 1a phosphorylates the neurodegeneration-related septin 4. *Neuroscience* 157:596–605.

Siuciak JA, Lewis DR, Wiegand SJ, Lindsay RM (1997) Antidepressant-like effect of brain-derived neurotrophic factor (BDNF). *Pharmacology Biochemistry Behavioral* 56:131–137.

Song Y, Kesuma D, Wang J, Deng Y, Duan J, Wang JH, Qi RZ (2004) Specific inhibition of cyclin-dependent kinases and cell proliferation by harmine. *Biochemical and Biophysical Research Communications* 317:128–132.

Waki H, Park KW, Mitro N, Pei L, Damoiseaux R, Wilptz DC, Reue K, Saez E, Tontonoz P (2007) The small molecule harmine is an antidiabetic cell-type-specific regulator of PPAR $\gamma$  expression. *Cell Metabolism* 5:357–370.

Zarate Jr CA, Singh JB, Carson PJ, Brutsche NE, Ameli R, Luckenbaugh DA, Charney DS, Manji HK (2006) A randomized trial of an N-methyl-D-aspartate antagonist in treatment resistant major depression. *Arch Gen Psychiatry* 63:856–864.

FIGURES

Figure 1A

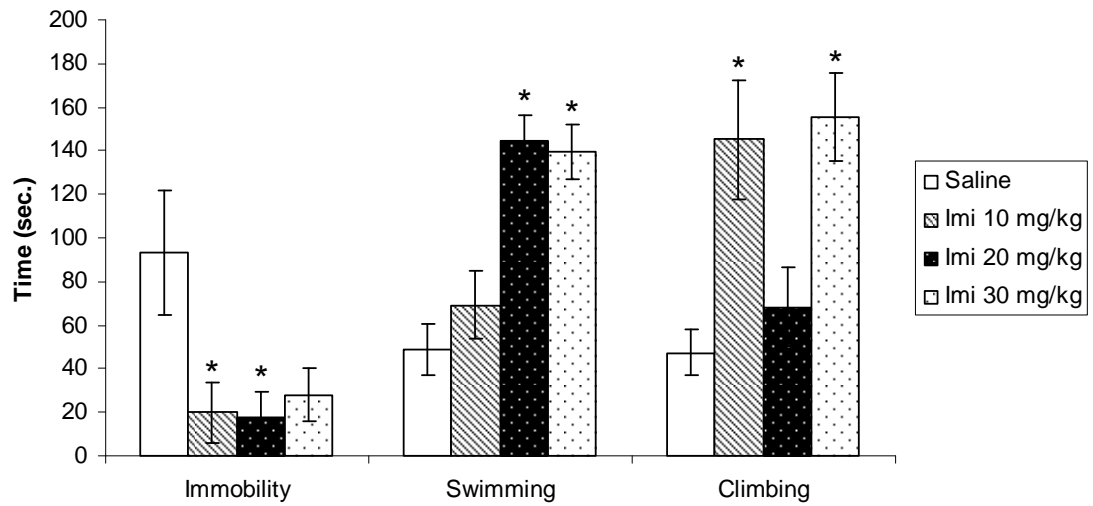


Figure 1B

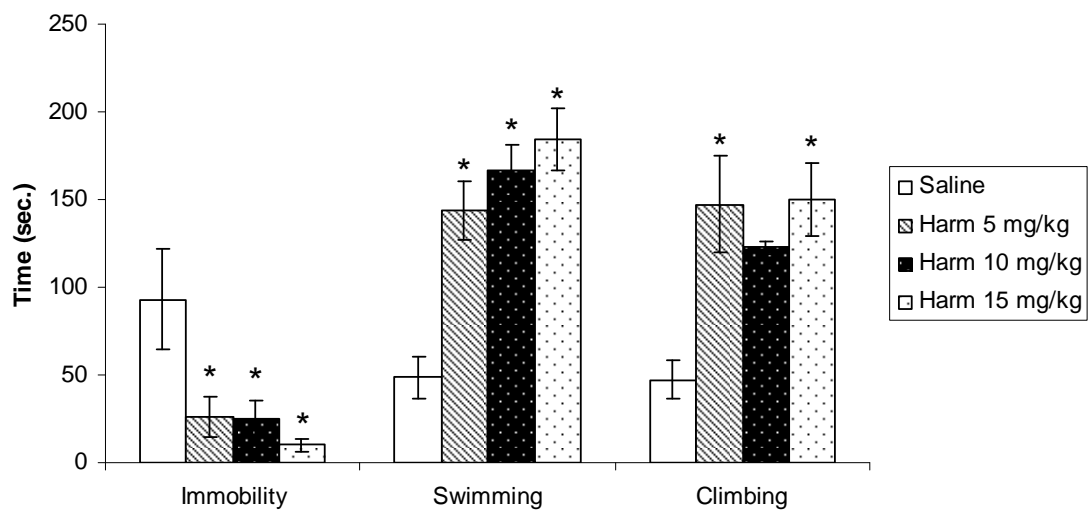


Figure 2A

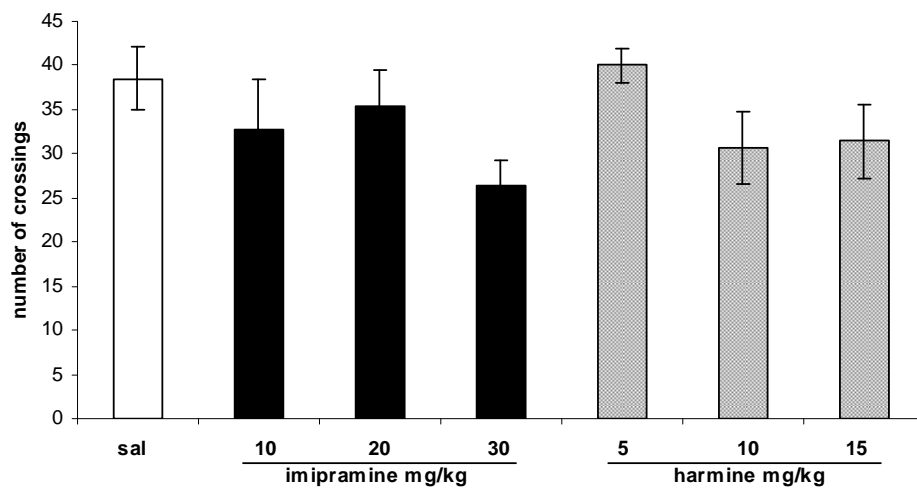


Figure 2B

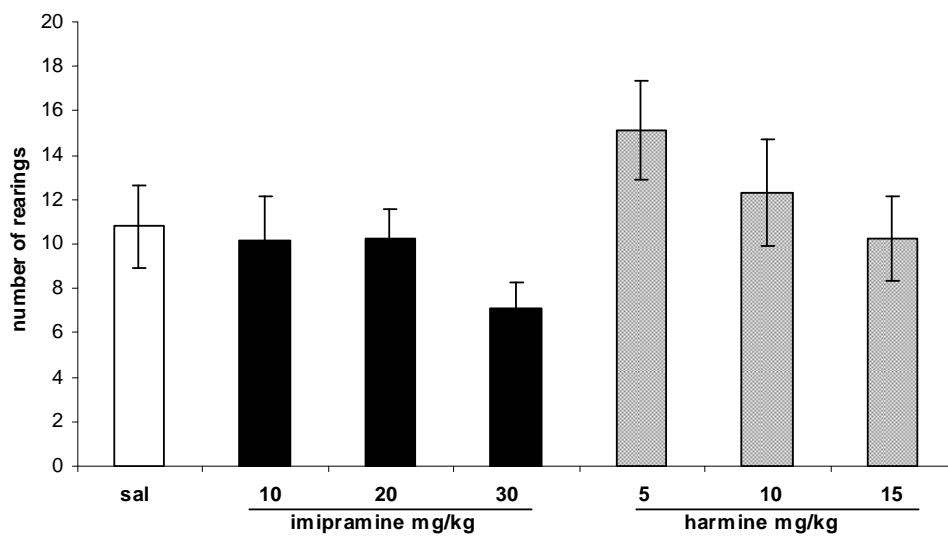
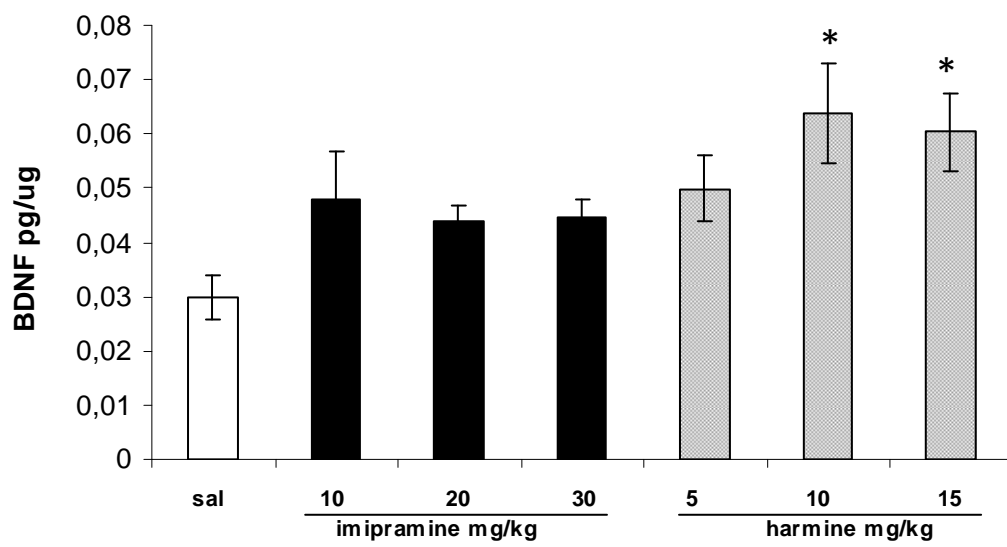


Figure 3



## LEGENDS OF FIGURES

**Figure 1** - Effects of the chronic administration of imipramine (10, 20 and 30 mg/kg, i.p.) (A) and harmine (5, 10 and 15 mg/kg, i.p.) (B) on the immobility, swimming and climbing time of rats subjected to the forced swimming test. Bars represent means±S.E.M. of 15 rats. \*  $p < 0.05$  vs. saline according to ANOVA followed by Tukey *post-hoc* test.

**Figure 2** - Effects of the chronic administration of harmine (5, 10 and 15 mg/kg, i.p.) and imipramine (10, 20 and 30 mg/kg, i.p.) on the number of crossings (A) and rearings (B) of rats subjected to the open field test. Bars represent means±S.E.M. of 15 rats. \*  $p < 0.05$  vs. saline according to ANOVA followed by Tukey *post-hoc* test.

**Figure 3** - Effects of the chronic administration of harmine (5, 10 and 15 mg/kg, i.p.) and imipramine (10, 20 and 30 mg/k, i.p.) on the BDNF levels in the rat hippocampus. Bars represent means±S.E.M. of 10 rats. \*  $p < 0.05$  vs. saline according to ANOVA followed by Tukey *post-hoc* test.

**II – CAPÍTULO III**

**Effects of beta-carboline harmine on behavioral and physiological parameters observed in the chronic mild stress model: further evidence of antidepressant properties**

Fortunato JJ, Réus GZ, Kirsch TR, Stringari RB, Fries G, Kapczinski F, Hallak JE, Zuardi AW, Crippa JA, Quevedo J.

**Brain Res Bull.** In Press, 2009.





### III DISCUSSÃO

O objetivo geral deste estudo foi avaliar os efeitos comportamentais e neuroquímicos da administração aguda e crônica (i.p.) de harmina em modelos animais de depressão. Os resultados mais relevantes deste trabalho mostraram que o tratamento agudo (10 e 15 mg/kg) e crônico (5, 10 e 15 mg/kg) de harmina diminuiu o tempo de imobilidade dos animais no TNF, mas não afetou a atividade locomotora espontânea avaliada no teste de exploração ao campo aberto (TCA); a administração crônica (15 mg/kg) de harmina reverteu o comportamento anedônico, diminuiu os níveis de BDNF, o peso da glândula adrenal e os níveis de ACTH circulante induzidos pelo ECM; os níveis de BDNF foram aumentados no hipocampo dos animais tratados agudamente (15 mg/kg) e cronicamente (10 e 15 mg/kg) com harmina. Desta forma, os resultados mostraram que a administração aguda e crônica de harmina produziu um efeito antidepressivo nos modelos animais utilizados neste estudo.

A harmina atua no SNC inibindo a enzima monoanino-oxidase tipo MAO A (KIM *et al.*, 1997; FARZIN e MANSOURI, 2006). A distribuição da MAO no cérebro apresenta pequenas variações entre as espécies. MAO-A é, predominantemente, encontrada em regiões com alta densidade de neurônios catecolaminérgicos como *locus coeruleus*, substância negra e regiões periventriculares do hipotálamo (WECKER *et al.*, 2001). Além de seu efeito inibitório sobre a MAO-A, alguns trabalhos tem demonstrado diferentes atividades biológicas para as  $\beta$ -carbolicinas: imunossupressora, mutagênica (BOEIRA *et al.*, 2001; DEVEAU *et al.*, 2001), antioxidante, possivelmente por sua ação de detoxificação de espécies reativas e

oxigênio (TSE *et al.*, 1991) e neuroprotetora (LEE *et al.*, 2000; KIM *et al.*, 2001; PARK *et al.*, 2003).

A depressão é uma condição médica amplamente desabilitadora e prevalente na população mundial associada com morbidade e mortalidade (NESTLER e CARLEZON, 2006; NEMEROFF *et al.*, 2007). Embora a terapia para a depressão com fármacos, psicoterapia e terapia eletroconvulsiva seja efetiva, um número significativo de pacientes não respondem bem a estes tratamentos (ANDERSON, 2000; BERTON e NESTLER, 2006). Em virtude disto, há uma grande necessidade de buscar novos alvos terapêuticos, a fim de tratar pacientes resistentes a tratamentos e diminuir os efeitos colaterais que ocorrem com o uso de antidepressivos.

No *Capítulo I*, observamos que os parâmetros utilizados para avaliar os possíveis efeitos indicadores de depressão a partir da administração aguda de harmina foram representados pela diminuição no tempo de imobilidade e aumento nos tempos de nado e *climbings* nas doses de 10 e 15 mg/kg durante o TNF (FORTUNATO *et al.*, 2009b). Resultados semelhantes foram descritos por FARZIN e colaboradores (2006).

O TNF foi desenvolvido por Porsolt *et al.* (1977), para auxiliar na pesquisa de substâncias antidepressivas. O objetivo foi criar um modelo animal que reproduzisse um comportamento semelhante à depressão e que fosse sensível aos fármacos utilizados clinicamente no tratamento desta patologia. No TNF, os animais são submetidos a um período de nado forçado em um espaço restrito, uma situação inescapável de estresse. Os animais executam inicialmente movimentos vigorosos na tentativa de escapar e depois de alguns minutos apresentam apenas pequenos movimentos que o impeçam de submergir, adotando uma postura de imobilidade

(PORSOLT *et al.*, 1977). Embora este modelo não reproduza adequadamente a sintomatologia da depressão em humanos, ele parece ter um alto valor preditivo na investigação de substâncias antidepressivas (WILLNER, 1984; 1997), uma vez que antidepressivos clássicos reduzem o tempo de imobilidade neste teste (PORSOLT *et al.*, 1977; CRYAN *et al.*, 2002), por isso, foi escolhido como um dos testes para avaliar o mecanismo de ação da harmina.

Os dados obtidos em camundongos (FARZIN e MANSOURI, 2006) e em ratos submetidos ao TNF (FORTUNATO *et al.*, 2009a,b) indicam claramente que o efeito antidepressivo induzido por administração de  $\beta$ -carbolina é um fenômeno consistente que se mantém em diferentes espécies e em diferentes testes experimentais utilizados para avaliar atividade antidepressiva (TNF e ECM).

A administração de imipramina (20 e 30 mg/kg), usada como controle positivo, diminuiu o tempo de imobilidade dos ratos tratados agudamente. Porsolt *et al.* (1978), já haviam demonstrado que o tratamento agudo com imipramina reduzia a variável do TNF de forma dose-dependente e que efeitos mais consistentes ainda poderiam ser obtidos através de tratamento crônico, como nos dados apresentados no Capítulo II, no qual o tratamento repetido diminuiu significativamente o tempo de imobilidade dos ratos.

Fazin e Mansouri (2006), sugerem que o efeito antidepressivo produzido pela harmina no TNF possa estar envolvido com as vias de estimulação do receptor benzodiazepínico (BZD) de maneira inversa. As  $\beta$ -carbolinas originam-se do aminoácido triptofano através da condensação entre a triptamina (produto da descarboxilação do triptofano) com o aldeído ou  $\alpha$ -cetoácido (HUSSON, 1985; DUCROT *et al.*, 2000). A partir dessa condensação formam-se alcalóides endógenos

que interagem com alta afinidade aos sítios BZD dos receptores GABA<sub>A</sub> como agonistas inversos (FAZIN e MANSOURI, 2006).

Atualmente, sabe-se que parte dos receptores para BZD, que seria responsável pela maioria de seus efeitos farmacológicos, localiza-se em membranas neuronais, como parte de um complexo oligomérico com receptores do tipo GABA<sub>A</sub> e seu canal de cloro associado. Os BZD modulariam alostéricamente os receptores do tipo GABA<sub>A</sub> (BOWERY, 1984; MARTIN, 1984; WILLIAMS, 1984; STEPHENSON, 1986). Entretanto, esta modulação pode determinar diferentes conseqüências funcionais, uma vez que estes receptores contêm sítios de reconhecimento para ligantes exógenos de alta afinidade. Entre eles estão os agonistas inversos, que dificultam o efeito do GABA, possuindo atividade intrínseca negativa, tal como as  $\beta$ -carbolinas (BOWERY, 1984; MARTIN, 1983, 1984).

Na década de 90, foi identificado um provável sítio regulatório da MAO, chamado sítio de ligação imidazolinico tipo I<sub>2</sub>. Muitos estudos vêm mostrando ações funcionais das  $\beta$ -carbolinas e sua alta afinidade para sítios de ligação imidazolinicos I<sub>2</sub> (HUDSON et al., 1999; HUBBANDS et al., 2001; FARZIN e MANSOURI, 2006). Os sítios I<sub>2</sub> foram identificados em muitos órgãos, tecidos e tipos celulares, como córtex cerebral (WIKBERG e UHLEN, 1990), astrócitos (REGUNATHAN et al., 1993a), medula adrenal (REGUNATHAN et al., 1993b) e plaquetas (MICHEL et al., 1989). Embora não esteja clara a função fisiológica destes sítios, alguns efeitos dos ligantes seletivos I<sub>2</sub> são relatados. Entre estes, destacam-se: indução de hiperplasia astrocítica em cérebro de ratos adultos (ALEMANY et al., 1995), atenuação da tolerância a antinocicepção induzida por opióides (BORONAT et al., 1998); papel neuroprotetor (BORONAT et al., 1998), aumento do consumo de alimento (BROWN et al., 1995); entre outros.

Nesse sentido, considerando que a harmina interage com sítios específicos I<sub>2</sub> (FARZIN e MANSOURI, 2006) e que seja capaz de alterar a atividade da MAO (KIM *et al.*, 1997) em determinados tecidos, o entendimento dos mecanismos de interação que envolve essas duas proteínas (sítios I<sub>2</sub> e MAO) pode explicar sua ação antidepressiva no TNF.

O TNF foi o teste escolhido para avaliar o mecanismo de ação da harmina, neste estudo, utilizando imipramina como controle positivo. O TCA foi utilizado neste trabalho para verificar se a harmina administrada aguda ou cronicamente provocava alteração na atividade locomotora.

As substâncias que aumentam a atividade locomotora podem produzir resultados positivos no TNF e seriam rejeitados como antidepressivos. No entanto, alguns fármacos como o bupropion, nomifensina e amineptina são antidepressivos utilizados na clínica, e aumentam a atividade locomotora dos animais (BORSINI e MELI, 1988). Neste estudo, o efeito antidepressivo da harmina não está associado a nenhum efeito motor, pois as doses em que a harmina demonstrou atividade antidepressiva não afetaram significativamente a locomoção no TCA. Este resultado indica que o efeito antidepressivo induzido pela harmina é específico.

Várias evidências indicam que os transtornos de humor estão associados com reduções regionais no volume encefálico, bem como no número, tamanho e densidade da glia e neurônios em discretas áreas do encéfalo (ZARATE *et al.*, 2003). Embora a fisiopatologia envolvida nessas mudanças morfométricas precise ser elucidada, os dados sugerem que as desordens de humor severas estão associadas com a redução da neuroplasticidade.

Embora os antidepressivos venham sendo utilizados há várias décadas, as bases neurobiológicas para explicar sua eficácia ainda são pouco compreendidas.

Mais recentemente, tem sido proposto que a necessidade de longo tratamento para que os antidepressivos possam exercer seus efeitos terapêuticos é por ativar mecanismos celulares que promovam a plasticidade neuronal. Por outro lado, a neuroplasticidade e a sobrevivência celular são reguladas por diferentes vias de sinalização, que podem ser alteradas na depressão (MANJI *et al.*, 2001; MANJI *et al.*, 2003). Vários estudos básicos e clínicos observaram reduções regionais do número (morte celular) ou do tamanho de glias e neurônios no hipocampo (atrofia neuronal) de pacientes deprimidos (MANJI *et al.*, 2001). Os antidepressivos bloqueiam ou revertem estes comprometimentos celulares através da ativação de vias de sinalização que regulam fatores envolvidos na sobrevivência celular (neuroproteção), como o BDNF (DUMAN *et al.*, 2000; MANJI *et al.*, 2000; D'AS e DUMAN, 2002).

O aumento da expressão de BDNF no hipocampo de ratos tratados agudamente com harmina, pode estar relacionado com a ação neuroprotetora, provavelmente devido à sua capacidade de bloquear receptores de NMDA e canais de cálcio.

O BDNF exerce sua ação neurotrófica e neuroprotetora através de uma cascata composta do receptor Trk (tirosina quinase), a via de sinalização celular MAPK/ERK e a ativação da expressão da proteína antiapoptótica Bcl2 (MANJI *et al.*, 2001; D'AS e DUMAN, 2002; HASHIMOTO *et al.*, 2004). A morte celular por apoptose parece estar envolvida em várias doenças neurodegenerativas crônicas (ADAMS e CORY, 1998). Desta maneira, o BDNF possui um efeito trófico para a sobrevivência celular, mas seu efeito neuroprotetor é principalmente devido à inibição da cascata de morte celular pela expressão de Bcl2.

As doses de imipramina administradas agudamente não provocaram efeito, inclusive reduzindo o conteúdo de BDNF no hipocampo. Parece que o tipo de antidepressivo e os distintos tratamentos podem influenciar os diferentes padrões de resposta da expressão de BDNF.

Os níveis de BDNF são também considerados como parâmetros relacionados à depressão (CASTREN *et al.*, 2007). Vários estudos suportam a hipótese do envolvimento de BDNF na depressão e sugerem um decréscimo dos níveis plasmáticos em pacientes não tratados com depressão maior (CASTREN *et al.*, 2007, LEE *et al.*, 2007). Em animais, baixos níveis de BDNF foram descritos quando submetidos a protocolos de estresse crônico (XU *et al.*, 2002). Além disso, estudos mostram que a expressão de BDNF também é modificada pelo estresse (TAPIA-ARANCIBIA *et al.*, 2004), e está envolvido na regulação da atividade do eixo HHA em resposta ao estresse no hipocampo, hipotálamo e hipófise (GIVALOIS *et al.*, 2001; RAGE *et al.*, 2002; MARMIGERE *et al.*, 2003; GIVALOIS *et al.*, 2004). Mais recentemente, um estudo mostrou que a administração intracerebroventricular, aguda ou crônica, de BDNF modifica a síntese e a liberação do hormônio liberador de corticotrofina e/ou a arginina vasopressina, modificando a liberação de hormônios como cortisol e adrenocorticotrofina (GIVALOIS *et al.*, 2004).

No *Capítulo II*, observamos que a administração crônica de harmina (5, 10 e 15 mg/kg) confirmou os resultados encontrados com a administração aguda deste composto, evidenciando diminuição no tempo de imobilidade observado no TNF e aumento nos níveis de BDNF no hipocampo dos animais experimentais. O conjunto destes efeitos poderia resultar na neuroproteção induzida pela harmina.

A administração crônica de imipramina também apresentou diminuição do tempo de imobilidade no TNF. Entretanto, a dose mais alta (30 mg/kg) não



apresentou resultados significativos para este parâmetro. Estes resultados sugerem que a dose de imipramina administrada pode influenciar na resposta comportamental deste modelo. Bai e colaboradores (2001), administraram diferentes doses de imipramina e observaram que em doses acima de 15 mg/kg, a duração do tempo de imobilidade retornava a resultados não significativamente diferentes de animais tratados com o veículo.

No *Capítulo VIII*, estudamos os efeitos do protocolo de ECM seguido da administração crônica de harmina (15 mg/kg). Uma das alterações encontradas neste modelo foi a anedonia (diminuição na ingestão de sacarose), apresentada pelos animais submetidos ao ECM. Os dados comportamentais gerados por esse estudo confirmam e expandem os achados prévios de que a exposição de ratos a estressores crônicos leves e variados gradualmente induz um estado anedônico acessado pela redução do consumo de comida doce – sacarose (WILLNER, 1997; STOUT *et al.*, 2000; GAMARO *et al.*, 2003b). Willner e colaboradores (1987, 1998), tem relatado que exposições crônicas seqüenciais a uma situação de estresse provoca uma diminuição da sensibilidade a recompensa, o que, geralmente, é relatado como uma resposta anedônica de ratos ou camundongos.

Episódios de depressão podem alterar os sistemas noradrenérgico, dopaminérgico e serotoninérgico e juntamente com a alteração do eixo HHA, estar ocasionando alterações comportamentais e bioquímicas relacionadas à este transtorno (MÁXIME, 2007).

Encontramos um aumento do peso médio da glândula adrenal dos ratos estressados em comparação com o grupo controle. O estímulo prolongado e intensificado do ACTH nas células do córtex da adrenal promove uma hipertrofia da glândula com aumento do seu peso (HARRO *et al.*, 2001; GAMARO *et al.*, 2003b).

Este é um parâmetro indireto da avaliação de hiperativação do eixo HHA. A hiperativação desse eixo promove consequências deletérias aos neurônios, podendo representar uma das causas de redução numérica e volumétrica de distintas regiões encefálicas encontradas em estudos de neuroimagem de pacientes com transtorno depressivo grave recorrente (RAJKOWSKA, 2000; SHELINE *et al.*, 2003; GONÇALVES *et al.*, 2006).

Animais estressados e pacientes com depressão mostraram volume hipocampal reduzido (FUCHS *et al.*, 2004; TSANKOVA *et al.*, 2006) ocasionado em parte, pela desregulação do eixo HHA (RAJKOWSKA, 2000). O volume hipocampal reduzido pode ter contribuído para uma liberação menor de BDNF, bem como sua síntese. A diminuição da liberação de BDNF modifica os receptores para esta neurotrofina e, conseqüentemente, não revertendo a redução do volume hipocampal e ainda interferindo na síntese de neurotransmissores (NETSLER, 2002b).

Ao contrário do que se esperava, embora utilizando um modelo de estresse baseado em modelos de depressão, os animais submetidos ao protocolo de ECM tiveram um aumento significativo nos níveis de BDNF no hipocampo, que foram revertidos com a administração crônica de harmina (FORTUNATO *et al.*, 2009a). A dor e o estresse são conhecidos como ativadores do eixo HHA e a estimulação deste sistema pode contribuir para a plasticidade do hipocampo (DURIC e McCARSON, 2006). É possível que os efeitos do ECM tenham produzido uma resposta adaptativa que tenha evidenciado o aumento nos níveis de BDNF. Adicionalmente, a administração crônica de antidepressivos pode regular a neurogênese e, conseqüentemente, reverter muitos dos efeitos causados pelo estresse no hipocampo (TSAI, 2003; DURIC e McCARSON, 2006).

A reversão do efeito antidepressivo da harmina no ECM parece não estar associada a nenhum efeito motor, pois a administração do antidepressivo isoladamente, não alterou a atividade locomotora no TCA (FORTUNATO *et al.*, 2009a), indicando que o efeito observado é específico.

A administração crônica de harmina reverteu o comportamento anedônico, o aumento de peso da glândula adrenal e, conseqüentemente, os níveis de ACTH circulante, o que demonstra que este modelo tem uma boa validade preditiva.

Por fim, em conjunto à crescente evidência de que a indução da via BDNF/trkB é um dos mecanismos responsáveis pelos efeitos terapêuticos dos antidepressivos (modelo animal e humanos) (COYLE e DUMAN, 2003), este estudo é a primeira evidência de que efeitos indicadores de depressão a partir da administração da harmina estão associados ao aumento nos níveis de BDNF no hipocampo de animais experimentais. Em conclusão, os resultados obtidos neste trabalho auxiliam a compreensão do mecanismo de ação antidepressivo e neuroprotetor da harmina e de seu possível papel no tratamento da depressão.

## IV CONCLUSÕES

### 1. Conclusão Geral

Os resultados apresentados neste estudo revelam que os tratamentos agudo e crônico com a  $\beta$ -carbolina harmina produziram efeito antidepressivo nos modelos animais utilizados.

### 2. Conclusões Específicas

- A administração aguda e crônica de harmina diminuiu o tempo de imobilidade no TNF.
- O efeito antidepressivo da harmina não está associado a nenhum efeito motor, já que as diferentes doses administradas não afetaram significativamente a atividade locomotora avaliada no TCA.
- A administração de imipramina (20 e 30 mg/kg), usada como controle positivo, diminuiu o tempo de imobilidade dos ratos tratados agudamente. No entanto, quando administrada cronicamente, na dose de 30 mg/kg, não apresentou resultados significativos para este parâmetro.
- Os níveis de BDNF foram aumentados no hipocampo dos ratos tratados aguda e cronicamente com harmina.
- O comportamento anedônico foi observado em animais submetidos ao protocolo de ECM e revertidos com a administração de harmina (15 mg/kg), durante sete dias consecutivos.
- Os animais submetidos ao protocolo de ECM também apresentaram aumento do peso médio da glândula adrenal e aumento nos níveis de ACTH

e de BDNF. Esses resultados também foram revertidos pela administração crônica de harmina (15 mg/kg).

## **V PERSPECTIVAS**

Apesar de novas descobertas e avanços no estudo das bases neurobiológicas e abordagens terapêuticas na depressão, elevadas taxas de recorrência, sintomas subsindrômicos persistentes e refratariedade terapêutica são aspectos clínicos desafiadores nesta doença.

Sendo assim, a busca por substâncias capazes de induzirem uma rápida e sustentável melhora do quadro clínico deste transtorno se faz necessário. Se estudos futuros replicarem nossos achados, indicando o efeito antidepressivo da harmina, este composto poderá representar um promissor alvo farmacológico para o tratamento da depressão.

Nossa perspectiva futura é conduzir paralelamente estudos em modelos animais e em humanos. Em modelos animais, pretendemos complementar os dados mostrados nesse trabalho, para uma melhor compreensão do mecanismo de ação da harmina. Em humanos, nosso desafio é realizar ensaios clínicos de fase I e II que servirão como estrutura para que o efeito terapêutico da harmina possa ser avaliado de forma metodologicamente adequada.

No presente, estamos finalizando uma série de experimentos com esse modelo avaliando o efeito neuroprotetor da harmina através de propriedades antioxidantes. Nosso objetivo é testar a hipótese de que o efeito neuroprotetor possa estar correlacionado com a ação antidepressiva deste composto.

## REFERÊNCIAS

ADAMS, J.M.; CORY, S. The Bcl-2 protein family: Arbiters of cell survival. **Science** 281:1322-1326, 1998.

ALEMANY, R.; OLMOS, G.; ESCRIBÁ, P. V.; MENARGUES, A.; OBACH, R.; GARCÍA-SEVILLA, J. A. LSL60101, a selective ligand for I2 receptors, on glial fibrillary acidid protein concetraion. **European Journal of Pharmacology** 280:205-210, 1995.

AMERICAN PSYCHIATRY ASSOCIATION. **Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders**. Washington, DC. 4th ed., 1994.

ANDERSON, I.M. Selective serotonin reuptake inhibitors versus tricyclic antidepressants: a attenuates the effects of antidepressants on the forced swim test in rats. **Journal of Affective Disorders** 58:19-36, 2000.

ASTULLA, A.; ZAIMA, K.; MATSUNO, Y.; HIRASAWA, Y.; EKASARI, W.; WIDYAWARUYANTI, A.; ZAINI, N.C.; MORITA, H. Alkaloids from the seeds of *Peganum harmala* showing antiplasmodial and vasorelaxant activities. **Journal of Natural Medicines** 62(4):470-472, 2008.

BAI, F.; CLAY, M.; LINDSTROM, T.; SKOLNICK, P. Intra and interstrain differences in models of "behavioral despair". **Pharmacology, Biochemistry and Behavior** 70:187-192; 2001.

BERTON, O.; NESTLER, E.J. New approaches to antidepressant drug discovery: beyond monoamines. **Nature Reviews Neuroscience** 7:137-151, 2006.

BILICI, M.; EFE, H.; KÖROGLU, M.A.; UYDU, H.A.; BEKAROGLU, M.; DEGER, O. Antioxidative enzyme activities and lipid peroxidation in major depression: alterations by antidepressant treatments. **Journal of Affective Disorders** 64:43-51, 2001.

BOEIRA, J.M.; SILVA, J.; ERDTMANN, B.; HENRIQUES, J.A.P. Genotoxic effects of the alkaloids Harman and Harimine by Comet assay and chromossome aberration test in mammalian cells in vitro. **Pharmacology & Toxicology** 89:287-284, 2001.

BORONAT, M. A.; OLMOS, G.; GARCÍA-SEVILLA, J. A. Attenuation of tolerance to opioid-induced antinociception and protection against morphine-induced decrease on neurofilament protein by idazoxan and other I2-imidazoline ligands. **British Journal of Pharmacology** 125:175-185, 1998.

BORSINI, F.; MELI, A. Is the forced swimming test a suitable model for revealing antidepressant activity? **Psychopharmacology** 94:147-160, 1988.

CALLAWAY, J.C.; RAYMON, L.P.; HEARN, W.L.; MCKENNA, D.J.; GROB, C.S.; BRITO, G.S.; MASH, D.C. Quantification of N,N-dimethyltryptamine and harmala alkaloids in human plasma after oral dosing with ayahuasca. **Journal Analytical Toxicology** 20:492-497, 1996.

CALLAWAY, J.C.; MCKENNA, D.J.; GROB, C.S.; BRITO, G.S.; RAYMON, L.P.; POLAND, R.E. ANDRADE, E.N.; ANDRADE, E.O.; MASH, D.C. Pharmacokinetics of Hoasca alkaloids in healthy humans. **Journal of Ethnopharmacology** 65(3):243-56, 1999.

CASTRÉN, E.; VÕIKAR, V.; RANTAMÄKI, T. Role of neurotrophic factors in depression. **Current Opinion in Pharmacology** 7:18-21, 2007.

COYLE, J.T.; DUMAN, R.S. Finding the intracellular signaling pathways affected by mood disorder treatments. **Neuron** 38:157-160, 2003.

CRISTEN, S.; PETERHANS, E.; STOCKER, R. Antioxidant activities of some tryptophan metabolites: Possible implication for inflammatory disease. **Proceedings National Academy Science USA** 87:2506-2510, 1990.

CRYAN, J. F.; MARKOU, A.; LUCKI, I. Assessing antidepressant activity in rodents: recent developments and future needs. **Pharmacological Sciences** 23:238-245, 2002.

CRYAN, J.F.; SLATTERY, D.A. Animal models of mood disorders: recent developments. **Current Opinion Psychiatry** 20:1-7, 2007.



CHEN, B.; DOWLATSHAHI, D.; MACQUEEN, G.M.; WANG, J.F., YOUNG, L.T. Increased hippocampal BDNF immunoreactivity in subjects treated with antidepressant medication. **Biological Psychiatry** 50:260-265, 2001.

DEVEAU, A.M.; LABROLI, M.A.; DIEKHAUS, C.M.; BARTHEN, M.T.; SMITH, K.S.; MACDONALD, T.L. The synthesis of amino-acid functionalized beta-carbolines as topoisomerases II inhibitors. **Bioorganic & Medical Chemistry Letters** 11: 1251-1255, 2001.

DEVECI, A.; AYDEMIR, O.; TASKIN, O.; TANELI, F.; ESEN-DANACI, A. Serum brain-derived neurotrophic factor levels in conversion disorder: comparative study with depression. **Psychiatry and Clinical Neuroscience** 61:571-573, 2007.

D'SA, C., DUMAN, R.S. Antidepressants and neuroplasticity. **Bipolar Disorders** 4:183-194, 2002.

DUCORT, P.; RABHIL, C.; THAL, C. Synthesis of tetrahydro- $\beta$ -carbolines and studies of the Picet-Spengler reaction. **Tetrahedron** 56:2683-2692, 2000.

DUMAN, R.S.; MALBERG, J.; NAKAGAWA, S.; D'SA, C. Neuronal plasticity and survival in mood disorders. **Biological Psychiatry** 48:732-739, 2000.

DUNN, A.J.; SWIERGIEL, A.H.; BEAUREPAIRE, R. Cytokines as mediators of depression: what can we learn from animal studies? **Neuroscience & Biobehavioral Reviews** 29:891-909, 2005.

DURIC, V.; MCCARSON, K.E. Persistent pain produces stress-like alterations in hippocampal neurogenesis and gene expression. **The Journal of Pain** 7(8):544-55, 2006.

DWIVEDI, Y.; RIZAVI, H.S.; CONLEY, R.R.; ROBERTS, R.C.; TAMMINGA, C.A.; PANDEY, G.N. Altered gene expression of brain-derived neurotrophic factor and receptor tyrosine kinase B in post-mortem brain of suicide subjects. **Archives of General Psychiatry** 60:804-815, 2003.

ELLENBROEK, B.A., COOLS, A.R. Animal models with construct validity for schizophrenia. **Behavioural Pharmacology** 6:469-490, 1990.

FARZIN, D.; MANSOURI, N. Antidepressant-like effect of harmine and other  $\beta$ -carbolines in the mouse forced swim test. **European Neuropsychopharmacology** 16:324-328, 2006.

FORTUNATO, J.J.; RÉUS, G.Z.; KIRSCH, T.R.; STRINGARI, R.B.; FRIES, G.; KAPCZINSKI, F.; HALLAK, J.E.; ZUARDI, A.W.; CRIPPA, J.A.; QUEVEDO, J. Effects of beta-carboline harmine on behavioral and physiological parameters observed in the chronic mild stress model: further evidence of antidepressant properties. **Brain Research Bulletin** 2009a (*in press*).

FORTUNATO, J.J.; RÉUS, G.Z.; KIRSCH, T.R.; STRINGARI, R.B.; STERTZ, L.; KAPCZINSKI, F.; PINTO, J.P.; HALLAK, J.E.; ZUARDI, A.W.; CRIPPA, J.A.; QUEVEDO, J. Acute harmine administration induces antidepressant-like effects and increases BDNF levels in the rat hippocampus. **Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry** 33:1425-1430, 2009b.

FREEDLAND, C.S.; MANSBACH, R.S. behavioral profile of constituents in ayahuasca, an Amazonian psychoactive plant mixture. **Drug and Alcohol Dependence** 54:183-194, 1999.

FROGER, N; PALAZZO, E; BONI, C; HANOUN, N; SAURINI, F; JOUBERT, C; DUTRIEZ-CASTELOOT, I; ENACHE, M; MACCARI, S; BARDEN, N; COHENSALMON, C; HAMON, M; LANFUMEY, L. Neurochemical and behavioral alterations in glucocorticoid receptor-impaired transgenic mice after chronic mild stress. **Journal of Neuroscience** 24(11):2787-96, 2004.

FUCHS E; CZÉH B; KOLE MH; MICHAELIS T; LUCASSEN PJ. Alterations of neuroplasticity in depression: the hippocampus and beyond. **European Neuropsychopharmacology** 5:481-490, 2004.

FUCHS, E.; FLÜGGE, G.; OHL, F.; LUCASSEN, P.; VOLLMANN-HONSDORF, G.K.; MICHAELIS, T. Psychosocial stress, glucocorticoids, and structural alterations in the tree shrew hippocampus. **Physiology & Behavior** 73(3):285-91, 2001.

GABILONDO, A.M.; MEANA, J.J.; GARCÍA-SEVILLA, J.A. Increased density of mu-opioid receptors in the postmortem brain of suicide victims. **Brain Research** 682:245-250, 1999.

GALEOTTI, N.; BARTOLINI, A.; GHELARDINI, C. Blockade of intracellular calcium release induces an antidepressant-like effect in the mouse forced swimming test.

**Neuropharmacology** 50:309-316, 2006.

GAMARO, G.D.; MATTÉ, C.; PREDIGER, M.E.; WYSE, A.T.; DALMAZ, C. Reduction of hippocampal Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> -ATPase activity in rats subjected to an experimental model of depression. **Neurochemical Research** 28:1339-1344, 2003.

GAMARO, GD; MANOLI, LP; TORRES, ILS; SILVEIRA, R; DALMAZ, C. Effects of chronic variate stress on feeding behavior and on monoamine levels in different rat brain strutures. **Neurochemistry International** 42:107-114, 2003.

GILLESPIE, CF; NEMEROFF, CB. Hypercortisolemia and depression.

**Psychosomatic Medicine** 67:26-28, 2005.

GIVALOIS L; MARMIGE`RE F; RAGE F. Immobilization stress rapidly and differentially modulates BDNF and TrkB mRNA expression in the pituitary gland of adult male rats. **Neuroendocrinology** 74:148–159, 2001.

GIVALOIS L; NAERT G; RAGE F; IXART G; ARANCIBIA S; TAPIA-ARANCIBIA L. A single brain-derived neurotrophic factor injection modifies hypothalamo-pituitaryadrenocortical axis activity in adult male rats. **Molecular and Cellular Neurosciences** 27:280–295, 2004.

GLENNON, R.A.; DUKAT, M.; GRELLA, B.; HONG, S.; COSTANTINO, L.; TEITLER, M.; SMITH, C.; EGAN, C.; DAVIS, K.; MATTSON, M.V. Blinding of betacarboline and related agents as serotonin (HT(2) and HT(1A)), dopamine (D2)) and benzodiazepine receptors. **Drug and Alcohol Dependence** 60:121-132, 2000.

GOLD, P.W.; WONG, M.L.; CHROUSOS, G.P.; LICINIO, J. Stress system abnormalities in melancholic and atypical depression: molecular, pathophysiological, and therapeutic implications. **Molecular Psychiatry** 1:257-264, 1996.

GONÇALVES, F.A.; COELHO, R. Depressão e Tratamento: Apoptose, Neuroplasticidade e Antidepressivos. **Acta Portuguese Medical** 19:9-20, 2006.

- HARRO, J; TONISSAAR, M; ELLER, M; KASK, A, ORELAND, L. Chronic variable stress and partial 5-HT denervation by parachloroamphetamine treatment in the rat: effects on behavior and monoamine neurochemistry. **Brain Research** 899:227–239, 2001.
- HASHIMOTO, K.; SHIMIZU, E.; IYO, M. Critical role of brain-derived neurotrophic factor in mood disorders. **Brain Research** 45:104-114, 2004.
- HASHIMOTO, Y.; KAWANISHI, K.; MORRIYASI, M. Forensic chemistry of alkaloids. **The alkaloids: Chemistry and Pharmacology** 32:40-45, 1988.
- HOLSBOER, F.; BARDEN, N. Antidepressants and hypothalamic-pituitary-adrenocortical regulation. **Endocrine Reviews** 17:187-205, 1996.
- HUDSON, A. L. GOUGH, R.; TYACKE, R.; LIONE, L.; LALIES, M.; LEWIS, J.; HUSBANDS, S.; KNIGHT, P.; MURRAY, F.; HUTSON, P.; NUTT, D.J. Novel selective compounds for the investigation of imidazoline receptors. **Annals of the New York Academy of Sciences** 881:81-91, 1999.
- HUSBANDS, S.M.; GLENNON, R.A., GORGERAT, S.; GOUGH, R.; TYACKE, R.; NUTT, D.J.; LEWIS, J.W.; HUDSON, A.L.  $\beta$ -carboline binding to imidazole receptors. **Drug and Alcohol Dependence** 64:203-208, 2001.
- HUSSON, H.P. The simple indole alkaloids. In Brossi, A. **The alkaloid: Chemistry and Pharmacology** Academic Press Inc, Orlando, 26:35-50, 1985.
- KANARIK, M; MATROV, D.; KÕIV, K.; ELLER, M.; TÕNISSAAR, M.; HARRO, J. Changes in regional long-term oxidative metabolism induced by partial serotonergic denervation and chronic variable stress in rat brain. **Neurochemistry International** 52:432–437, 2008.
- KARALLIEDDE, L.; WHEELER, H.; MACLEHOSE, R.; MURRAY, V. Possible immediate and long-term health effects following exposure to chemical warfare agents. **Public Health** 114(4): 238-48, 2000.

- KAREGE, F.; PERRET, G.; BONDOLFI, G.; SCHWALD, M.; BERTSCHY, G.; AUBRY, J.M. al. Decreased serum brain-derived neurotrophic factor levels in major depressed patients. **Psychiatry Research** 109:143–148, 2002.
- KIM, D.H.; JANG, Y.Y.; HAN, E.; LEE, C.S. Protective effect of harmaline and harmalol against dopamine and 6-hydroxydopamine-induced oxidative damage of brain mitochondria and synaptosomes, and viability loss of PC12 cells. **European Journal of Neuroscience** 13:1861-1872, 2001.
- KIM, H.; SABLIN, S.O.; RAMSAY, R.R. Inhibition of monoamine oxidase A by  $\beta$ -carboline derivatives. **Archives of Biochemistry and Biophysics** 337:137-142, 1997.
- LANG, U.E.; HELLWEG, R.; GALLINAT, J. BDNF serum concentrations in healthy volunteers are associated with depression-related personality traits. **Neuropsychopharmacology** 29:795-798, 2004.
- LEE B.H.; KIM H.; PARK S.H.; KIM Y.K. Decreased plasma BDNF level in depressive patients. **Journal of Affective Disorders** 101:239-44, 2007.
- LEE, S.L.; HAN, E.S.; JANG, Y.Y.; HAN, J.H.; HA, H.W.; KIM, D.E. Protective effect of harmalol and harmaline on MPTP neurotoxicity in the mouse and dopamine-induced damage of brain mitochondria and PC12 cell. **Journal of Neurochemistry** 75:521-531, 2000.
- LUCCA, G.; COMIM, C.M.; VALVASSORI, S.S.; RÉUS, G.Z.; VUOLO, F.; PETRONILHO, F.; DAL-PIZZOL, F.; GAVIOLI, E.C.; QUEVEDO, J. Effects of chronic mild stress on the oxidative parameters in the rat brain. **Neurochemistry International** 54(56):358-362, 2009.
- MANJI, H.K., DREVETS, W.P., CHARMEY D.S. The cellular neurobiology of depression. **Nature Medicine** 7:541-547, 2001.
- MANJI, H.K., MOORE, G.J., RAJKOWSKA, G., CHEN, G. Neuroplasticity and cellular resilience in mood disorders. **Molecular Psychiatry** 5:578-593, 2000.
- MANJI, H.K.; QUIROZ, J.A.; SPORN, J.; PAYNE, J.L.; DENICOFF, K.; GRAY, N.A. Enhancing neuronal plasticity and cellular resilience to develop novel, improved

therapeutics for difficult-to-treat depression. **Biological Psychiatry** 53:707-742, 2003.

MARMIGÈRE F; GIVALOIS L; RAGE F; ARANCIBIA S; TAPIA-ARANCIBIA L. Rapid induction of BDNF expression in the hippocampus during immobilization stress challenge in adult rats. **Hippocampus** 13:646–655, 2003.

MAXIME V; SIAMI S; ANNANE D. Metabolism modulators in sepsis: the abnormal pituitary response. **Critical Care Medicine** 35:596-601, 2007.

MICHEL, M. C.; BRODDE, O. E.; SCHNEPEL, B.; BEHRENDT, J.; TSCHADA, R. [3H]-Idazoxan and some other alpha 2-adrenergic drugs also binds with high affinity to a nonadrenergic site. **Molecular Pharmacology** 35:324-30, 1989.

MONTELEONE, P.; SERRITELLA, C.; MARTIADIS, V.; MAJ, M Decreased levels of serum brain-derived neurotrophic factor in both depressed and euthymic patients with unipolar depression and in euthymic patients with bipolar I and II disorders. **Bipolar Disorders** 10:95–100, 2008.

NAKAGAWA, Y.; ISHIMA, T.; ISHIBASHI, Y.; YOSHII, T.; TAKASHIMA, T. Involvement of GABA(B) receptor systems in action of antidepressants: baclofen but not bicuculline attenuates the effects of antidepressants on the forced swim test in rats. **Brain Research** 709:215-220, 1996.

NARDI, A.E. Depressão no ciclo da vida. **Revista Brasileira de Psiquiatria** 22: 49-152, 2000.

NEMEROFF, C.B. The corticotropin-releasing factor (CRF) hypothesis of depression: new findings and new directions. **Molecular Psychiatry** 1:336-42, 1996.

NEMEROFF, C.B.; OWENS, M.J. Treatment of mood disorders. **Nature Neuroscience** 5:1068-1070, 2002.

NEMEROFF, C.B., KALALI, A., KELLER, M.B., CHARNEY, D.S., LENDERTS, S.E., CASCADE, E.F., STEPHENSON, H., SCHATZBERG, A.F. Impact of publicity concerning pediatric suicidality data on physician practice patterns in the United States. **Archives of General Psychiatry** 64:466–472, 2007.

NESTLER EJ; BARROT M; DILEONE RJ; EISCH AJ; GOLD SJ; MONTEGGIA LM. Neurobiology of depression. **Neuron** 28:13-25, 2002.

NESTLER, E.J.; CARLEZON, W.A.Jr. The mesolimbic dopamine reward circuit in depression. **Biological Psychiatry** 59(12):1151-9, 2006.

NESTLER, E.J.; GOULD, E.; MANJI, H.; BUNCAN, M.; DUMAN, R.S.; GRESHENFELD, H.K.; HEN, R.; KOESTER, S.; LEDERHENDLER, I.; MEANEY, M.; ROBBINS, T.; WINSKY, L.; ZALCMAN, S. Preclinical models: status of basic research in depression. **Biological Psychiatry** 52:503-528, 2002.

NIBUYA, M.; MORINOBU, S.; DUMAN, R.S. Regulation of BDNF and trkB mRNA in rat brain by chronic electroconvulsive seizure and antidepressant drug treatments. **The Journal of Neuroscience** 15(11):7539-47, 1995.

PARK, T.H.; KWON, O.S.; PARK, S.Y.; HAN, E.S.; LEE, C.S. N-methylated  $\beta$ -carbolines protect PC12 cells from cytotoxic effects of MPP<sup>+</sup> by attenuation of mitochondrial membrane permeability change. **Neuroscience Research** 46:349-358, 2003.

PARKER, K.J.; SCHATZBERG, A.F.; LYONS, D.M. Neuroendocrine aspects of hypercortisolism in major depression. **Hormones and Behavior** 43:60-66, 2003.

PATAPOUTIAN, A.; REICHARDT, L.F. Trk receptors: Mediators of neurotrophin action. **Current Opinion in Neurobiology** 11:272-280, 2001.

PERERA, T.D.; COPLAN, J.D.; LISANBY, S.H.; LIPIRA, C.M.; ARIF, M.; CARPIO, C.; SPITZER, G.; SANTARELLI, L.; SCHARF, B.; HEN, R.; ROSOKLIJA, G.; SACKEIM, H.A.; DWORK, A.J. Antidepressant-induced neurogenesis in the hippocampus of adult nonhuman primates. **The Journal of Neuroscience** 27:4894-4901, 2007.

PETRIE, R.X.A.; REID, I.C.; STEWART, C.A. The N-methyl-D-aspartate receptor, synaptic, plasticity, and depressive disorder. A critical review. **Clinical Pharmacology Therapy** 87:11-25, 2000.

PITTENGER, C.; DUMAN, R.S. Stress, depression, and neuroplasticity: a convergence of mechanisms. **Neuropsychopharmacology** 33:88-109, 2008.

POO, M.M. Neurotrophins as synaptic modulators. **Nature Reviews Neuroscience** 2:24-32, 2001.

POPOLI, M., BRUNELLO, N., PEREZ, J., RAEAGNI, G. Second messenger-regulated protein kinases in the brain: their functional role and the action of antidepressant drugs. **Journal of Neurochemistry** 74:21-33, 2000.

PORSOLT, R.D.; ANTON, G.; BLAVET, N.; JALFRE, M. Behavioural despair in rats: a new model sensitive to antidepressant treatments. **European Journal of Pharmacology** 47:379-391, 1978.

PORSOLT, R. D.; Le PICHON, M.; JALFRE, M. Depression: a new animal model sensitive to antidepressant treatments. **Nature** 21:266-730, 1977.

RAGE F; GIVALOIS L; MARMIGÈRE F. Immobilization stress rapidly modulates BDNF mRNA expression in the hypothalamus of adult male rats. **Neuroscience** 112:309–318, 2002.

RAJKOWSKA, G. Postmortem studies in mood disorders indicate altered numbers of neurons and glial cells. **Biological Psychiatry** 48(8):766-77, 2000.

REGUNATHAN, S.; FEINSTEIN, D. L.; REIS, D. J Expression of non-adrenergic imidazoline sites in rat cerebral cortical astrocytes. **Journal of Neuroscience Research** 34:681-88, 1993a.

REGUNATAHN, S.; MEELEY, M. P.; REIS, D. J. Expression of non-adrenergic imidazoline sites in chromaffin cells and mitochondrial membranes of bovine adrenal medulla. **Biochemical Pharmacology** 45:1667-75, 1993b.

ROCERI, M.; HENDRIKS, W.; RACAGNI, G.; ELLENBROEK, B.A.; RIVA, M.A. Early maternal deprivation reduces the expression of BDNF and NMDA receptor subunits in rat hippocampus. **Molecular Psychiatry** 7:609-616, 2002.



SANACORA, G.; ZARATE, C.A.; CRISTAL, J.H.; MANJI, H.K. Targeting the glutamatergic system to develop novel, improved therapeutics for mood disorders.

**Nature Reviews** 7:426-437, 2008.

SANTOS, R.G.; LANDEIRA-FERNANDEZ, J.; STRASSMAN, R.J.; MOTTA, V.; CRUZ, A.P.M. Effects of ayahuasca on psychometric measures of anxiety, panic-like and hopelessness in Santo Daime members. **Journal of Ethnopharmacology**

112:507-513, 2007.

SAPOLSKY, R.M. Glucocorticoid toxicity in the hippocampus: reversal by supplementation with brain fuels. **The Journal Neuroscience** 6:2240-2244, 1986.

SATTLER, R.; ROTHSTEIN, J.D. Targeting an old mechanism in a new disease – protection of glutamatergic dysfunction in depression. **Biological Psychiatry** 61:137-138, 2007.

SCHILDKRAUT, J. J. The catecholamine hypothesis of affective disorders: a review of supporting evidence. **The American Journal of Psychiatry** 122:509-522, 1965.

SHELIN, YI; GADO, MH; KRAEMER, HC. Untreated depression and hippocampal volum loss. **The American Journal of Psychiatry** 160(8):1516-1518, 2003.

SHELTON RC. The molecular neurobiology of depression. **Psychiatric Clinics of North America** 30(1):1-11, 2007.

SHIMIZU, E.; HASHIMOTO, K.; OKAMURA, N.; KOIKE, K.; KOMATSU, N.; NAKAZATO, M.; WATANABE, H.; SHINODA, N.; OKADA, S.; IYO, M. Alterations of serum levels of brain-derived neurotrophic factor (BDNF) in depressed patients with or without antidepressants. **Biological Psychiatry** 54:70-75, 2003.

SHIRAYAMA, Y.; CHEN, A.C.; NAKAGAWA, S.; RUSSELL, D.S.; DUMAN, R.S. Brain-derived neurotrophic factor produces antidepressant effects in behavioral models of depression. **The Journal of Neuroscience** 22:3251-3261, 2002.

SPIEGEL, D. Cancer and depression. **The British Journal of Psychiatry** Suppl: 109-16, 1996.

STOUT SC, MORTAS P, OWENS MJ, NEMEROFF CB, MOREAU J. Increased corticotropin-releasing factor concentrations in the bed nucleus of the stria terminalis of anhedonic rats. **European Journal of Pharmacology** 401(1):39-46, 2000.

TAPIA-ARANCIBIA L, RAGE F, GIVALOIS L, et al: Physiology of BDNF: focus on hypothalamic function. **Frontiers in Neuroendocrinology** 25:77–107, 2004.

TAYLOR, C., FRICKER, A.D., DEVI, L. A., GOMES, I. Mechanisms of action of antidepressants: from neurotransmitter systems to signaling pathway. **Cellular Signalling** 17:549-557, 2005.

TOTSUKA, Y.H.; USHIYAMA, H.; ISHIHARA, J.; SINHA, R.; GOTO, S.; SUGIMURA, T.; WAKABAYASHI, K. Quantification of the co-mutagenic beta-carboline, norharman and Harman, in cigarette smoke condensates and cooked foods. **Cancer Letters** 143:139-143, 1999.

TSAI, J.L.; POLE, N.; LEVENSON, R.W.; MUNOZ, R.F. The effects of depression on the emotional responses of Spanish-speaking Latinas. **Cultural Diversity and Ethnic Minority Psychology** 9(1):49-63, 2003.

TSANKOVA NM, BERTON O, RENTHAL W, KUMAR A, NEVE RL, NESTLER EJ. Sustained hippocampal chromatin regulation in a mouse model of depression and antidepressant action. **Nature Neuroscience** 9:519-25, 2006.

TSE, S.Y.H.; MARK, I.T.; DICKENS, B.F. Antioxidative properties of harmaline and 5-hydroxytryptamine. **Biochemical Pharmacology** 42:459-464, 1991.

UEMURA, T.; KANASHIRO, m.; HIRAI, K.; MIYAZAKI, N. Isolation, structure and properties of the  $\beta$ -carboline alkaloids formed from 5-hydroxytryptamine by the superoxide anion-generating systems. **Journal of Neurochemistry** 51:710-717, 1988.

WECKER, L.; PACHECO, M. A. A neurochemical perspective on monoamine oxidase inhibitors. **Psychiatric Annals** 31:354-360, 2001.

WILLNER P, BENTON D, BROWN E, CHEETA S, DAVIES G, MORGAN J, et al. "Depression" increases "craving" for sweet rewards in animal and human models of depression and craving. **Psychopharmacology** 136:272–83, 1998.

WILLNER P, TOWELL A, SAMPSON D, et al: Reduction of sucrose preference by chronic unpredictable mild stress, and its restoration by a tricyclic antidepressant. **Psychopharmacology** 93:358–64, 1987.

WILLNER, P. The validity of animal models of depression. **Psychopharmacology** 83:1-16, 1984.

WILLNER, P. Validity, reliability and utility of the chronic mild stress model of depression: a 10-year review and evaluation. **Psychopharmacology** 134: 319-329, 1997.

WIKBERG, J. E.; UHLEN, S. Further characterization of the guinea pig cerebral cortex idazoxan receptor: Solubilization, distinction from the imidazole site, and demonstration of cirazoline as an idazoxan receptor-selective drug. **Journal of Neurochemistry** 55:192-203, 1990.

XU, H.; QING, H., LU, W.; KEEGAN, D.; RICHARDSON, J.S.; CHLAN-FOUNEY, et al. Quetiapine attenuates the immobilization stress-induced decreased of brain-derived neurotrophic factor expression in rat hippocampus. **Neuroscience Letters** 321:65-68, 2002.

ZARATE, C.A. DU, J, QUIROZ, J., GRAY, N.A., DENICOFF, K.D., SINGH, J., CHARNEY, D.S., MANJI, H.K. Regulation of cellular plasticity cascades in the pathophysiology and treatment of mood disorders: role of the glutamatergic system. **Annals of the New York Academy of Sciences** 1003:273-291, 2003.

ZARATE, C.A. et al. The role of AMPA receptor modulation in the treatment of neuropsychiatric diseases. **Clinical and experimental Neurology** 211:7-10, 2008.

ZARATE, C.A., QUIROZ, J., PAYNE, J., MANJI, H.K. Modulators of the glutamatergic system: implications for the development of improved therapeutics in mood disorders. **Psychopharmacol Bulletin** 36:35-83, 2002.