

MODELOS DE PREDIÇÃO DOS NÍVEIS DE RUÍDO E MONÓXIDO DE CARBONO GERADOS PELO TRÁFEGO: O CASO DE FLORIANÓPOLIS-SC

Geralcy Carneiro da Silva

Fundação Universidade Federal do Rio Grande

Lenise Grando Goldner

Universidade Federal de Santa Catarina

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

RESUMO

Este trabalho apresenta modelos desenvolvidos através de análise de regressão múltipla para o cálculo dos níveis de ruído e monóxido de carbono (CO), gerados pelo tráfego urbano de Florianópolis. Os modelos baseiam-se em dados obtidos nas principais vias da cidade, em dias típicos, sem chuva e sem grandes variações de temperatura, com equipamentos de medições de ruído e CO, cedidos pela Universidade Federal de Santa Catarina e pela Universidade de Londres, respectivamente. Os modelos permitem estimar o nível sonoro contínuo equivalente (Leq) e a concentração de CO para um observador localizado junto à margem das vias, a partir do fluxo de veículos leves e pesados.

ABSTRACT

This work presents models developed using multiple regression analysis to calculate the noise and carbon monoxide (CO) levels which are generated by the urban traffic of Florianópolis. The models are based on data collected in the main roads of the city, for typical days, with neither rain nor great variations of temperature, using noise and CO equipment provided by the Federal University of Santa Catarina and the University of London, respectively. The models estimate the equivalent continuous sound level (Leq) and the concentration of CO for an observer located close to the margin of the road, using as input the flow of light and heavy vehicles.

1. INTRODUÇÃO

As principais fontes de poluição do ar e sonora são os veículos automotores que trafegam nas regiões urbanas, causando vários problemas, especialmente à saúde física e mental das pessoas (WHO, 1992a). Diante desses fatos, e considerando a maior frequência de emissão do monóxido de carbono entre os poluentes causados pelo tráfego intenso, foram escolhidos os níveis de ruído e de monóxido de carbono como indicadores de qualidade do meio ambiente.

A poluição tornou-se um problema crucial e agora é urgente avaliar e priorizar estratégias de controle (WHO, 1992b). Esse problema tenderá a se agravar ao longo do tempo devido ao crescimento da frota incentivado pela popularização do veículo, ao aumento da urbanização e das despesas de controle da poluição. Isso preocupa, principalmente pelo fato de que ainda hoje a maioria das cidades brasileiras carece de métodos de baixo custo para medição dos níveis de ruído e de monóxido de carbono gerados pelos veículos automotores.

Em Florianópolis, estudos realizados por Silva (1998), com equipamentos de alta precisão, mostraram que todos os pontos selecionados possuíam níveis de ruído, gerados pelo tráfego, superiores ao valor padronizado para o centro da cidade. Os níveis de monóxido de carbono mantiveram-se inferiores ao padrão estabelecido, explicado pela dispersão favorecida pelos ventos da ilha, onde se localiza o centro da cidade.

A iniciativa de apresentar os modelos de predição de ruído e CO surgiu da necessidade de reduzir custos e agilizar a obtenção de dados relativos às emissões geradas pelo tráfego.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é apresentar modelos estatísticos de cálculo de níveis de ruído e monóxido de carbono, que permitam avaliar as condições de tráfego quanto à poluição, contribuindo para formular ações mitigadoras dos impactos negativos causados pelo tráfego urbano e, desta forma, melhorar a qualidade de vida da população exposta.

2. TRÁFEGO X MEIO AMBIENTE

Nos primeiros anos do desenvolvimento do transporte nos Estados Unidos (ITE, 1982), a preocupação primária era permitir o movimento das pessoas e seus bens de um lugar para outro. Pouca consideração foi dada aos efeitos colaterais do desenvolvimento do transporte no meio ambiente. O recente desenvolvimento de ruas, estradas e auto-estradas não teve compromisso com o meio ambiente, especialmente em áreas urbanas. Essa fase foi alcançada agora, quando a complexidade das áreas urbanas exige uma consideração maior do impacto do tráfego.

O trabalho de Buchanan (apud Sá et al., 1995), intitulado “Traffic in Towns”, estudou problemas provocados pelo uso do automóvel e, particularmente suas incidências sobre os diferentes tipos de aglomeração. É considerado por Martins (1995) como a primeira análise qualitativa e quantitativa da circulação nas cidades. Buchanan desenvolveu o conceito de gerenciamento ambiental que englobava a delimitação de áreas ambientais potenciais com a remoção do tráfego e sua reorganização voltada para os deslocamentos internos de veículos e pedestres.

De acordo com Freitas (1991), “Traffic in Towns” identificou três tipos de problemas nas áreas urbanas: frustração no uso de veículos em consequência dos congestionamentos e dificuldade de acessos; acidentes; e deterioração do meio ambiente.

2.1 Monóxido de Carbono (CO)

O monóxido de carbono é um dos principais poluentes relacionados com o transporte. É um gás inodoro e incolor, cuja fonte antropogênica principal é a combustão incompleta de combustíveis orgânicos, ou seja, é produzido se o ar não for suficiente para sua total combustão.

O monóxido de carbono, combinado com a hemoglobina do sangue, produz a *carboxihemoglobina* e, assim, reduz a capacidade do sangue para transportar oxigênio. Em concentrações suficientemente altas, o CO é fatal aos humanos. Nas concentrações encontradas no ar urbano, o CO não é fatal, mas pode agravar doenças cardiovasculares e prejudicar funções psicomotoras.

Na Inglaterra, os veículos são as fontes principais de emissão de benzeno, 1,3-butadieno, monóxido de carbono, chumbo e óxidos de nitrogênio. Os veículos motorizados também são fonte significativa de partículas, normalmente medidas como PM₁₀, material particulado com menos de 10 µm de diâmetro. Considera-se que esse tipo de partícula seja provavelmente depositado no pulmão (ROYAL COMMISSION, 1997).

No Brasil, os principais poluentes atmosféricos produzidos pelos veículos (a gasolina, diesel e álcool) são monóxido de carbono, óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos, aldeídos, ácidos orgânicos e material particulado (CETESB, 1996).

Os padrões de qualidade do ar, no Brasil, são estabelecidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), cuja Resolução nº 003, de 28 de junho de 1990, fixou para o monóxido de carbono, a concentração média de 8 (oito) horas de 10.000 (dez mil) microgramas por metro cúbico de ar (9 ppm) e a concentração média de 1 (uma) hora de 40.000 (quarenta mil) microgramas por metro cúbico de ar (35 ppm). Essas concentrações não devem ser excedidas mais de uma vez por ano.

2.2. Ruído

O ruído é um tipo de som definido como desagradável. Portanto o problema de medir o quanto o ruído é desagradável não depende somente do fenômeno físico, mas leva também em consideração as diferentes formas pelas quais as pessoas percebem os sons, ou seja, o que pode ser considerado ruído para uma pessoa, pode ser considerado como um som agradável para outra pessoa.

Um dos mais importantes conceitos que deve ser adotado firmemente para medições de ruído é que, por causa das unidades logarítmicas, a adição e a subtração não podem ser usadas diretamente em decibel. Duas fontes, cada uma produzindo um nível de pressão sonora de 60 dB, quando medidas, não produzirão 120 dB (ambas emitindo ao mesmo tempo). Para se chegar a um nível correto, deve-se considerar as duas pressões sonoras instantâneas de duas fontes em um ponto do espaço (Bruel & Kjaer, 1988).

Em dezembro de 1987, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), fixou o método de determinação do nível sonoro (NBR 10151), em função do uso do solo e, para a zona central da cidade, o nível máximo é de 65 dB(A) durante o dia.

3. METODOLOGIA

As medições foram realizadas em dias típicos da semana: terça, quarta e quinta-feira, sem chuva e sem grandes variações de temperatura (média diária entre 21,7 e 25,2 °C), umidade relativa do ar (média diária entre 72,5 e 91,3 %) e velocidade do vento entre calmo e 5 m/s.

Foram considerados os seguintes critérios para a escolha dos pontos de medição:

- Para representar um conjunto de pontos, foi necessário ter-se características de uma situação típica, isto é, uma situação onde os efeitos negativos do tráfego sobre as pessoas fossem médios.
- Para avaliar o impacto dos níveis sonoros e de monóxido de carbono sobre as pessoas, não se poderia estar afastado das residências ou locais de trabalho, onde elas ficam expostas, por mais de 8 horas, ao barulho e ao poluente.
- Para minimizar a influência de outras fontes que afetam os níveis sonoros e de monóxido de carbono, não se deveria estar localizado próximo a construções, indústrias, aeroportos, aclives ou declives, curvas, cruzamentos, estacionamentos, marquises, redutores de velocidade e movimentação de pedestres.

Dessa forma, foram selecionados os seguintes pontos de estudo da cidade de Florianópolis:

- a) Ilha de Santa Catarina (parte insular da cidade):
 - Ponto 01 - Rua Heitor Luz (entre a Av. Mauro Ramos e a Rua Jairo Callado);

- Ponto 02 - Rua Gama D'Eça (entre as Ruas Bocaiúva e Tavares);
- Ponto 03 - Av. Rio Branco (entre as Ruas Othon Gama D'Eça e Nereu Ramos);
- Ponto 04 - Av. Hercílio Luz com a Rua Fernando Machado;
- Ponto 05 - Terminal Urbano (entre as Ruas N. Machado e S. Marinho);
- Ponto 06 - Rua Jerônimo Coelho (entre as Ruas Vidal Ramos e Osmar Cunha).

b) Continente:

- Ponto 07 - Rua Pedro Demoro (entre as Ruas Mal. Hermes e A. Barros);
- Ponto 08 - Rua Eurico G. Dutra (entre as Ruas Santos Saraiva e Valgas Neves);
- Ponto 09 - Av. Ivo Silveira (entre as Ruas Pedro I e Pedro II).

As medições do volume de veículos leves - VL (carros de passeio e caminhonetes), do volume de veículos pesados - VP (caminhões e ônibus) e do volume de motocicletas - VM, foram realizadas através de contagem manual durante o período das 7h30min às 21h10min, sendo 10 minutos em cada hora fora de pico e 60 minutos nos horários de pico. Foram considerados horários de pico de tráfego: das 7h30min às 8h30min, das 11h30min às 12h30min, das 13h30min às 14h30min e das 17h30min às 18h30min.

O nível sonoro contínuo equivalente - L_{eq} e os níveis percentuais estatísticos L_{10} e L_{90} , foram coletados das 7h30min às 21h10min, durante 10 minutos em cada hora.

A concentração de monóxido de carbono - CO, foi medida continuamente no período das 7h30min às 21h10min, com médias a cada 10 minutos. Os medidores de nível sonoro e de concentração de monóxido de carbono foram posicionados a uma distância horizontal de 0,5 m da via, a uma distância vertical de 1,2 m e, no mínimo, a 1,5 m de fachadas ou superfícies refletoras.

4. ANÁLISE DOS DADOS

A apresentação da análise dos dados coletados (tráfego, monóxido de carbono e ruído) será com pontos considerados padrões (pontos 01, 03 e 08). Os demais possuem características semelhantes e estão detalhados em Silva (1998).

a) Ponto 01 – Rua Heitor Luz (entre a Av. Mauro Ramos e a Rua Jairo Callado). Nesse ponto, a rua é de mão única e dá acesso, principalmente, ao Shopping Beira Mar e à Av. Mauro Ramos.

O tráfego apresenta-se regular nos períodos das 7h30min às 13h10min e 14h20min às 18h20min. Os picos máximos ocorrem nos períodos das 13h30min às 13h40min, 13h50min às 14 h e 18h20min às 18h30min com respectivamente 159, 165, 169 veículos a cada 10 minutos. Esse ponto apresenta um fluxo médio no período das 7h30min às 21h10min de 128 veículos a cada 10 minutos, com um percentual médio de 11,4% de veículos pesados.

A maior concentração média de monóxido de carbono para 1 hora foi de 7,2 ppm, ocorrida entre 13 h e 14 h. Para 8 horas, foi de 4,1 ppm, no período das 7h30min às 15h30min.

Os níveis de ruído observados (L_{eq}), comparados com o nível máximo estabelecido para o centro da cidade durante o período diurno, cujo valor é de 65 dB(A), excedem neste ponto em, no mínimo, 8 dB(A) e, no máximo, 13,6 dB(A).

b) Ponto 03 – Av. Rio Branco (entre as Ruas Othon Gama D’Eça e Nereu Ramos). A avenida é praticamente circular à zona central do comércio da cidade de Florianópolis.

Nota-se que o fluxo de veículos mantém-se normal até às 11h40min (aproximadamente 200 veículos a cada 10 minutos) e cresce até atingir seu máximo no período das 12 h às 12h10min (321 veículos a cada 10 minutos). Em 80% do tempo de medição o fluxo de tráfego ficou abaixo de 267 veículos a cada 10 minutos. O fluxo médio no período das 7h30min às 21h10min foi de 225 veículos a cada 10 minutos com um percentual médio de 2,7% de veículos pesados.

O pico máximo da concentração de CO em 10 minutos ocorreu no período de 7h40min às 7h50min (8,9 ppm). A concentração média máxima de 1 hora foi de 7,3 ppm que ocorreu entre 7h30min e 8h30min. Para 8 h foi de 3,9 ppm (das 7h30min às 15h30min). Em 80% das concentrações, os valores estiveram abaixo de 4,8 ppm. A concentração média total (14h de medição) foi de 3,3 ppm.

O nível excedido em 10% do tempo medido no período de maior valor do nível de ruído foi de 75 dB(A). O nível excedido em 90% do tempo de medição no período de maior excesso entre o nível de ruído observado e o padronizado foi de 59 dB(A).

c) Ponto 08 - Rua Eurico G. Dutra (entre as Ruas Santos Saraiva e Valgas Neves). Esse ponto localiza-se no principal corredor de tráfego dos bairros da zona norte do continente para o centro da cidade.

O tráfego manteve-se intenso durante todo o dia, aproximadamente 300 veículos a cada 10 minutos, com uma queda acentuada apenas durante a noite. Nesse ponto ocorre o maior fluxo médio de veículos em relação aos outros pontos pesquisados: são 278 veículos a cada 10 min, sendo que os veículos pesados participam com uma média percentual de 8,0%.

A concentração média máxima de monóxido de carbono para 1 hora foi de 7,4 ppm no período das 15 h às 16 h. E, para 8 horas, foi de 5,8 ppm no período das 12 h às 20 h. Esses níveis não ultrapassaram os limites padrões de qualidade do ar. Em 80% dos casos os níveis de concentração foram inferiores a 6,5 ppm.

O nível padronizado para ruído, 65 dB(A), foi excedido nesse ponto em, no mínimo, 11,1 dB(A) e, no máximo, em 17,9 dB(A). O maior valor do nível de ruído, 82,9 dB(A), ocorreu no período das 18 h às 18h10min. No período noturno o excesso foi de 15,2 dB(A).

5. MODELO DE PREDIÇÃO PARA MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

Foram igualmente desenvolvidos e testados vários modelos matemáticos para predição da concentração de monóxido de carbono com base no volume de veículos leves (VL) e no volume de veículos pesados (VP). Aplicou-se o método dos mínimos quadrados para o modelo que está representado por uma regressão linear múltipla da forma:

$$Y = a + b_1x_1 + b_2x_2 \quad (1)$$

em que $Y = CO$ (monóxido de carbono);

$x_1 = VL$ (volume de veículos leves);

$x_2 = VP$ (volume de veículos pesados);

a, b_1 e $b_2 =$ coeficientes da reta de regressão.

Incorporou-se a transformação logarítmica nas variáveis independentes para melhorar o ajuste da regressão; assim a equação utilizada é do tipo:

$$Y = a + b_1 \log VL + b_2 \log VP \quad (2)$$

O modelo que apresentou melhores resultados para as variáveis incluídas na relação é mostrado na Tabela 1, com os parâmetros estatísticos pertinentes:

Tabela 1: Modelo final para CO e sua avaliação estatística

Estatísticas		Modelo	
		$CO = -15,080 + 1,935 \log VL + 6,701 \log VP$	
Estatística t(calculado)		2,071	9,659
Erro padrão dos coeficientes		0,934	0,694
Valor p ($\alpha=0,05$)		0,044	0,000
F(calculado)	59,950		
Fcrítico (0,05;2;43)	3,214		
Coefficiente de determinação(R^2)	73,60%		
Erro padrão da estimativa	1,053		
Tamanho da amostra	46		
Intervalo de Variação		$480 \leq VL \leq 1824$	$30 \leq VP \leq 168$

em que $CO =$ concentração de monóxido de carbono em uma hora (ppm);

$VL =$ volume de veículos leves (veículos por hora);

$VP =$ volume de veículos pesados (veículos por hora).

A correlação entre as duas variáveis explicativas é de 0,296. Isso levou a um exame de multicolinearidade pelo Fator Inflacionário da Variação (FIV), cujo resultado foi de aproximadamente 1 (um) e portanto não há motivo para suspeita.

A Figura 1 mostra que não existe nenhum padrão na relação entre os resíduos e o valor predito de CO; então a função de regressão linear múltipla é adequada para prever a concentração de CO e indica a suposição de homogeneidade das variâncias. Os valores preditos diferem dos observados no intervalo de $\pm 1,9$ ppm para pelo menos 95% dos casos.

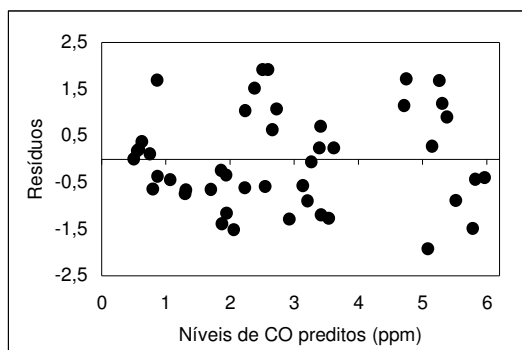


Figura 1: Resíduos em relação aos níveis de concentração de CO predito

Verificou-se, nesse modelo de predição, testado pelo método de Kolmogorov-Smirnov, que os resíduos possuem uma distribuição normal.

6. MODELO DE PREDIÇÃO PARA RUÍDO

De forma análoga, desenvolveu-se um modelo, através de regressão linear múltipla, para o cálculo do nível sonoro contínuo equivalente (L_{eq}) em relação às variáveis independentes volume de veículos leves (VL) e volume de veículos pesados (VP), com aplicação do método dos mínimos quadrados. Assim, o modelo de regressão com base na equação (2), que apresentou o melhor ajuste aos dados, é mostrado na Tabela 2, com seus respectivos parâmetros estatísticos:

Tabela 2: Modelo final para ruído (L_{eq}) e sua avaliação estatística

Estatísticas	Modelo	
	$L_{eq} = 62,044 + 1,779\log VL + 8,282\log VP$	
Estatística t(calculado)	2,164	15,188
Erro padrão dos coeficientes	0,822	0,545
Valor p ($\alpha=0,05$)	0,033	0,000
F(calculado)	217,329	
Fcrítico (0,01;2;101)	4,822	
Coefficiente de determinação(R^2)	81,14%	
Erro padrão da estimativa	1,445	
Tamanho da amostra	104	
Intervalo de Variação	$56 \leq VL \leq 504$	$2 \leq VP \leq 56$

em que L_{eq} = nível equivalente de energia, em dB(A);
 VL = volume de veículos leves (veículos por 10 minutos);
 VP = volume de veículos pesados (veículos por 10 minutos).

Observa-se, pela Figura 2, que os resíduos se distribuem aleatoriamente em torno da média zero; portanto, o modelo de regressão linear é adequado para se prever os níveis de ruído e, também, indica o pressuposto de homocedasticidade. Os valores preditos diferem dos observados no intervalo de $\pm 2,5$ dB(A), para pelo menos 95% dos casos.

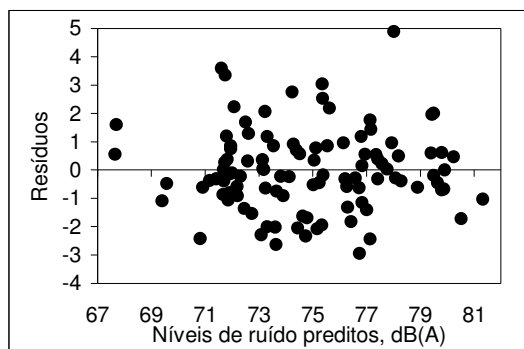


Figura 2: Resíduos em relação aos níveis de ruído preditos

Os resíduos possuem uma distribuição normal, testados pelo método de Kolmogorov-Smirnov, e são independentes, verificados pelo método gráfico (resíduos versus seqüências).

7. CONCLUSÕES

Os modelos apresentados permitem estimar os níveis de ruído e a concentração de monóxido de carbono a partir de parâmetros do tráfego, observados os intervalos de aplicação.

Os modelos podem ser utilizados, com segurança, para identificar os problemas de poluição sonora e do ar em Florianópolis e em locais com características semelhantes. Os resultados respaldarão propostas de ações de melhoria do tráfego e, conseqüentemente, da qualidade de vida da população exposta à poluição gerada pelo sistema viário.

A escolha deste estudo deve-se ao fato de não haver pesquisas que tratem especificamente de monóxido de carbono e de ruído gerados pelo tráfego urbano em Florianópolis. Assim, por facilitar e reduzir o custo da coleta de dados, estes modelos podem ser um ponto de partida para estudos posteriores de impactos ambientais do tráfego urbano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1987) *NBR 10151 - Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas Visando o Conforto da Comunidade*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- BRUEL & KJAER (1988) *Acoustic Noise Measurements*. Denmark.
- Buchanan, C. D. (1963) *Traffic in Towns - A Study of the Long Term Problems of Traffic in Urban Areas*. HMSO, London.
- CETESB (1996) *Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo- 1995*. Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental. São Paulo, SP.
- CONAMA (1990) *Resolução no 003/90 - Dispõe sobre os Padrões de Qualidade do Ar*. Conselho Nacional do Meio Ambiente. DOU, Brasília, Sec. I, p. 15.937 a 15.939, 22 de agosto de 1990.
- Freitas, I. M. D. P. *Metodologia para Determinação da Capacidade Ambiental de Vias Urbanas: o caso das Interseções SemafORIZADAS*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes, 1991) - PET/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- ITE (1982) *Transportation and Traffic Engineering Handbook*. Institute of Transportation Engineers. Prentice-Hall, New Jersey.
- Martins, J. A. (1995) Revisitando Buchanan. *Transportes*, ANPET - Associação Nacional de Pesquisa em Transportes, vol. 3, n. 1, Rio de Janeiro.
- ROYAL COMMISSION ON ENVIRONMENTAL POLLUTION. *Twentieth Report: Transport and the Environment*. HMSO, London.
- Sá, A. C. M.; E. O. Faria; M. F. Campos e M. G. C. Braga (1995) Moderação do Tráfego: uma Possibilidade de Melhoria da Qualidade de Vida nas Cidades Brasileiras. *Anais do IX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, São Carlos, v.3, p. 880-891.
- Silva, G. C. (1998) *Tráfego, Monóxido de Carbono e Ruído em Áreas Urbanas: o caso da Cidade de Florianópolis*. Florianópolis. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, SC.
- WHO (1992a) *Motor Vehicle Air Pollution: Public Health Impact and Control Measures*. World Health Organization, Geneva, Switzerland.
- WHO (1992b) *Urban Air Pollution in Megacities of the World*. World Health Organization. Oxford, UK.

Geralcy Carneiro da Silva (geralcy@yahoo.com.br)

Departamento de Matemática, Fundação Universidade Federal do Rio Grande

Campus Carreiros, Rio Grande, RS

Fone: (53) 233-6796

Lenise Grando Goldner (lenise@ecv.ufsc.br)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

Rua João Pio Duarte Silva, s/n – Córrego Grande, Florianópolis, SC.

Fone: (48) 331-7769 Fax: (48) 331-5191