

ANÁLISE NÃO-LINEAR DA VARIAÇÃO DA COTA DO RIO PARAGUAY - PANTANAL

Renata Silva Paula

Aluna da UNIVAP - Ciência da Computação - Bolsa PIBIC/CNPq

Orientadores:

Dr. Nelson J. Ferreira - Divisão de Ciências Meteorológicas

Dr. Reinaldo R. Rosa - Lab. de Computação e Matemática Aplicada

INPE - Cx. Postal 515, São José dos Campos - SP, 12201-970

A ocorrência persistente de cheias na região do Pantanal Matogrossense pode modificar significativamente o balanço de energia e a dinâmica espaço-temporal das variáveis de estado que caracterizam este sistema. A observação de vários fenômenos não-estacionários e transitórios, muitas vezes correlacionados entre si, bem como de estruturas coerentes no escoamento atmosférico, tem demandado a utilização de novas metodologias na análise de sinais meteorológicos. Neste trabalho apresentamos uma análise inédita da cota do Rio Paraguay observada durante aproximadamente 95 anos. O dado consiste de uma série temporal composta por 34858 pontos, denominada aqui por série PP95. Teoricamente a variabilidade neste sinal pode ser devido a natureza puramente estocástica do sistema. Entretanto, de maneira alternativa, tal variabilidade pode ser devido à natureza determinística e não-linear de um sistema dinâmico envolvendo várias variáveis de estado.

A análise não-linear de séries temporais, baseada na metodologia de Grassberger-Procaccia (1985), é capaz de caracterizar o grau de complexidade do sistema por meio da determinação do número mínimo de variáveis de estado, necessário para compor o sistema não-linear responsável pela flutuação complexa observada na série. Entretanto, como esse método supõe a existência de um atrator no espaço de fases, cujas propriedades dinâmicas são estacionárias, a sua aplicação só é válida em séries temporais estacionárias. O teste mais completo que permite qualificar, ou não, uma série como estacionária foi desenvolvido por Isliker e Kurths (1993). Este teste permite selecionar séries estacionárias, dentro de uma dada tolerância, para posterior estimativa da dimensão de correlação associada a um possível sistema dinâmico não-linear gerador da série.

Desenvolvemos, em ambiente IDL, o código de Isliker-Kurths para análise da série PP95. A performance do código foi testada e aprovada a partir de aplicações

RELATÓRIO REFERENTE AS ATIVIDADES DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

BOLSA PIBIC / CNPq
Processo 092/96

Análise Não-Linear de Dados Climatológicos Temporais e Espaço
Temporais da Região do Pantanal

por

Renata Silva Paula

Orientadores: Dr. Néelson Jesus Ferreira
Dr. Reinaldo R. Rosa

Conteúdo:

1. Introdução
2. Desenvolvimento
 - 2.1 Finalização do Banco de Dados
 - 2.2. Teste de Estacionaridade
 - 2.3. Estimativa da Dimensão de Correlação
3. Conclusão

20/06/97

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
São José dos Campos, SP

1. Introdução

A ocorrência persistente de cheias na região do Pantanal Matogrossense pode modificar significativamente o balanço de energia e a dinâmica espaço-temporal das variáveis de estado que caracterizam este sistema. A observação de vários fenômenos não-estacionários e transitórios, muitas vezes correlacionados entre si, bem como de estruturas coerentes no escoamento atmosférico, tem demandado a utilização de novas metodologias na análise de sinais meteorológicos. Apresentamos uma análise inédita da cota do Rio Paraguay observada durante aproximadamente 95 anos. O dado consiste de uma série temporal composta por 34.858 pontos, denominada aqui por série PP95.

Teoricamente a variabilidade neste sinal pode ser devido a natureza puramente estocástica do sistema. Entretanto, de maneira alternativa, tal variabilidade pode ser devido a natureza determinística e não-linear de um sistema dinâmico envolvendo várias variáveis de estado. A análise não-linear de séries temporais, baseada na metodologia de Grassberger-Procaccia (1985), é capaz de caracterizar o grau de complexidade do sistema por meio da determinação do número de variáveis de estado, necessário para compor o sistema não-linear responsável pela flutuação complexa observada na série. Entretanto, como esse método supõe a existência de um atrator no espaço de fases, cujas propriedades dinâmicas são estacionárias, a sua aplicação só é válida para séries temporais estacionárias. O teste mais completo que permite qualificar ou não uma série como estacionária foi desenvolvido por Isliker e Kurths (1993). Este teste permite selecionar séries estacionárias, dentro de uma dada tolerância, para posterior estimativa da dimensão de correlação associada a um possível sistema dinâmico não-linear gerador da série.

2. Desenvolvimento

2.1 Finalização do Banco de Dados

O banco de dados final está constituído de uma série temporal sobre a variação da cota do Rio Paraguay para o período de 1.900 a 1.995. A série temporal é aqui denominada por PP95, possui resolução temporal de 1 dia e 34.858 pontos. Esta série foi reescrita como *Nível médio do Rio Paraguay X Tempo*, uma vez que em seu formato original os dados estavam comprimidos em escala mensal. A série PP95 foi dividida em sub-séries da seguinte maneira:

Série	Descrição	Nº de Pontos
Pant 1 5	1 a 5.000	5.000
Pant 5 10	5.001 a 10.000	5.000
Pant 10 15	10.001 a 15.000	5.000
Pant 15 20	15.001 a 20.000	5.000
Pant 20 25	20.001 a 25.000	5.000
Pant 25 30	25.001 a 30.000	5.000
Pant 1 15	1 a 15.000	15.000
Pant 15 30	15.001 a 30.000	15.000

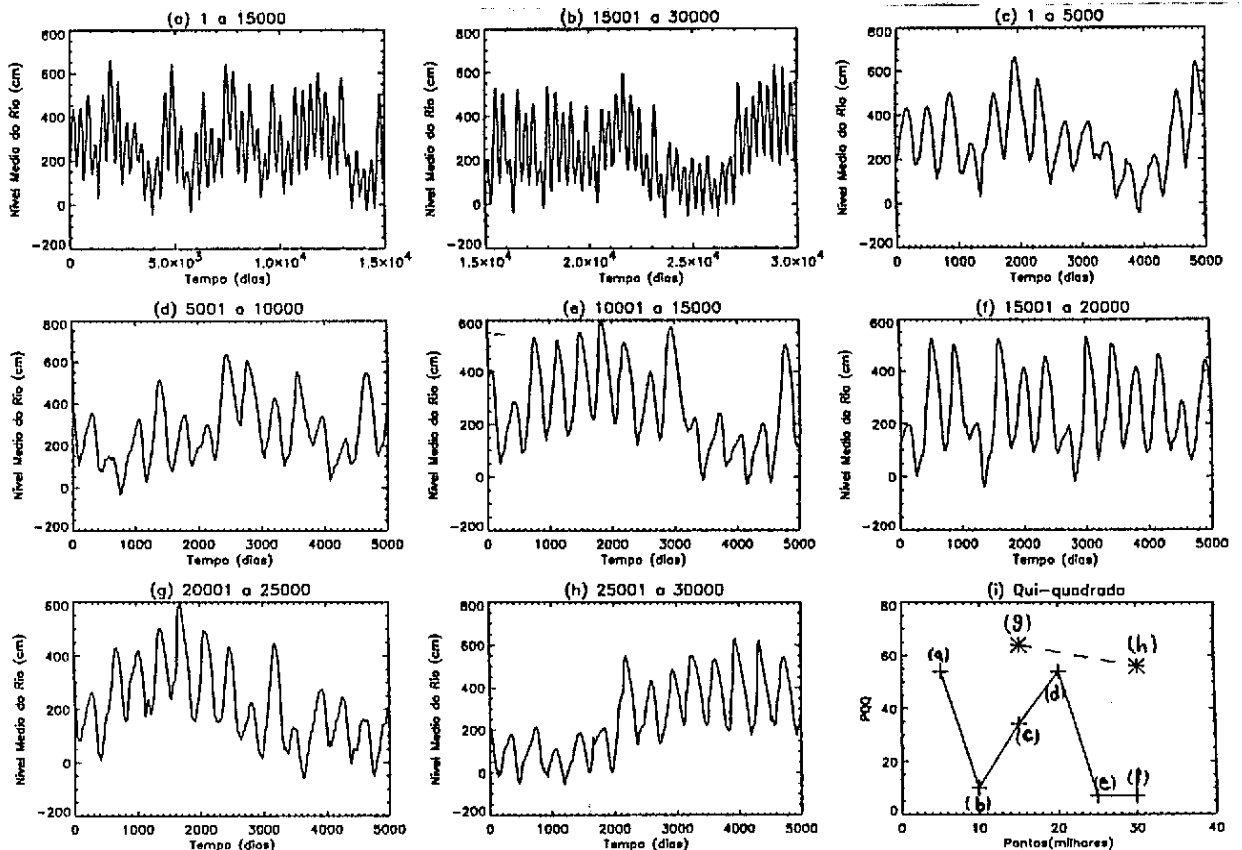
2.2 Teste de Estacionaridade

Este teste consiste na aplicação da metodologia de Isliker-Kurths, descrita no primeiro relatório. O código IK.pro foi desenvolvido em ambiente IDL (Interactive Data Language), conforme anexado no primeiro relatório. O código foi aperfeiçoado com respeito a escolha do número de intervalos (K), e a versão atualizada encontra-se anexa, já incluindo a extensão para o cálculo da dimensão de correlação conforme a metodologia de Grassberger-Procaccia. Por isso a versão mais recente do código foi denominada IKGP.pro.

A performance do código foi testada e aprovada a partir de aplicações em séries senoidais e randômicas. Para o teste de estacionaridade da série PP95, utilizamos as sub-séries descritas no item 2.1 deste relatório. Os resultados foram os seguintes:

Série	Qui-Quadrado (%)
Pant 1 5	54
Pant 5 10	7
Pant 10 15	34
Pant 15 20	53
Pant 20 25	6
Pant 25 30	7
Pant 1 15	64
Pant 15 30	56

O teste qui-quadrado é mostrado em termos de nível de significância da correlação estatística entre as partes de cada série (0-100%). Para todas as séries os valores obtidos para a porcentagem do qui-quadrado (PQQ) foram <95%, o que indica a não estacionaridade da série.

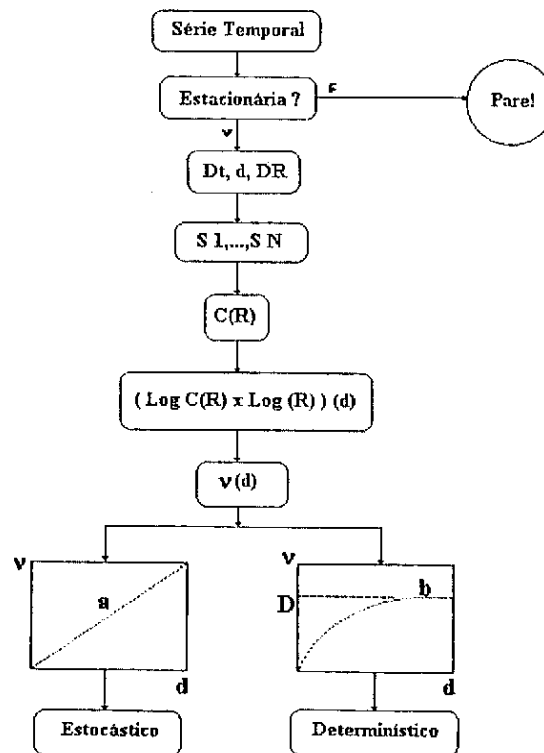


2.3 Estimativa da Dimensão de Correlação

Este teste consiste na reconstrução do espaço de fases a partir da definição do número mínimo de variáveis de estado que regem o sistema.

Considere uma série $Z(t)$, com N pontos igualmente espaçados em intervalos Δt .

Escolhe-se o primeiro valor de Dt , e com ele, percorre-se a série toda gerando então um conjunto com DR vetores S . Calcula-se então a função de correlação integral $C(R)$. Para cada valor de d plota-se então uma curva $\text{Log } C(R) \times \text{Log } R$ de onde obtém-se um coeficiente angular v a partir de um ajuste por mínimos quadrados a esta curva. Finalmente plota-se o valor desse coeficiente (v) contra o valor da respectiva dimensão (d). Se o valor do coeficiente v convergir para um valor finito, o valor de convergência corresponde à dimensão do atrator no espaço de fases. O processo é caracterizado como estocástico quando não ocorre convergência, $v = d$, indicando assim que o sistema é regido por uma quantidade muito grande de variáveis de estado.



Fluxograma para o código Grassberger-Procaccia:

- a curva (a) indica processo estocástico ($v = d$)
- a curva (b) indica um processo caótico determinístico caracterizado por um atrator de dimensão D .

Na continuidade deste projeto finalizaremos a versão deste código incluindo os ajustes das curvas para os pontos de $\text{Log } C(R) \times \text{Log } R$, e assim obter os gráficos da dimensão de correlação em função da dimensão do espaço de fases reconstruído.

Os resultados parciais deste teste para as sub-séries em estudo estão anexas.

3. Conclusão

Os valores de PQQ $< 95\%$ para as sub-séries em estudo determinam a impossibilidade de caracterização do número mínimo de variáveis de estado que poderiam estar não-linearmente acopladas regendo o comportamento do sistema. Dessa forma, para este sistema, os valores a serem calculados para a dimensão de correlação não são fisicamente significativos.

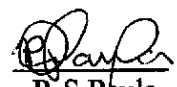
Portanto, este estudo mostrou que pelo método tradicional de análise não-linear de séries temporais, a natureza dinâmica do ambiente em questão não pode ser caracterizada como sendo determinística. Isto também impossibilita a aplicação do código FRAG8 (ver primeiro relatório) em séries espaço-temporais, a fim de caracterizar a existência de turbulência localizada de acordo com o modelo de Bohr and Rand (1991).

Referências

Bohr, T.; Rand, D.A. A Mechanism for Localized Turbulence. *Physica D* 52:523-543, 1991.

Grassberger, P.; Procaccia, I. Measuring the Strangeness of Strange Attractors. *Physica D* 9:189-208, 1983.

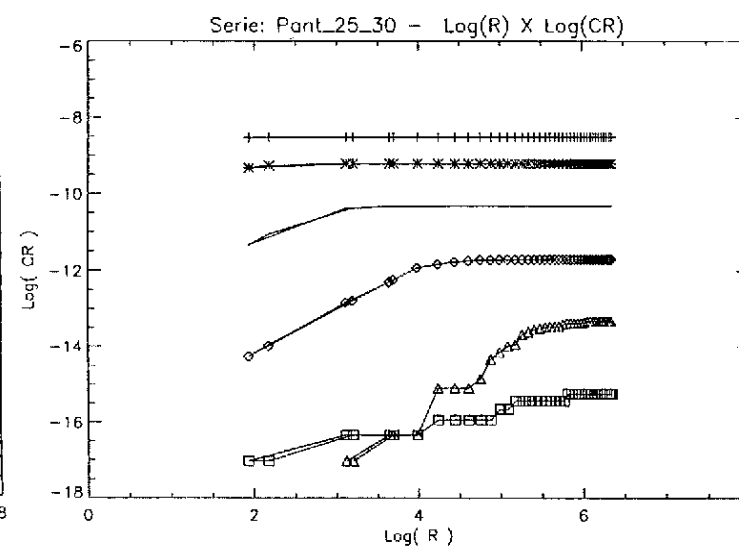
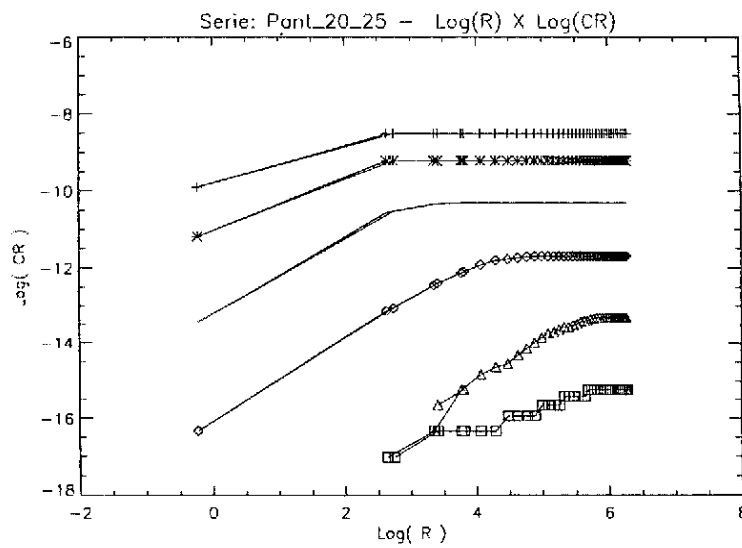
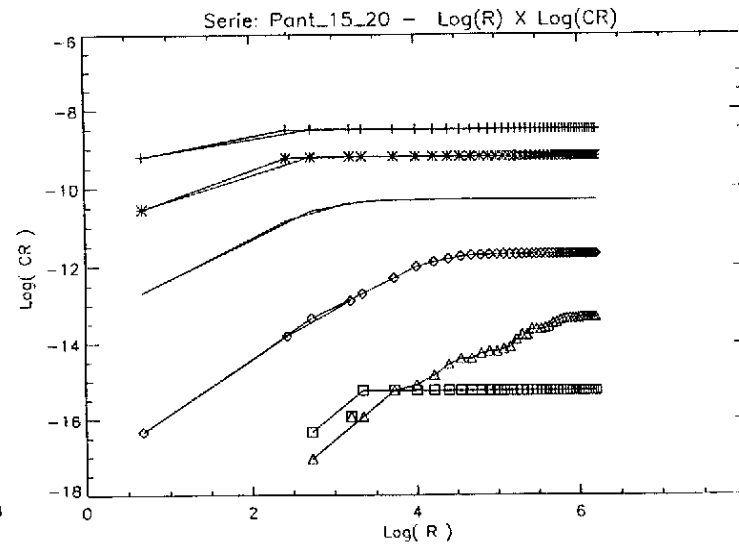
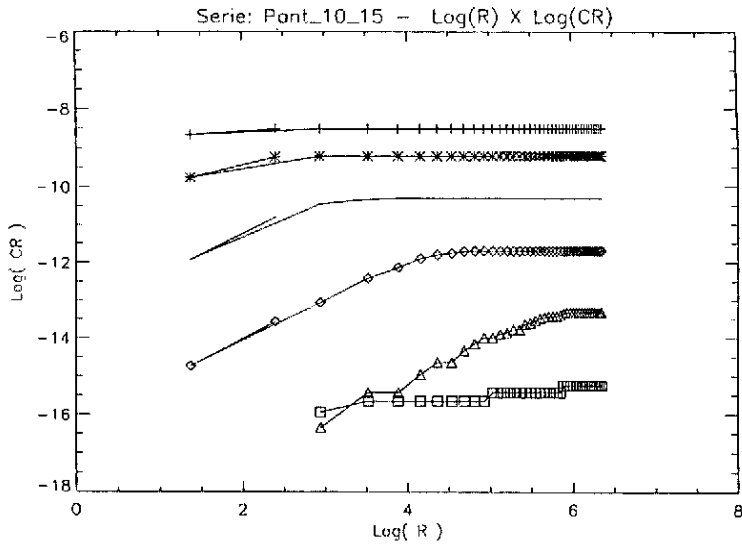
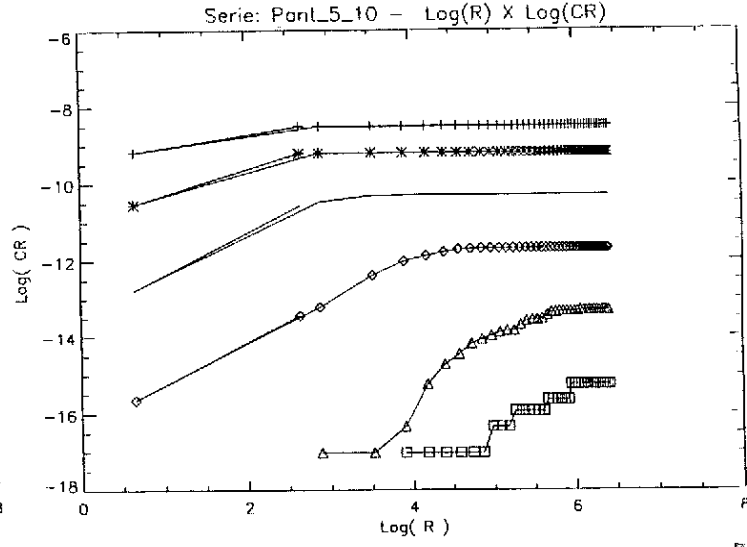
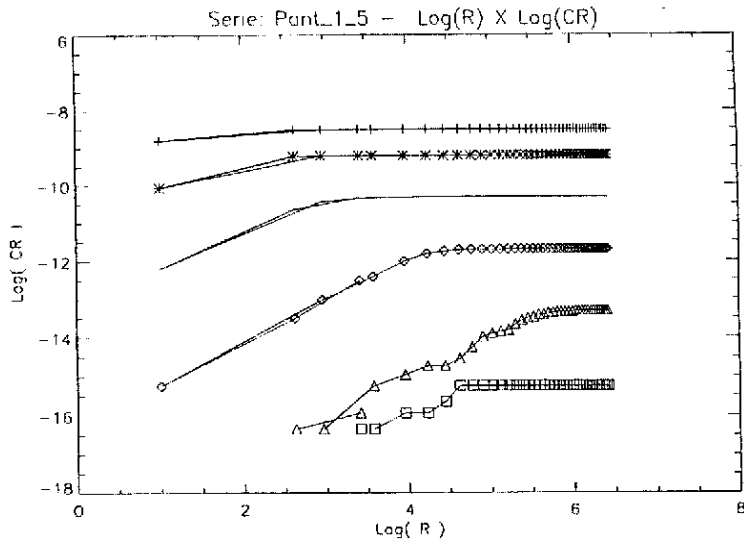
Islaker, H.; Kurths, J. A Test for Stationarity. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, V3: 1573-1579, 1993.



R.S. Paula

Anexos

a) $\text{Log } C(R) \times \text{Log } R$ para as sub-séries de PP95



b) Listagem do programa IKGP.pro

```
*****  
; ISLIKER E KURTHS / GRASSBERGER E PROCACCIA  
; Renata Silva Paula  
*****
```

```
serie=""  
read,serie,prompt="Arquivo: "  
openr,1,serie  
read,N,prompt="Tamanho da Serie: "  
read,K,prompt="Numero de Intervalos: "  
K=fix(K)  
  
Tam=fix(N/K)  
  
S=fitarr(N)  
  
readf,1,S  
close,1  
  
z=S  
z=z+1  
nk=intarr(N)  
nkSoma=0  
  
q=0  
while q LE (N-1) do begin  
  if (q+tam) LT N then begin  
    if (z(q) LE z(q+tam-1)) then begin  
      a=z(q)  
      b=z(q+Tam-1)  
    endif else begin  
      b=z(q)  
      a=z(q+Tam-1)  
    endelse  
  
    for i=0,q+Tam-1 do begin  
      if (z(i) GE a) AND (z(i) LT b) then nk(q)=nk(q) + 1  
    endfor  
  endif  
  q=q+tam  
endwhile  
  
nkSoma=total(nk)  
  
nkTotal=0  
if (z(0) LE z(N-1)) then begin  
  a=z(Tam)  
  b=z(N-1)  
endif else begin  
  b=z(Tam)  
  a=z(N-1)  
endelse
```



```

Xmaz=z(0)
Xmin=z(0)

for i=0,fix(N-1) do begin
  if (z(i) GE a) AND (z(i) LT b) then nkTotal=nkTotal + 1

  ; Encontrando Xmaz e Xmin para calculo de GP
  if(Xmaz LT z(i)) then Xmaz=z(i)
  if(Xmin GT z(i)) then Xmin=z(i)
endfor

Pk = 0
if (nksoma NE 0) then Pk=float(float(nkTotal)/float(nkSoma))

;-----Calculos para a 1a metade da serie-----

Metade=fix(N/2)

Tam=fix(Metade/K)

nkM=intarr(N)

nkSomaM=0

q=0
while q LE (Metade-1) do begin
  if (z(q) LE z(q+Tam-1)) then begin
    a=z(q)
    b=z(q+Tam-1)
  endif else begin
    b=z(q)
    a=z(q+Tam-1)
  endelse

  for i=0,q+Tam do begin
    if (z(i) GE a) AND (z(i) LT b) then nkM(q)=nkM(q) + 1
  endfor

  q=q+tam
endwhile

nkSomaM=total(nkM)

nkTotalM=0
if (z(0) LE z(Metade-1)) then begin
  a=z(Tam)
  b=z(Metade)
endif else begin
  b=z(Tam)
  a=z(Metade)
endelse

```

```

for i=0, Metade-1 do begin
  if (z(i) GE a) AND (z(i) LT b) then nkTotalM=nkTotalM + 1
endfor

;-----Calculos do Quiquadrado-----

nkSomaM=float(nkSomaM)

nktotalM=float(nktotalM)

read,FatorSeno,prompt="Fator da Serie Senoidal: "

QQ=float((nkTotalM - (nkSomaM * Pk))^2 / (nkSomaM * Pk))
QQ=QQ*100./FatorSeno
if (QQ GE 101) then QQ=QQ/1000
print,"QQ= ",QQ

QTol=(QQ-(QQ*0.05))
print,"QTol: ",QTol

;-----Plotando a Serie-----

tempo=intarr(N)

for i=0,fix(N-1) do begin
  tempo(i)=i
endfor

Qtol=string(qtol)

window,0,title='Isliker & Kurths'
wset,0
plot,tempo,z,$
  title='Serie '+serie,$
  xtitle='tempo',$
  xrange=[0,N],$
  subtitle='Quiquadrado= ('+QTol+' )',$
  linestyle=0.

;-----GP: Dimensao de Correlacao-----

if (Qtol LT 90) then print,"Serie NAO Estacionaria: dimensao de correlacao a ser calculada NAO SIGNIFICATIVA"

  print,"N: ",N
  print,"Xmaz: ",Xmaz
  print,"Xmin : ",Xmin

  read,dD,prompt="Numero de Dimensoes: "

  read,dT,prompt="Delta T: "

```

```

Rmaz=Xmaz
Rmin=Xmin
dR=(Rmaz/40.)
R=fltarr(40.)
CR=fltarr(40.)
Par=fltarr(2,40)
Inclinacao=fltarr(dD)

; Preenchendo o vetor R
for i=0,39 do begin
    R(i)= abs(Rmin+ ((i+1)*dR))
endfor

window,1,title='Grassberger e Procaccia'
wset,1
plot,Par(0,*),Par(0,*),$
    xrange=[-2,8], yrange=[-17,-7],$
    title='Serie: '+Serie+' - Log(R) X Log(CR)',$
    xtitle='Log( R )',$
    ytitle='Log( CR )'

; Variando Dimensao
for d=1,fix(dD) do begin
    dT= d*dT
    if (dT GT N-1) then begin
        print,'Impossivel calcular outras dimensoes!!'
        print,'Ultima Dimensao Calculada: ',d-1.
        d=dD
    endif else begin
        print,'Dimensao: ',d, '.....dT: ',dT
        ; Variando R
        for i=0,39 do begin
            ; Construindo os vetores "S" -> z(j) - z(m)
            m=dT
            j=0.
            SomaQ=0.

            repeat begin
                if (R(i) GE abs( z(j)-z(m) )) then SomaQ=SomaQ + 1.
                m=m+dT
                j=j+dT
            endrep until (m GE (N-1))

            CR(i)= double(SomaQ/(N^2))

            Par(0,i)=ALOG( R(i) )
            Par(1,i)=ALOG( CR(i) )
        endfor

        wset,1
        oplot,Par(0,*),Par(1,*)
        oplot,Par(0,*),Par(1,*),psym=d
    endfor
endfor

```

```
;Calcular a inclinacao desta curva
;A=[1,1]
;Result=Curvefit(Par(1,*),Par(0,*),1.0,A)
;print,A
;Inclinacao(d)=ATAN(A(1),A(0))
endelse
endfor
```

```
;Plotando as Dimensoes
;Tempo=intarr(dD)
;for i=0,dD do Tempo(i)=i
;window,2,title='Grassberger e Procaccia - Resultado'
;wset,2
;plot,Tempo,Inclinacao
```

```
end
```