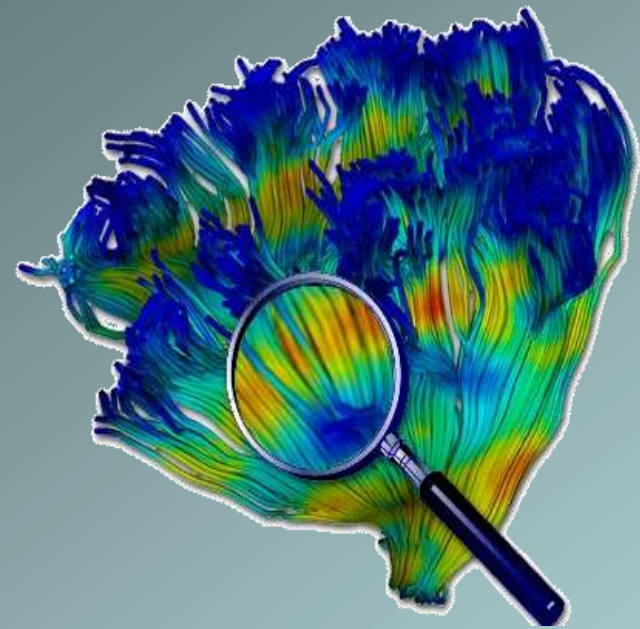




# ***TRACTOGRAFIA POR RESSONÂNCIA MAGNÉTICA***

**- Processamento de Sinal e Imagem -**



Ana Filipa Dourado  
Vítor Silva

- 6 Junho 2008 -



# Outline / Sumário:

- Introdução ao Tema;
- Breve abordagem anátomo-fisiológica cerebral;
- Princípios de formação de imagem por RM;
- Conceito de Difusão;
- Tensor de Difusão por RM;
- Técnicas de Processamento de imagem para visualização do tensor difusão e Tractografia;
- Aplicações;
- Conclusão.



# Introdução:

- O estudo das vias nervosas presentes na substância branca são essenciais para o diagnóstico e o entendimento de patologias como por exemplo: distúrbios da linguagem, da aprendizagem e da fala;
- Recentemente surgiu uma técnica de imagem de estudo destas vias (primeiro estudo por Basser, 1994), não invasiva, que tem motivado neurologistas, neurocirurgiões e neurocientistas para um maior entendimento do funcionamento cerebral. Trata-se da imagem por tensão difusional ou DTI;
- Esta aplicação também tem sido usada recentemente na avaliação das fibras do miocárdio.

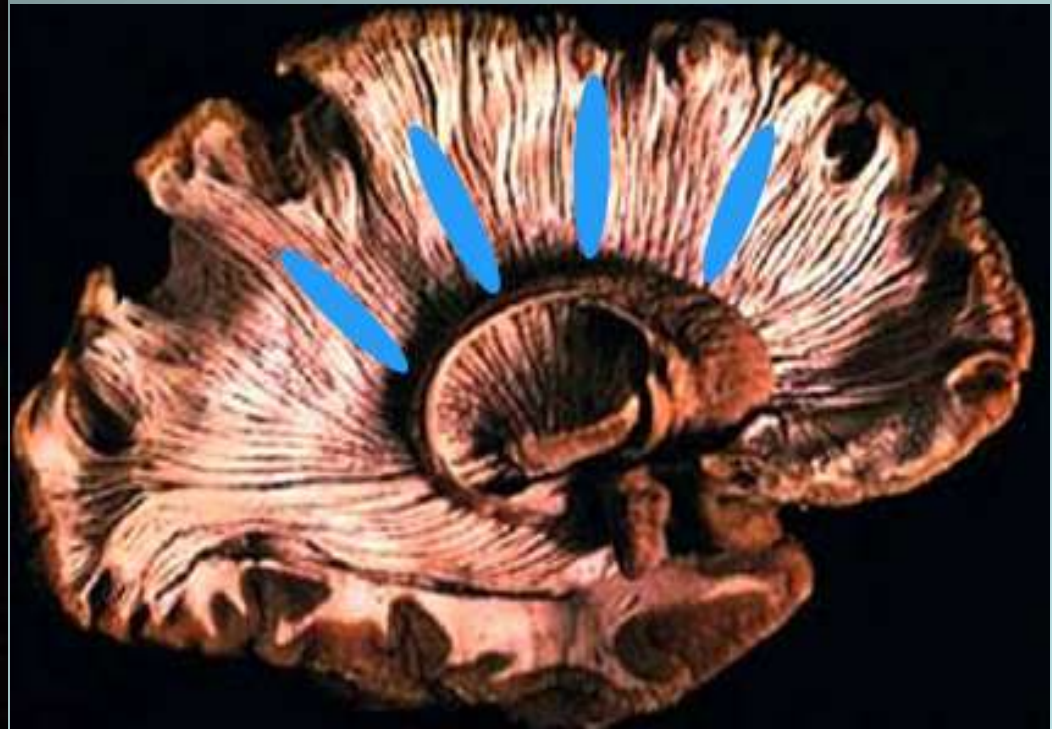
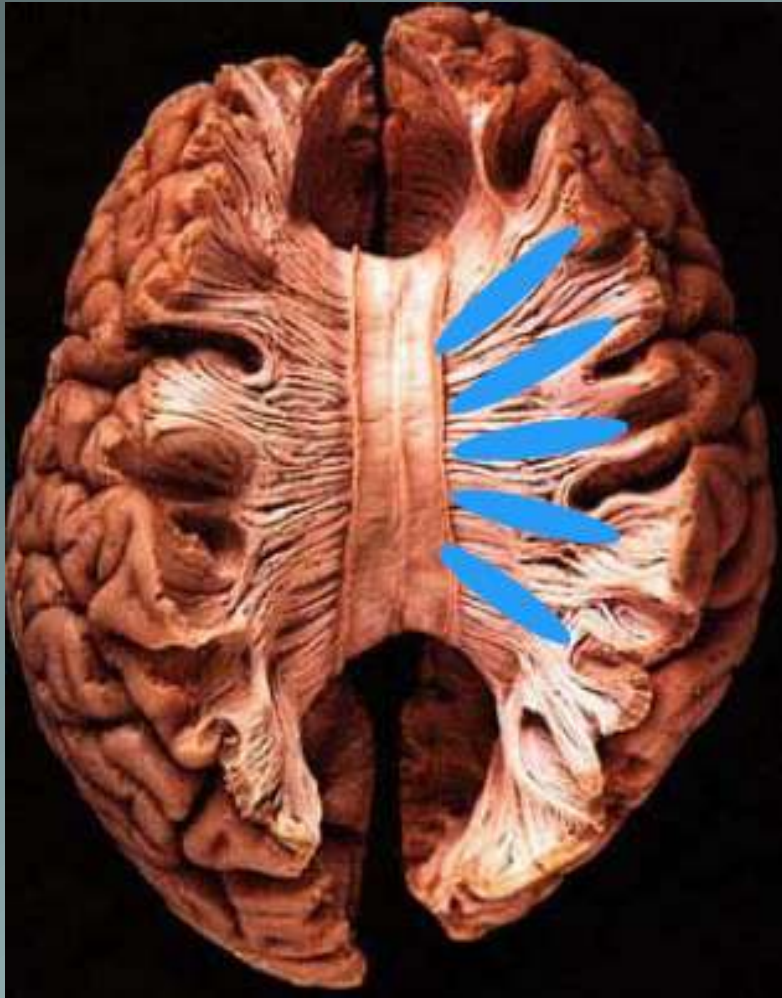


# Introdução ao Tema:

- A técnica de tractografia por ressonância magnética avalia as fibras nervosas através dos traços da difusão da água representada por um tensor, com a união de pontos e formando a imagem de uma via nervosa;
- A técnica de tractografia por RM não demonstra fibra a fibra mas sim um conjunto delas, indicando possíveis trajectos nervosas pela substância branca.



# Anatomia Cerebral:

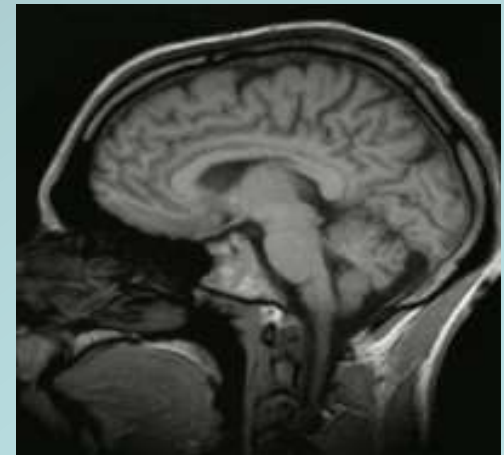


Imagens retiradas de Virtual Hospital ([www.vh.org](http://www.vh.org))



# Cérebro Humano:

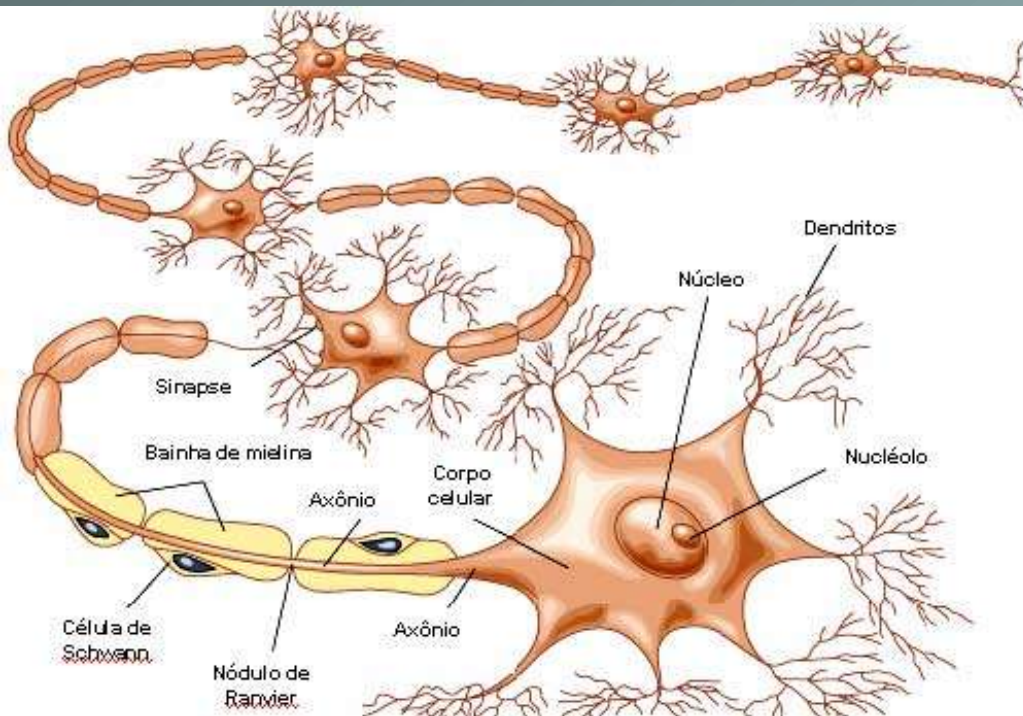
- Cérebro humano é imóvel e representa 2% do peso corporal;
- Tem 2 hemisférios (corpo caloso a dividi-los);
- Composto por milhões de neurónios;
- Distinção de substância cinzenta (córtex cerebral - neurónios) de substância branca (esta composta pelas fibras dos axónios);
- Dividido em lobos cerebrais.





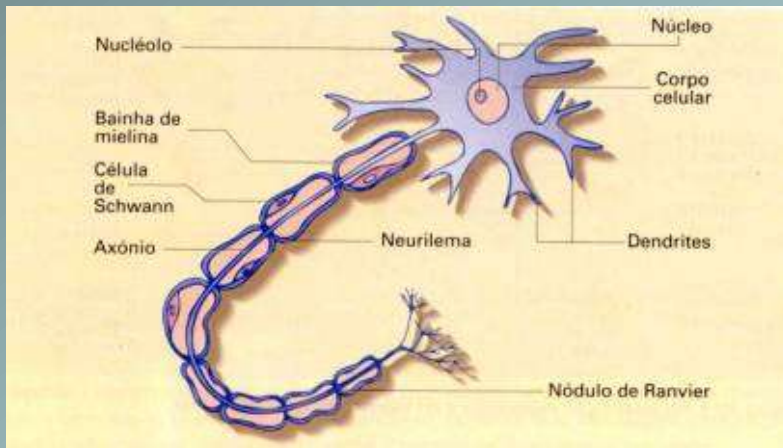
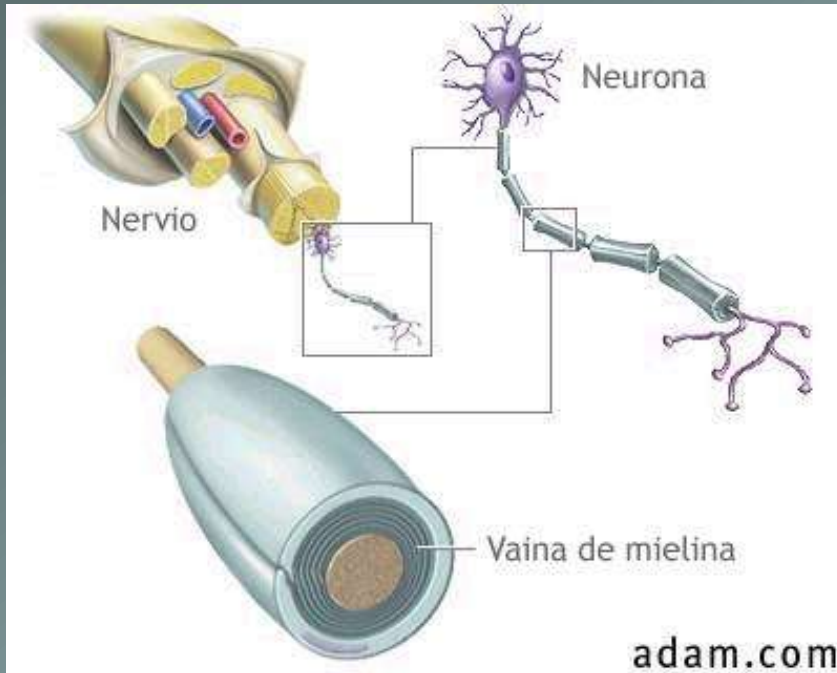
# Neurônio:

- Corpo celular (um único núcleo);
- Dendrites (numerosos, curtos, ramificados, não têm bainha de mielina);
- Axônio (extensão citoplasmática alongada); possui **mielina.**





# Camada de Mielina:



- Hipótese preferida para explicar a anisotropia da difusão em tecidos cerebrais.

- Tem permeabilidade limitada, restringindo a difusão perpendicular à direcção das fibras;

- Aumentou o interesse em estudos relacionados a doenças (desmielinização) e maturação da substância branca;

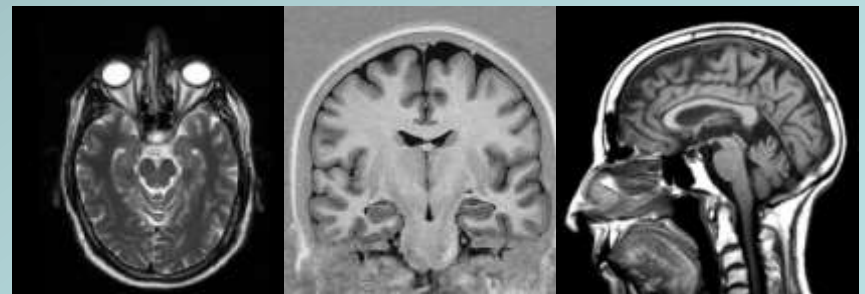
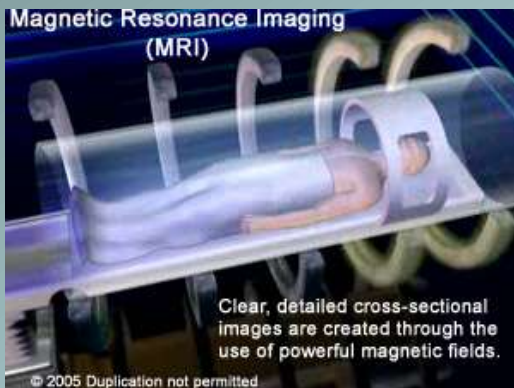
- Como consequência, fibras não-mielinizadas devem ser mais isotrópicas;





# Princípios Físicos da RM:

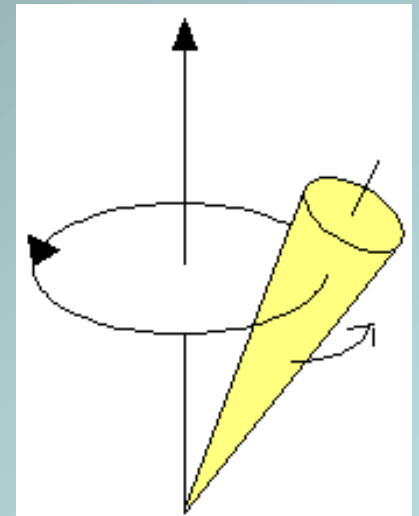
- Método de imagem que consiste em gerar imagens seccionais do corpo humano;
- Tem como base a interacção de um elevado campo magnético com pulsos de radiofrequência e com os núcleos dos átomos que constituem o corpo humano.





# Princípios Físicos da RM:

- Os núcleos em IRM, devem possuir um momento angular , ou spin diferente de zero;
- Na presença de um campo magnético, o núcleo em causa descreverá um movimento de acordo com este - precessão;
- O núcleo de hidrogénio é a base da IRM, não só pela sua elevada abundância no corpo humano , mas também porque tem elevada sensibilidade magnética.

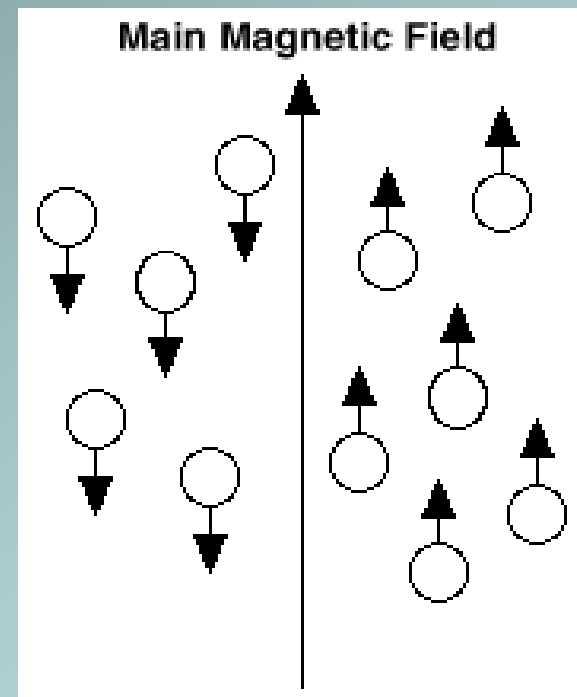


<http://static.hsw.com.br/gif/mri-top.gif>



# Princípios Físicos da RM:

- Após a colocação do paciente num campo magnético externo, potente e uniforme, os prótons de hidrogénio tendem para se orientar:
  - Paralelamente ao campo ( estado de equilíbrio);
  - Anti-paralelamente ao campo (estado de excitação).





# Formação da Imagem:

- O sinal de ressonância magnética, captado pelas antenas, vai ser localizado e codificado através dos gradientes, no espaço  $K$  (representação dos dados brutos);
- Posteriormente, o sinal é reconstruído através da transformada de Fourier em imagem.



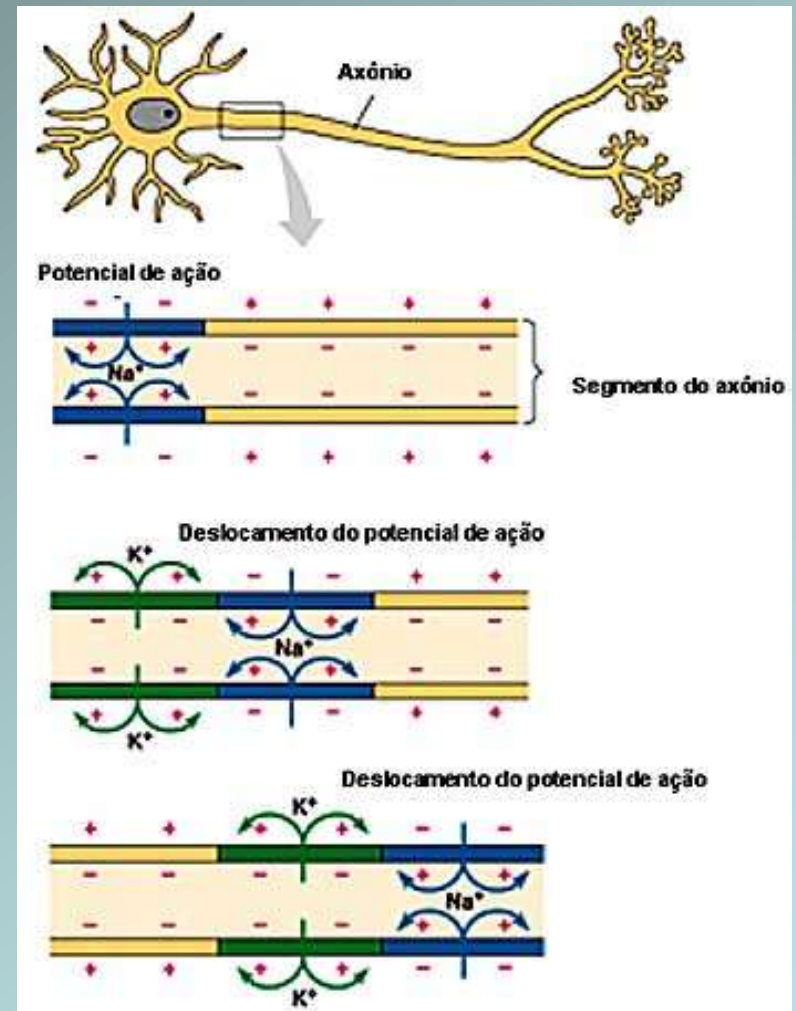
# Difusão:

- Fenómeno de transporte ocasionado por movimentação molecular;
- Esta movimentação é causada pela energia cinética das moléculas;
- É influenciada por vários factores: temperatura, peso molecular, meio, presença de barreiras;
- A sua restrição é capaz de fornecer informações estruturais sobre o meio.



# Difusão:

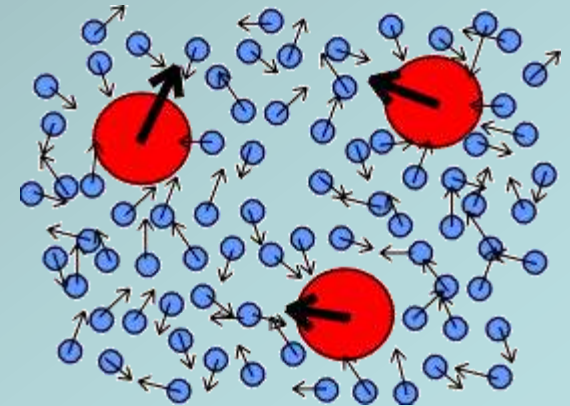
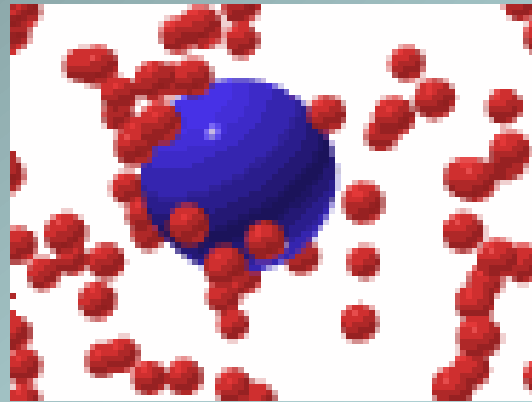
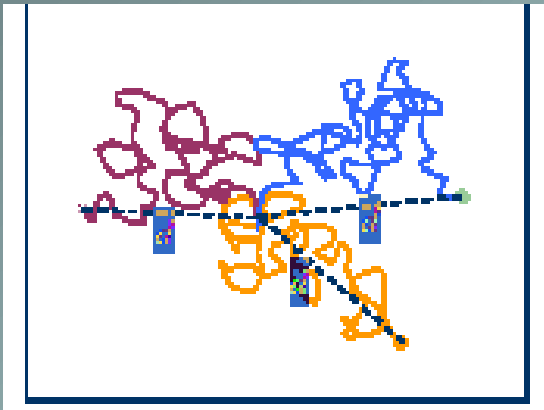
- Responsável pelo transporte passivo entre as membranas celulares.





# Movimento / Difusão Browniana:

- A agitação molecular aleatória, irregular e contínua é ocasionada por colisões entre as moléculas;
- Este movimento microscópico dá origem ao fenómeno macroscópico da difusão.





# Movimento / Difusão Browniana:

- Difusão molecular tem como base os movimentos brownianos das moléculas (energia térmica do sistema).

$$R = \sqrt{6Dt}$$

ONDE:

D = coeficiente de difusão;

t = tempo permitido para a difusão.

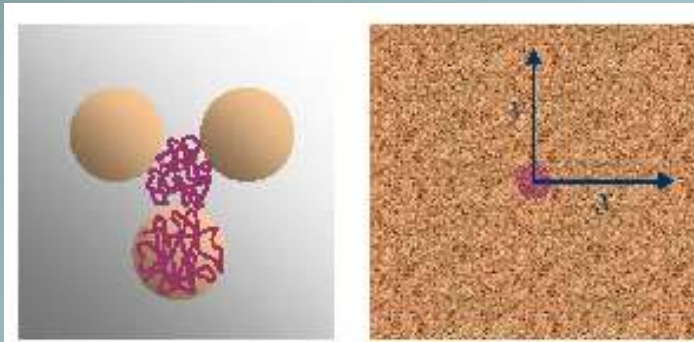




# Tipos de Difusão:

## • ISOTRÓPICA

- ✓ Estrutura e propriedades da difusão são as mesmas em todas as direcções;
- ✓ Probabilidade de difusão é a mesma em todas as orientações;
- ✓ Exemplos: copo de água, substância cinzenta cerebral.



## • ANISOTRÓPICA

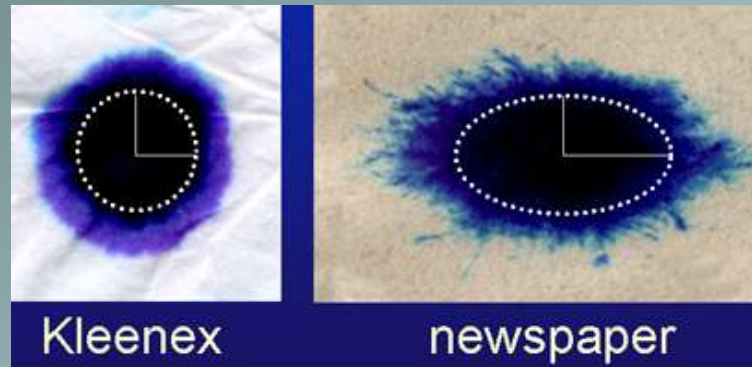
- ✓ Na presença de barreiras, as propriedades da difusão são dependentes da direcção em que são medidas;
- ✓ Exemplos: cristais, **fibras nervosas**.





# Anisotropia da Difusão nos Tecidos Biológicos:

- Movimento da água nos tecidos;
- Mais rápida numa direcções que outras;



- Anisotropia: taxa da difusão depende da direcção. Esta pode indicar tractos (fibras) nervosas.





# Coeficiente / Anisotropia da Difusão nos Tecidos Biológicos Cerebrais:

|                   | Diffusion coefficient                 |
|-------------------|---------------------------------------|
| Tissue            | $\cdot 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$ |
| CSF               | $2.94 \pm 0.05$                       |
| Gray matter       | $0.76 \pm 0.03$                       |
| White matter:     |                                       |
| Corpus callosum   | $0.22 \pm 0.22$                       |
| Axial fibers      | $1.07 \pm 0.06$                       |
| Transverse fibers | $0.64 \pm 0.05$                       |

✓ Valor do coeficiente de difusão depende directamente na direcção relativa das fibras e campo magnético usado, conhecida como difusão anisotrópica;

✓ Difusão da água é isotrópica na substância cinzenta;

✓ Pelo contrário, na substância branca é extremamente anisotrópica, dependendo da orientação das fibras nervosas e na direcção de gradiente aplicada em cada localização espacial da imagem;

✓ Parece que os coeficientes de difusão diminuem significativamente quando as fibras de mielina são perpendiculares à direcção do gradiente usado para medir as movimentações moleculares.

in



# Imagem

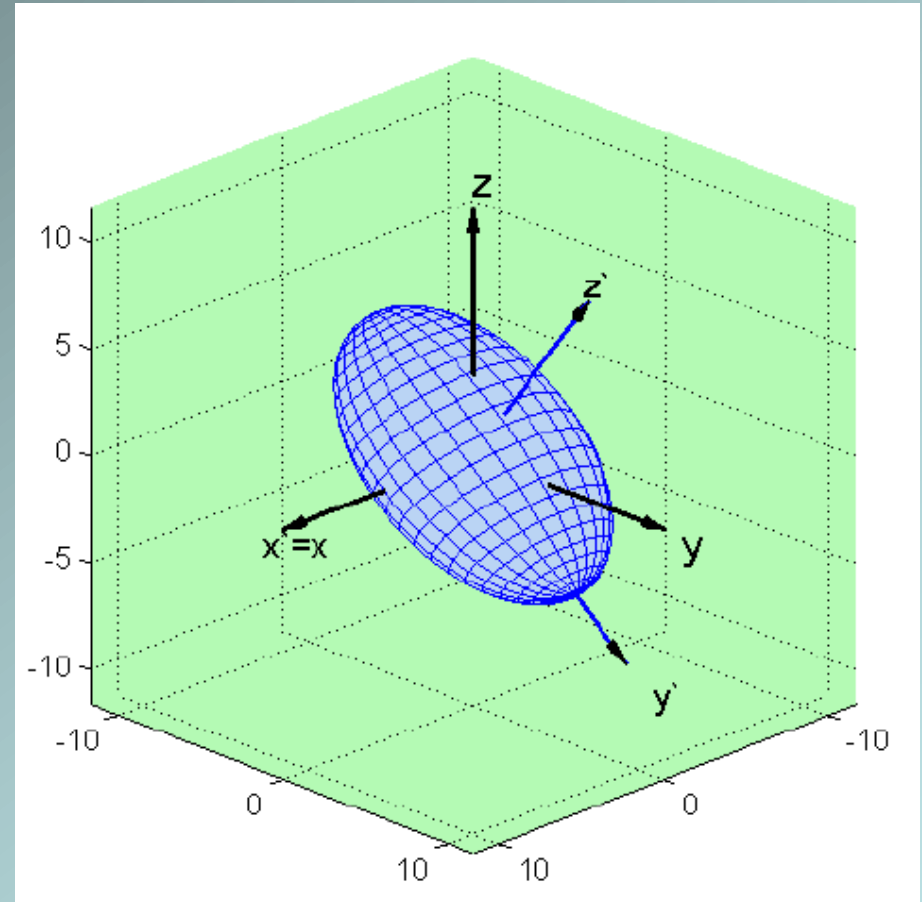
## Tensorial da Difusão:

- Difusão local é representada por uma distribuição Gaussiana em 3D;
- Tensor é um modelo matemático da anisotropia direccional da difusão;
- Determinado em cada voxel, resolvendo um sistema de equações;
- DTI mede o Coeficiente Aparente de Difusão em, pelo menos, 6 direcções diferentes e calcula o tensor de difusão.



# Tensor Difusão:

- Abstracção matemática das elipsóides é chamada de tensor.
- Tensores expressam quantitativamente o deslocamento médio das moléculas de água nas várias direcções.





# Imagem Tensorial da Difusão

(DTI):

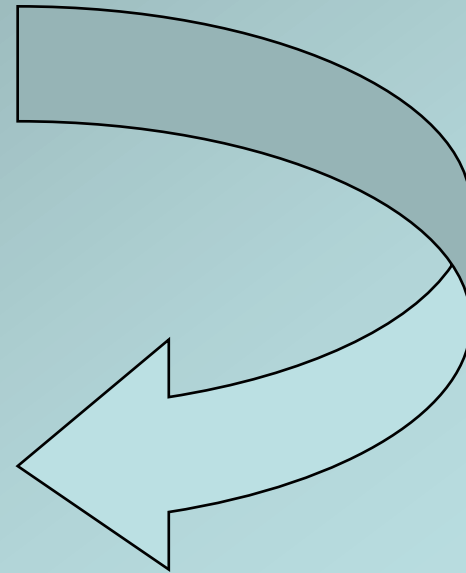
- Representado por uma matriz simétrica 3x3

$$\bar{D} = \begin{pmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{xy} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{xz} & D_{yz} & D_{zz} \end{pmatrix}$$

Através do tensor, pode-se calcular:

- Direcção da melhor difusão;
- Grau de anisotropia;
- Constante / Coeficiente de Difusão em qualquer direcção.

***Este tensor difusão é definido para cada voxel numa base 3D.***

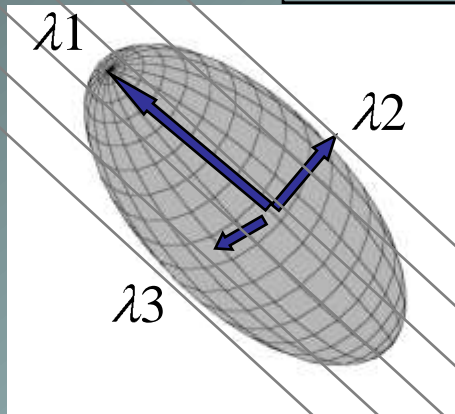




# Tensores de Difusão e Anisotropia:

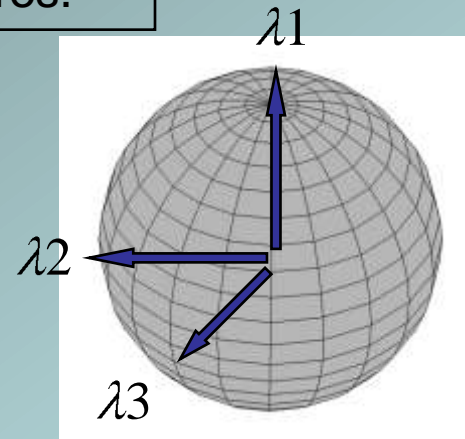
DTI permite quantificar a difusão da água no tecido cerebral.

A difusão em voxel é descrito por 3 vectores perpendiculares.



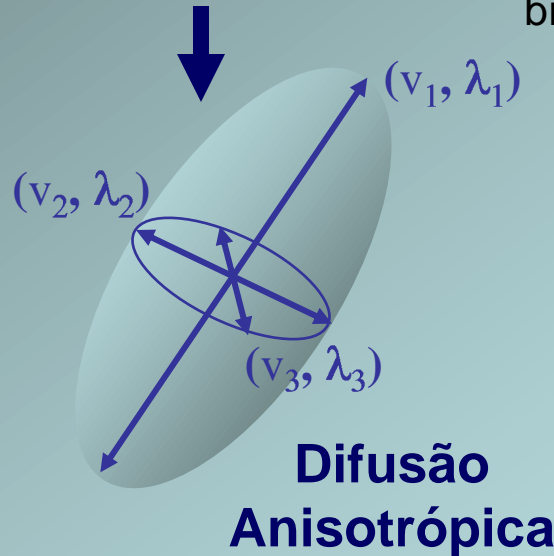
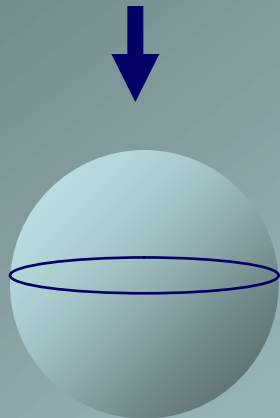
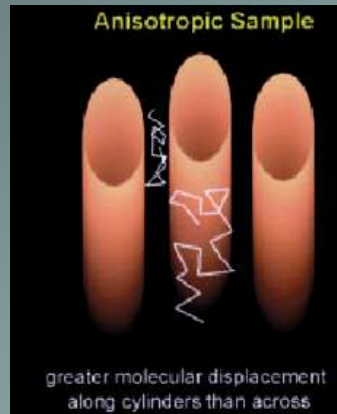
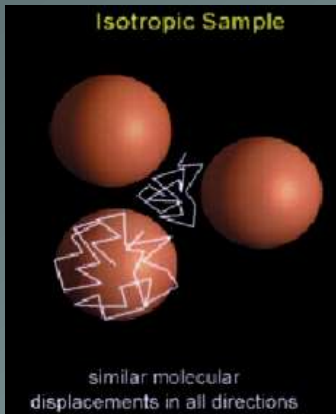
## Difusão Anisotrópica

Ocorre quando o movimento da água está restrito a uma direcção primária (fibras mielinizadas)



Difusão Isotrópica ocorre quando não há restrição no movimento da água (ventrículos, LCR).

# Tensor Difusão das Moléculas de Água:



- Difusão Isotrópica vs. Anisotrópica

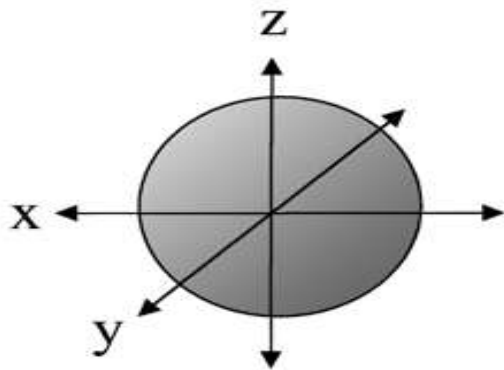
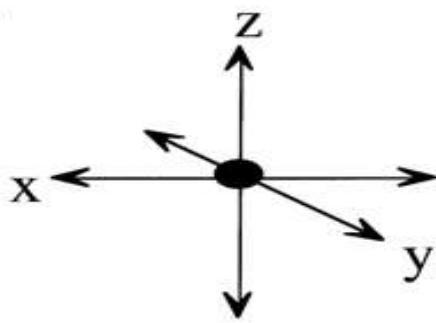
- Difusão mais rápida ao longo das fibras mais perpendiculares ao campo magnético;
- Anisotropia usada para “traçar” as fibras, estimando a integridade da substância branca cerebral.

- Modelo Tensor

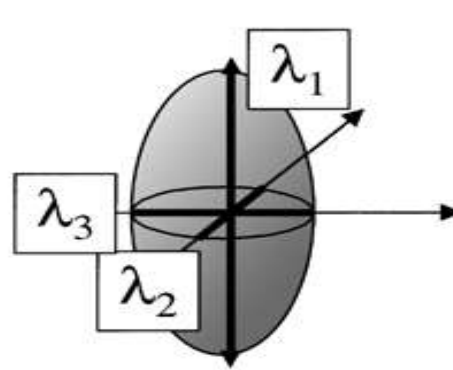
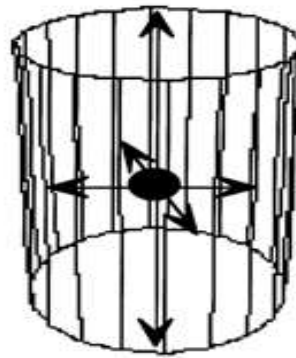
$v_i$  : Principais direcções de difusão  
“Eigenvector”

$\lambda_i$  : difusividades associadas  
“Eigenvalue”



**a**

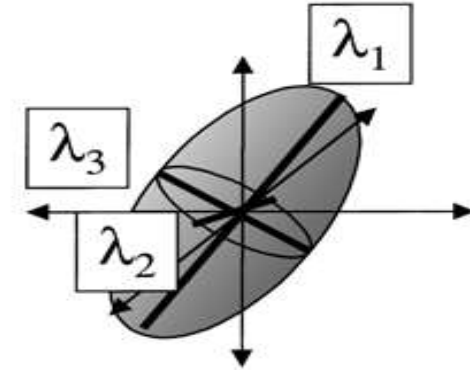
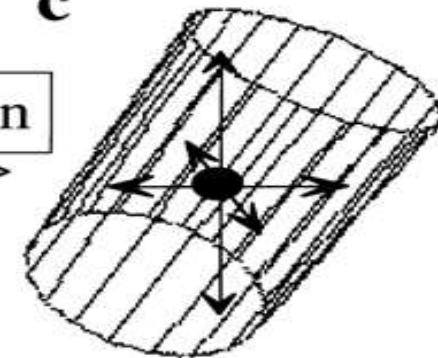
$$\begin{bmatrix} D & 0 & 0 \\ 0 & D & 0 \\ 0 & 0 & D \end{bmatrix}$$

**b**

$$\begin{bmatrix} \lambda_3 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_1 \end{bmatrix}$$

**c**

Rotation



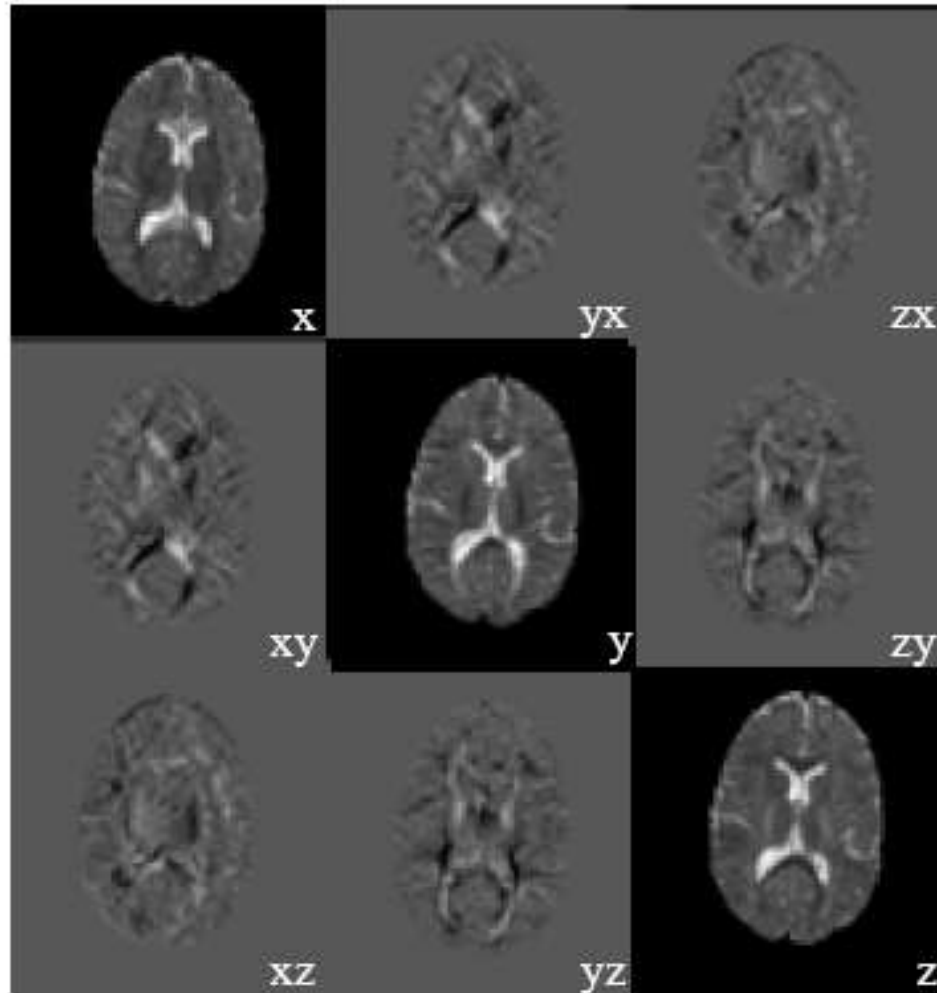
$$\begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{yx} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{zx} & D_{zy} & D_{zz} \end{bmatrix}$$

## • DIAGONALIZAÇÃO DO TENSOR DIFUSÃO

Fornece 3 vectores de difusão (*eigenvector*) com 3 valores correspondentes (*eigenvalue*)

# Transformar essas equações em imagens:

$D =$





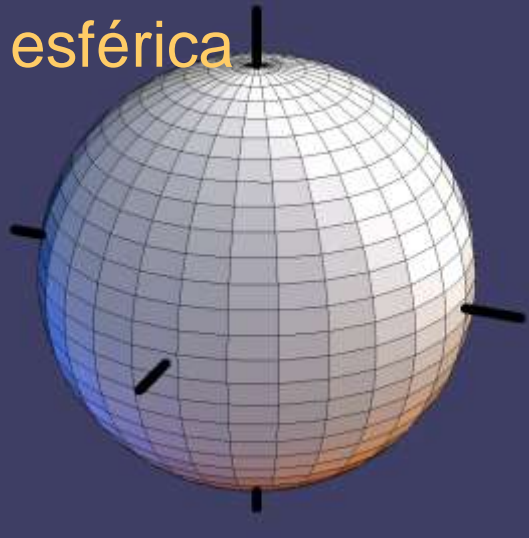
# Tensor Difusão:

- Um tensor é composto por 3 vectores;
  - *Pensar num vector como uma seta num espaço 3D, que aponta numa direcção e tem um comprimento.*
- O primeiro vector é o mais longo (aponta no eixo principal);
- Os segundo e terceiro são ortogonais ao primeiro.

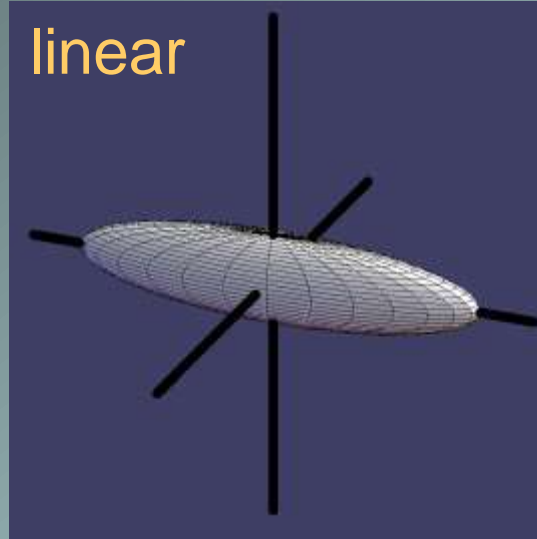


# Tensor Difusão 3D:

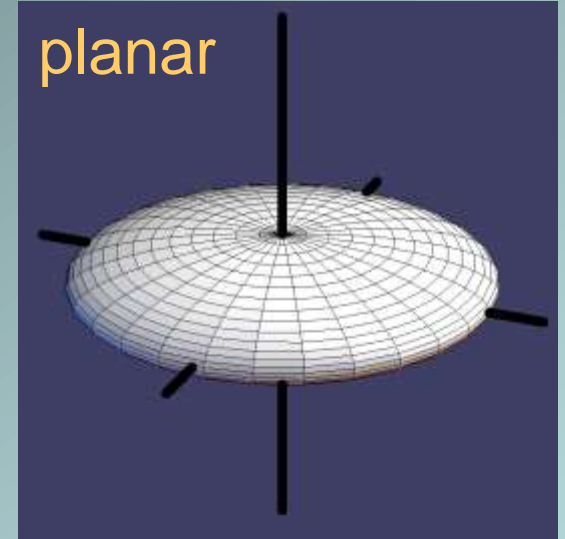
esférica



linear



planar



**ELIPSÓIDES**: representação Gaussiana em 3D; melhor modelo para representar o tensor difusão.

É a imagem de uma esfera unitária sob uma matriz de tensor de difusão.

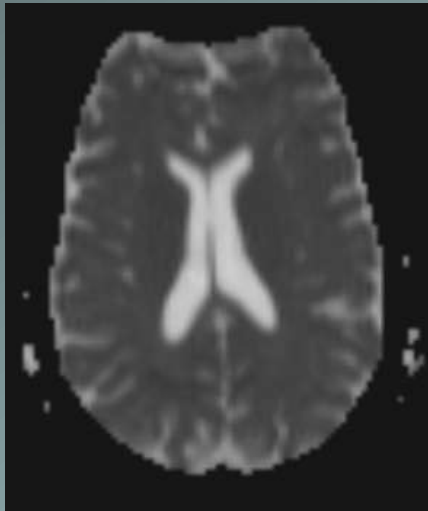
Em DTI, a anisotropia é representada por uma elipsóide, com um formato e orientação.



# Propriedades / Índices Escalares:

- Média de Difusividade (MD):

## Tamanho do Tensor



Subst. Branca

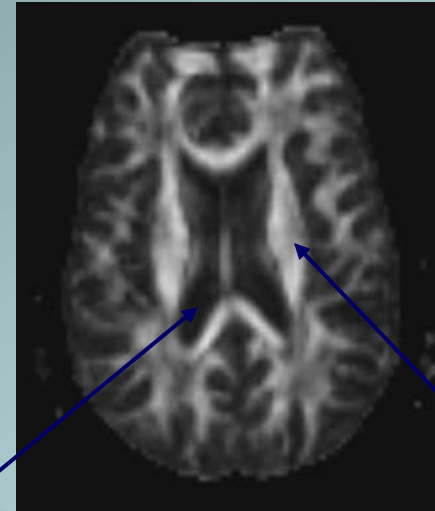
LCR

Baixa

Elevada

- Anisotropia Fraccional (FA):

## Forma do Tensor



Isotrópica

Difusão Direccional

0

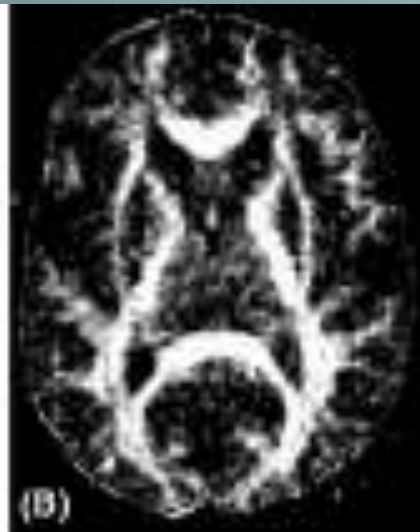
1



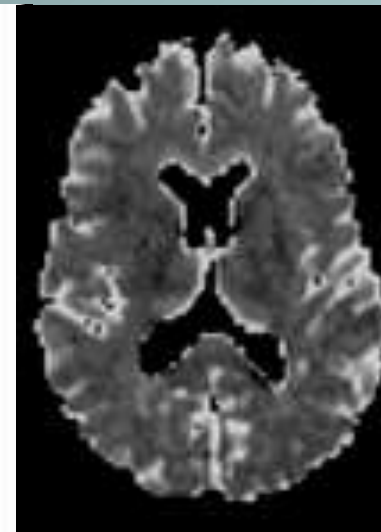
# Mapas / Índices Escalares DTI:



Ponderação T2



Mapa FA



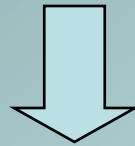
Mapa Trace  
(difusividade)



# Propriedades / Índices Escalares:

- MD: magnitude de difusão num voxel;
- FA: extensão na qual a difusão está restringida (avalia a integridade das fibras).

**Substância Branca Lesionada**



**Aumento da difusão (MD)**

**Diminuição da Anisotropia (FA)**

# DTI elipsóide

no mínimo 6 direcções de difusão



Ausência  
de difusão

z

y

x

Elipsóide representa a magnitude de difusão em todas as direcções.

Direcções pela sua distância do centro da elipsóide até à periferia.





# Tensor Difusão:

- Os aparelhos de RM produzem, para um exame de DTI, uma imagem de referência e um conjunto de no mínimo 6 imagens correspondentes a diferentes direcções de difusão;
- Estas imagens não determinam directamente o tensor de difusão; os elementos da matriz do tensor de difusão precisam de ser calculados a partir das imagens adquiridas. Dos tensores de difusão podem-se construir alguns tipos de mapas, que são úteis para a interpretação dos exames.

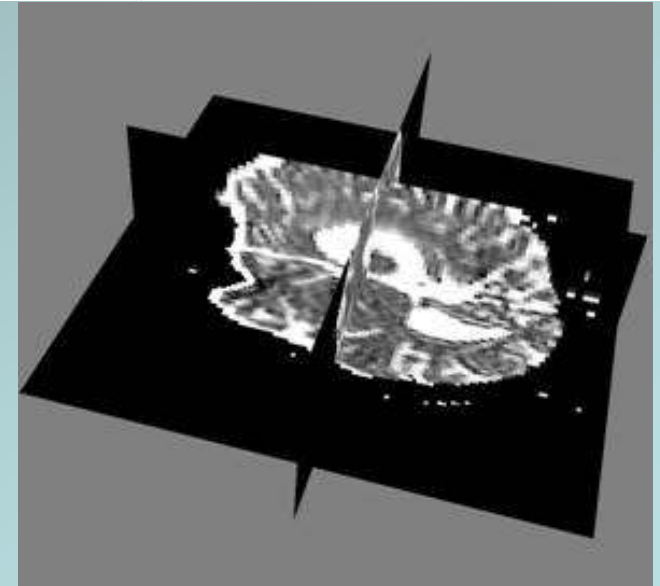
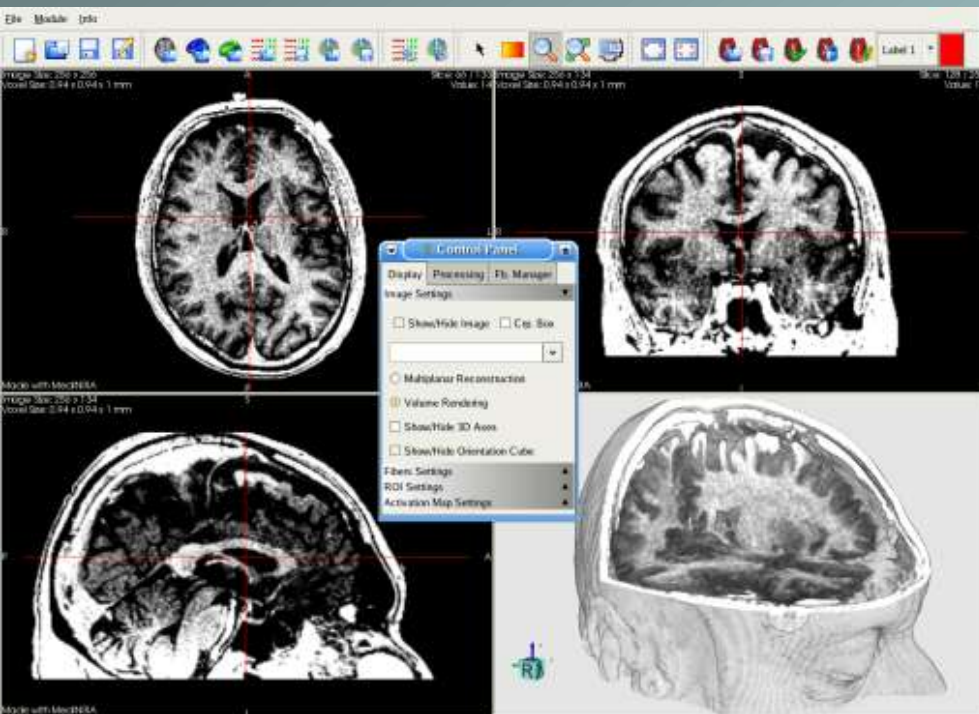
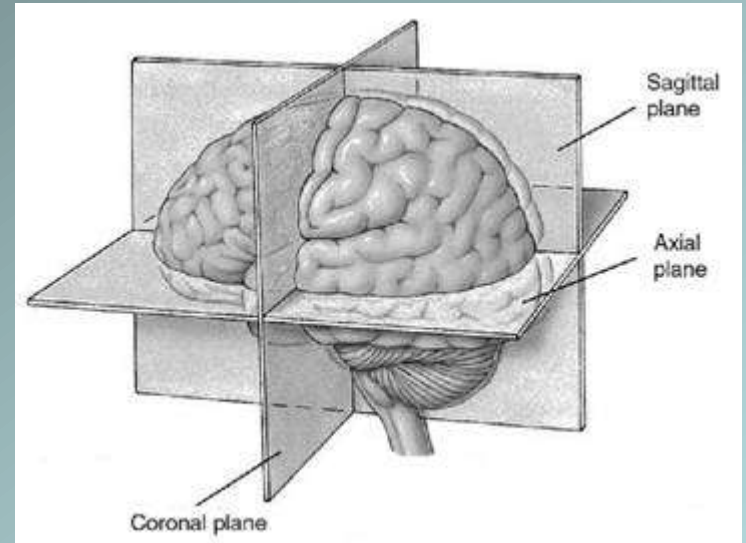


# Ferramenta

## Aplicacional do DTI:

Referência Anatômica:

Visualização 2D e 3D (permitir reconstrução de imagens)





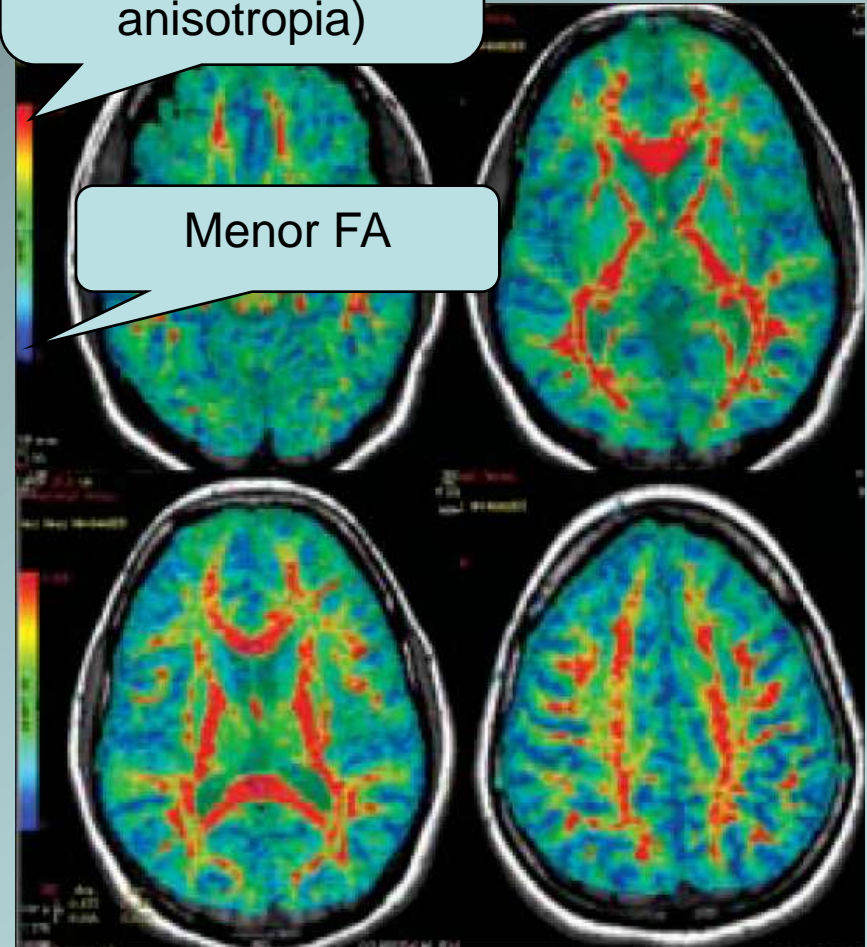
# Ferramenta Aplicacional do DTI em Cortes 2D:

- um só corte;
- difícil para perceber estruturas como cérebro (volume 3D).

- Colorcoding  
(Codificação de Cores):  
relacionada com os índices de anisotropia (valores escalares):  
tabelas LUT (*look up table*)

Maior FA  
(índice de  
anisotropia)

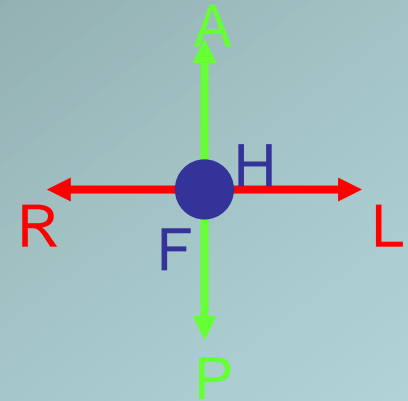
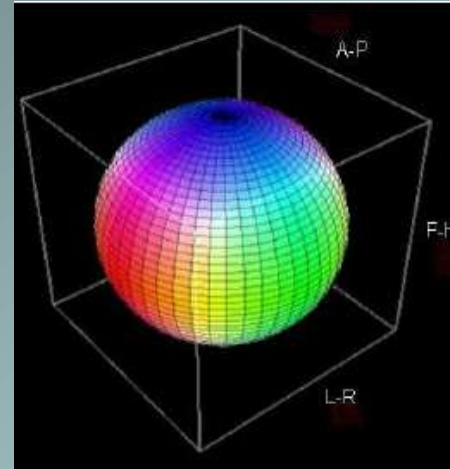
Menor FA



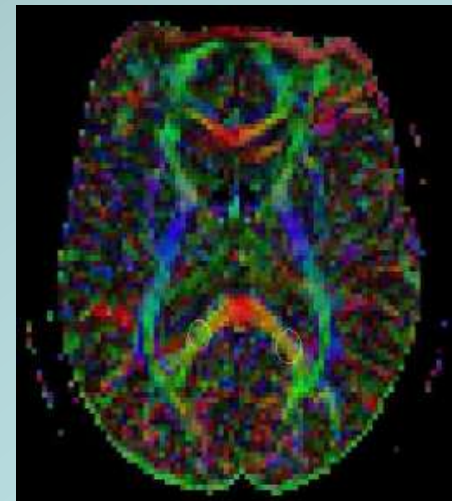
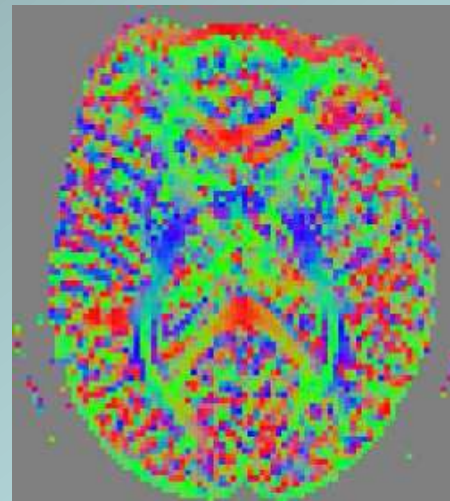


# Ferramenta Aplicacional do DTI – Métodos 2D:

- Colorcoding direcção principal da difusão: mais usado na prática clínica; codificação de acordo com a direcção do vector principal de difusão e FA;



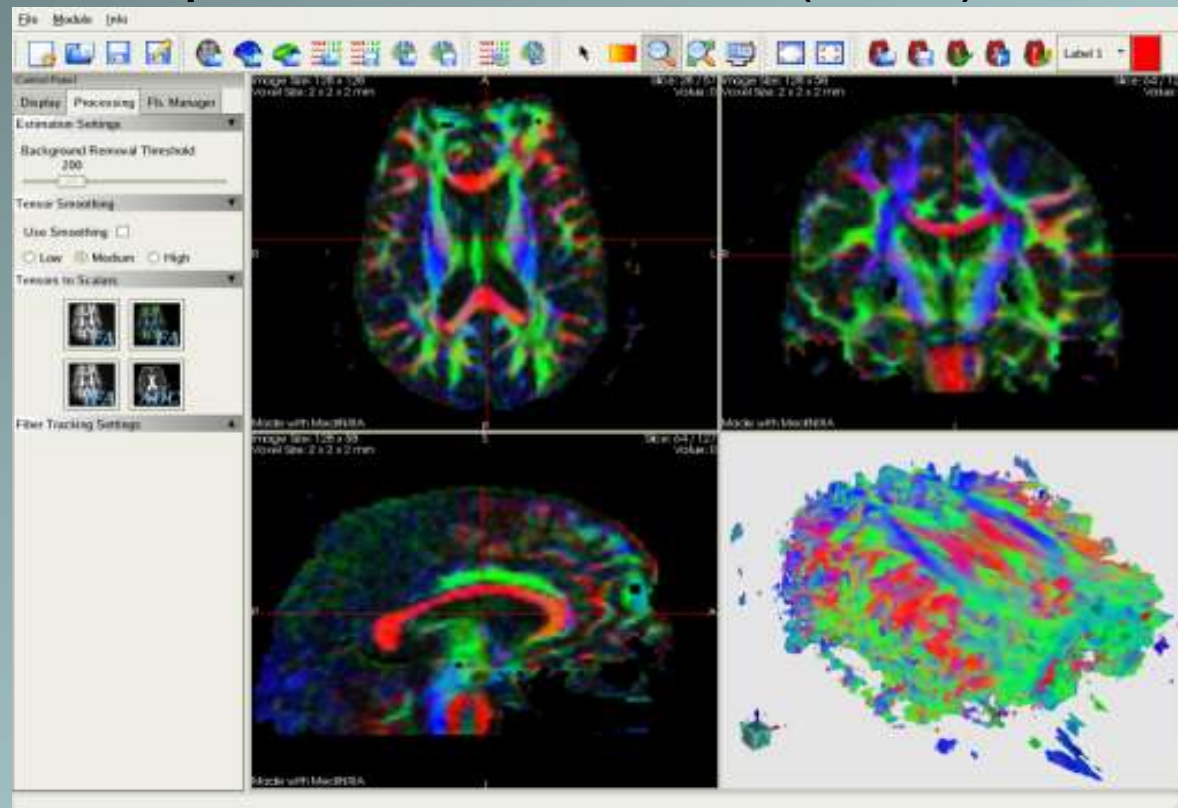
Valores absolutos x, y, z usados com cores vermelho, verde e azul, respectivamente (modelo RGB).





# Ferramenta Aplicacional do DTI – Análise Quantitativa do DTI:

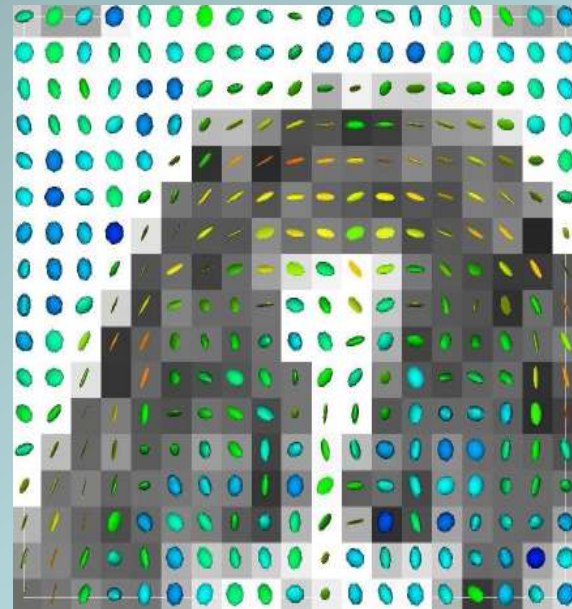
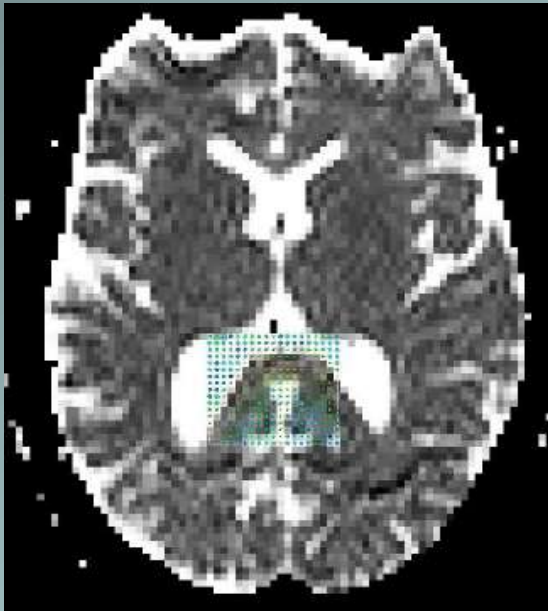
- Permitir visualizar mapas escalares de Anisotropia Fraccional (FA) e Média de Difusividade (MD) e Coeficiente Aparente de Difusão (ADC).





# Ferramenta Aplicacional do DTI – *Glyphing*:

- Os *glyphs* são ícones que representam a informação local do tensor de difusão.
- 2D *glyphs*: podemos ter a impressão que as regiões estão unidas (mas estas conexões só podem ser visíveis em 3D)

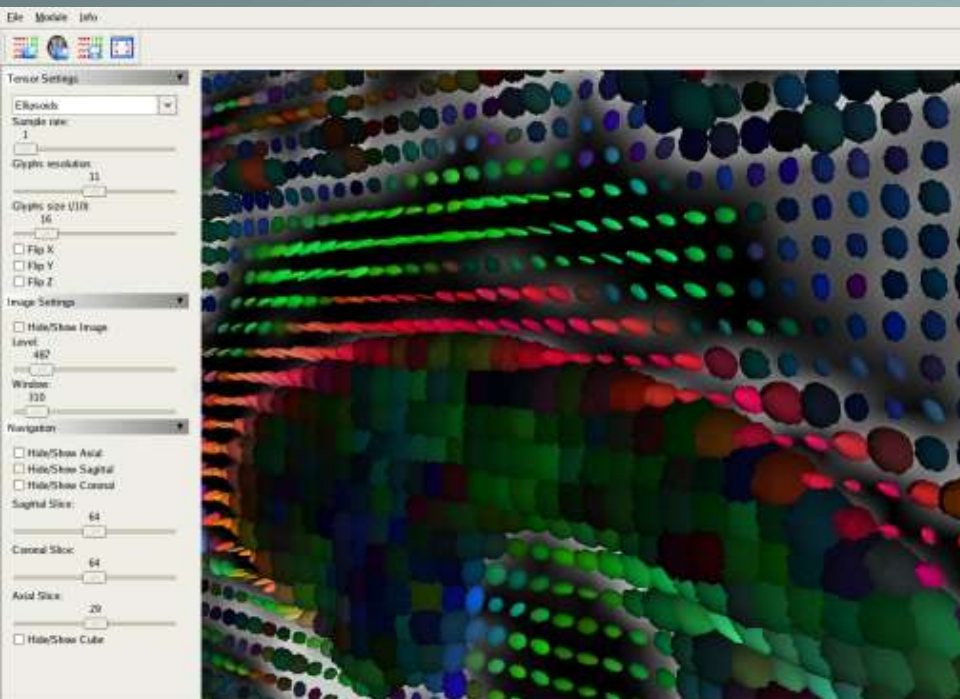
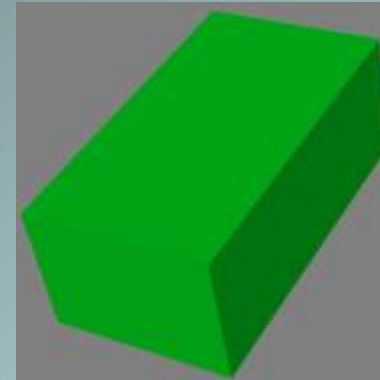
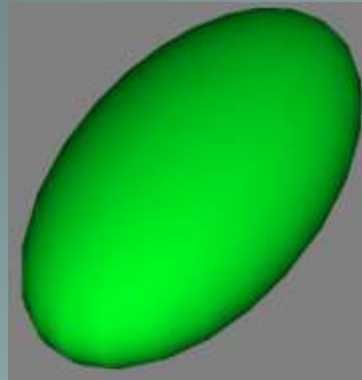




# Ferramenta Aplicacional do DTI – *Glyphing*:

Dois tipos de *glyphs*:

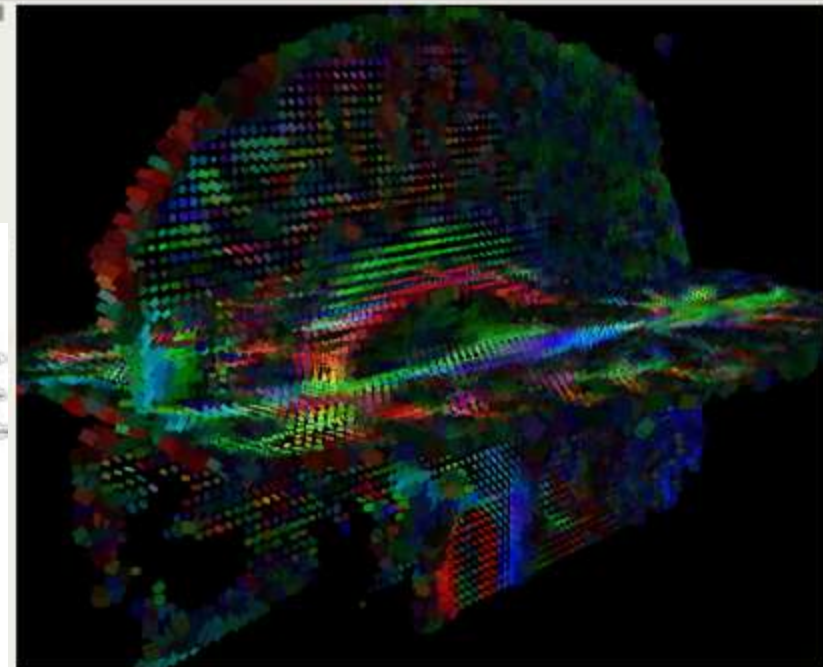
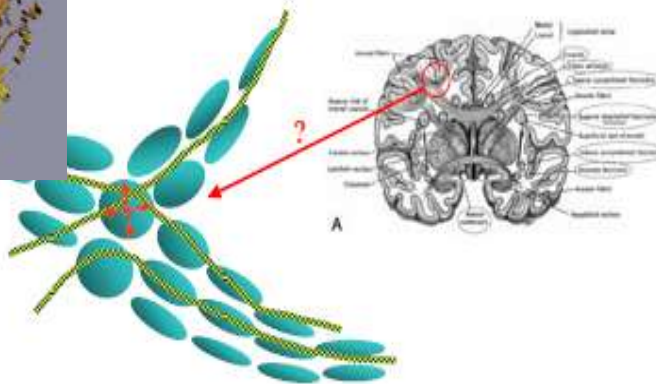
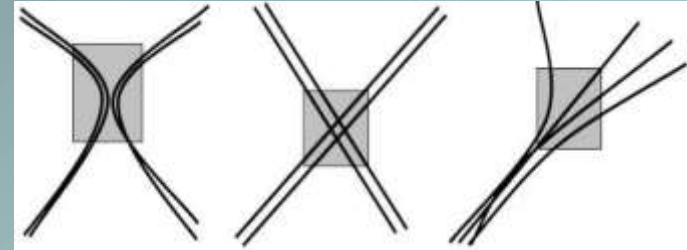
- Elipsóides;
- Cubóides.





# Ferramenta Aplicacional do DTI – Métodos 3D - *Glyphing* :

- PROBLEMA: orientação das fibras não é tão linear, podendo haver pontos de bloqueio quando aplicados em 3D;
- Pode-se não avaliar todas as fibras ao aplicar um único *glyph*.





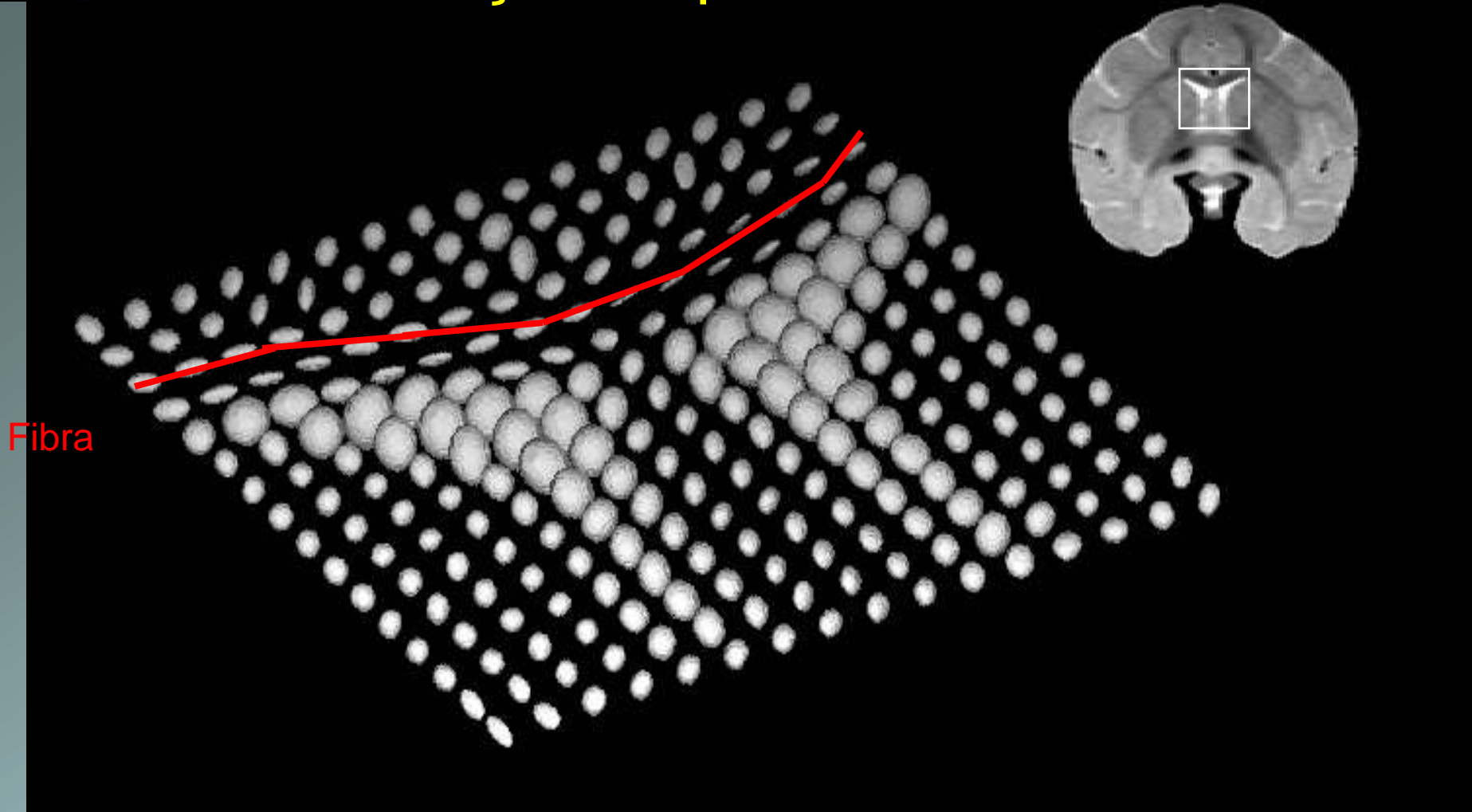


# Ferramenta Aplicacional do DTI – *Fiber Tracking* ou *Streamlines - Tractografia*:

- *Fiber tracking* simplifica o campo tensorial a um campo vectorial de acordo com a direcção do vector principal;
- Este campo vectorial é tornado contínuo pela técnica de interpolação;
- Traçado é tangente ao campo vectorial e a trajectória delineada é a “fibra ou via nervosa”.

# Imagem da Elipsóide

Informação disponível através do DTI





# Ferramenta Aplicacional do DTI – *Fiber Tracking* - Tractografia:

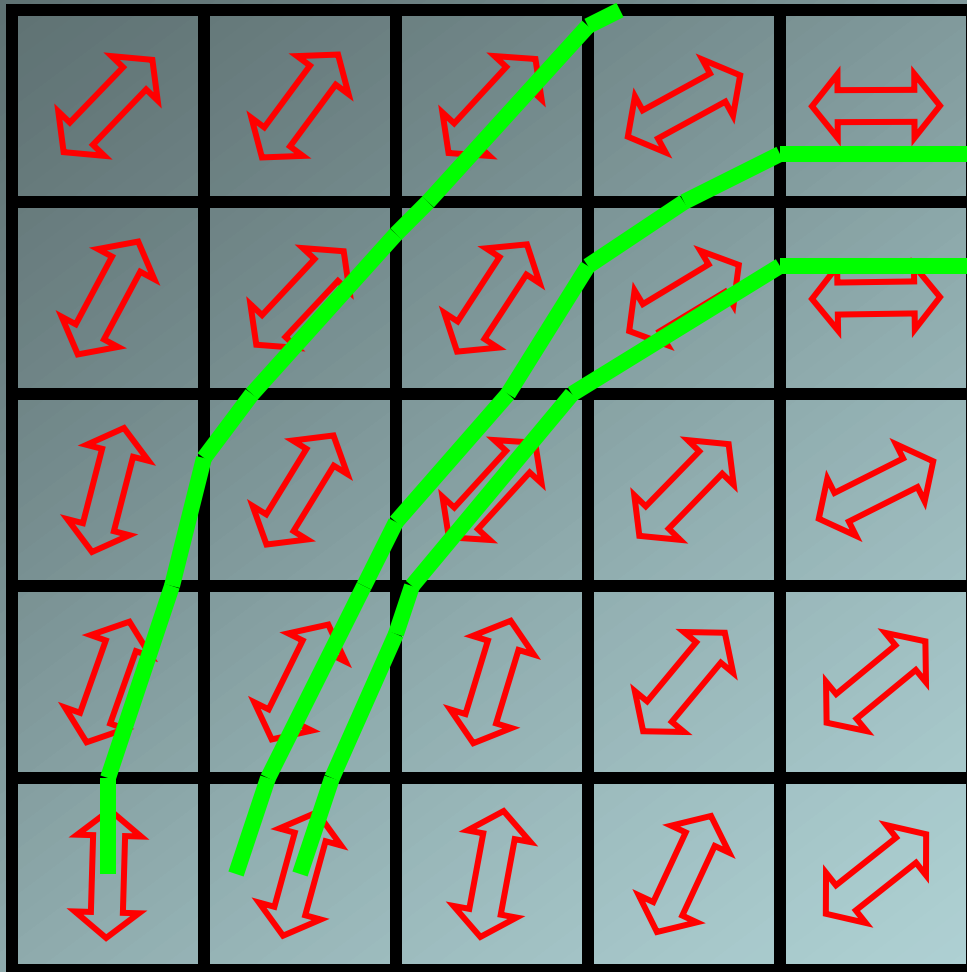
O traçado (tracking) pode ser resolvido pela seguinte integral:


$$\vec{x}(t) = \int_t \vec{e}_1(t) dt$$

Para resolver essa integral, utiliza-se a integração de segunda ordem de Rugen Kutta.



# Ferramenta Aplicacional do DTI – *Fiber Tracking* :



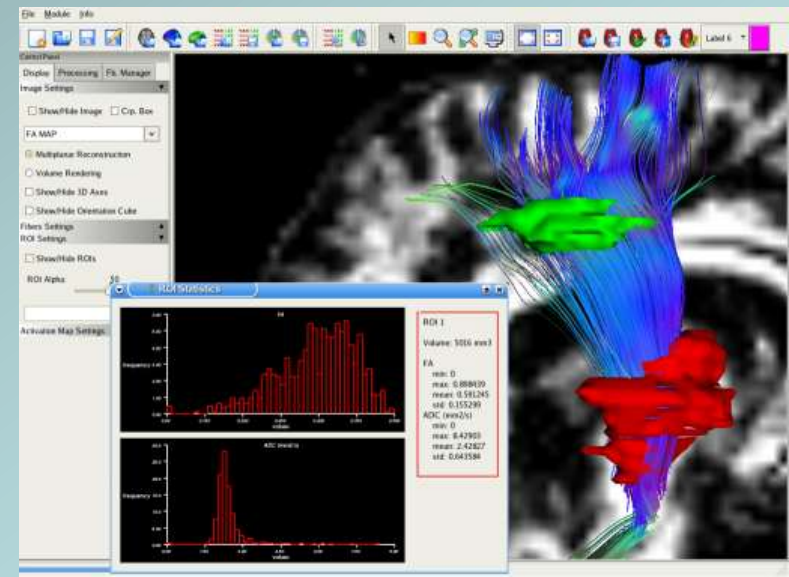
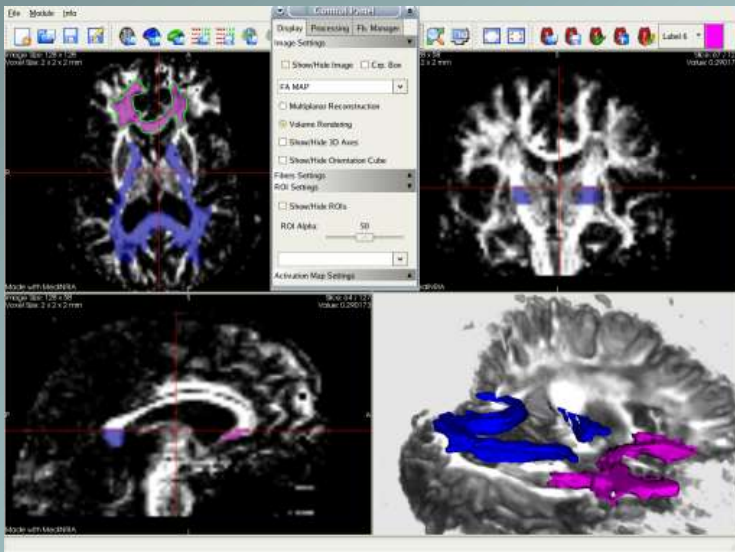
 Direcção da  
difusão principal

# Ferramenta Aplicacional do DTI – *Fiber Tracking, Seed Points (ROI):*

Definição manual do ROI, onde as fibras começam;

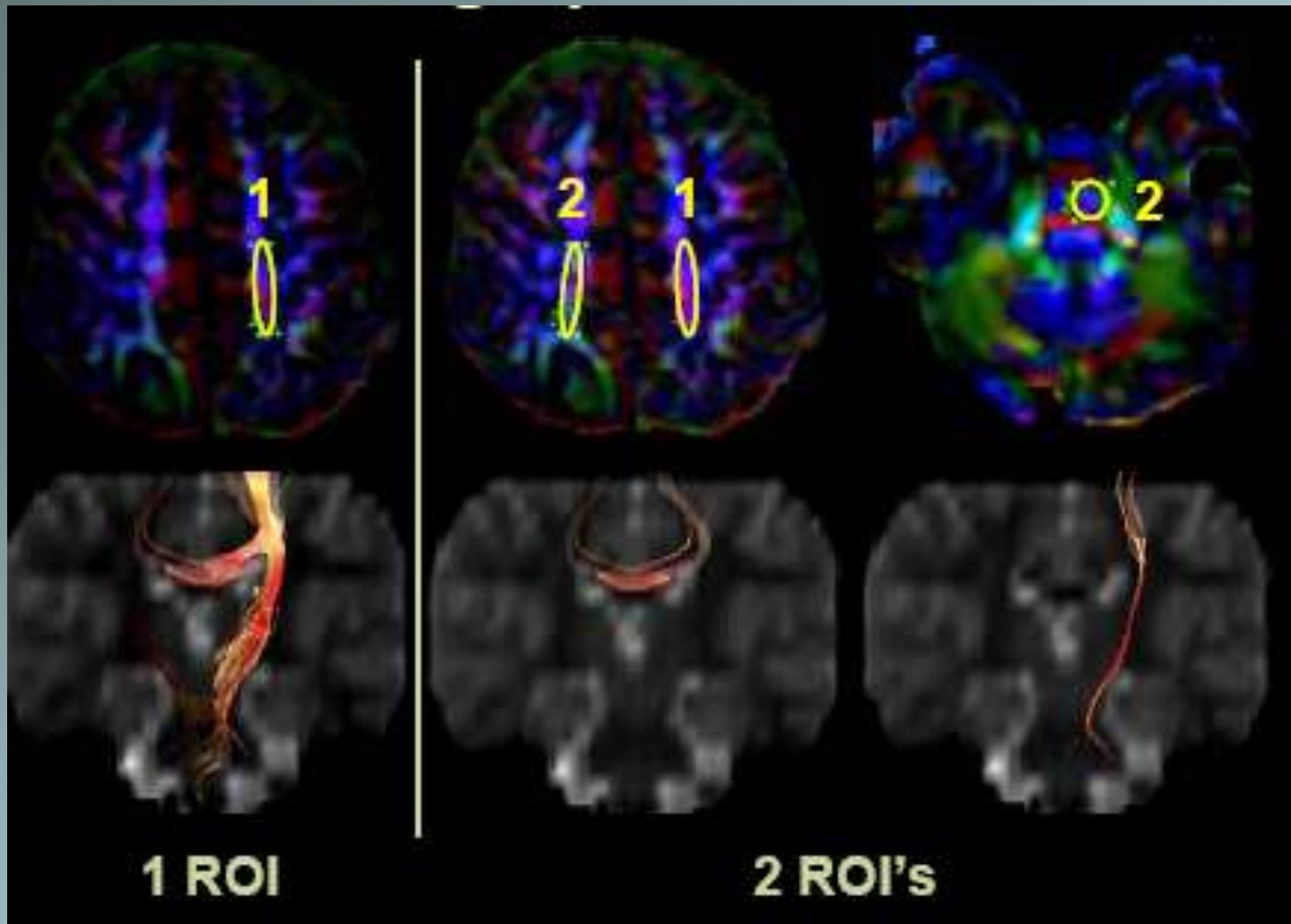
Começo do traçado em todos os vóxeis, conectando-se estes entre si aos vizinhos;

Irão unicamente entrar fibras dos ROI's seleccionados previamente;

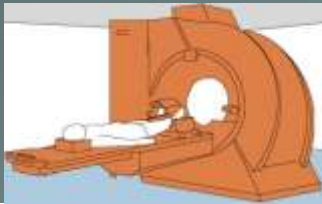




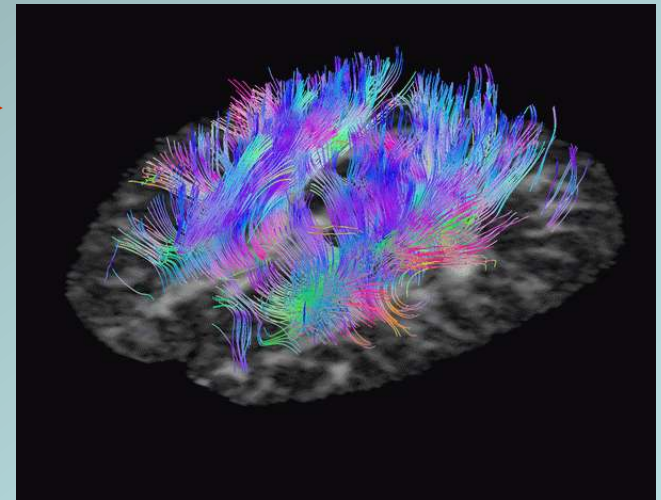
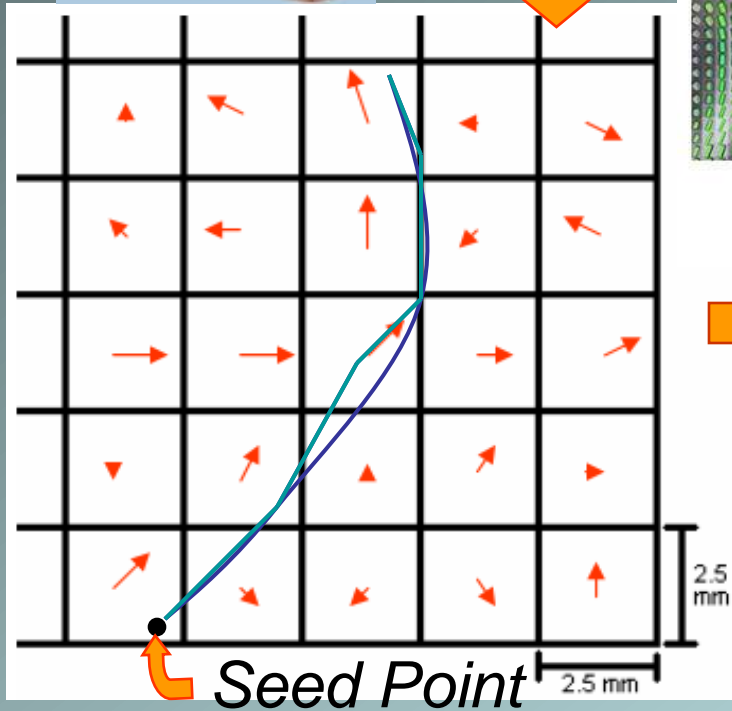
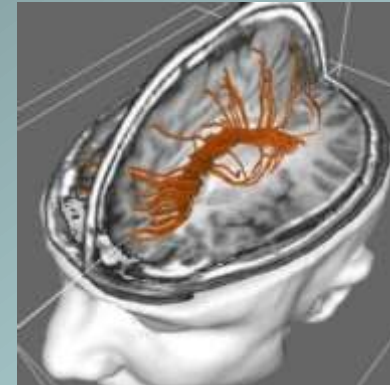
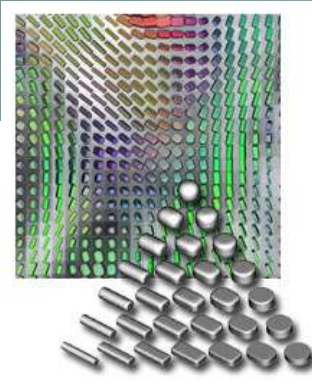
# Ferramenta Aplicacional do DTI – *Fiber Tracking, Seed Points (ROI):*



# Fiber Tracking – Tractografia:



DT-MRI



ROI



# Ferramenta Aplicacional do DTI – *Fiber Tracking* – Tractografia:

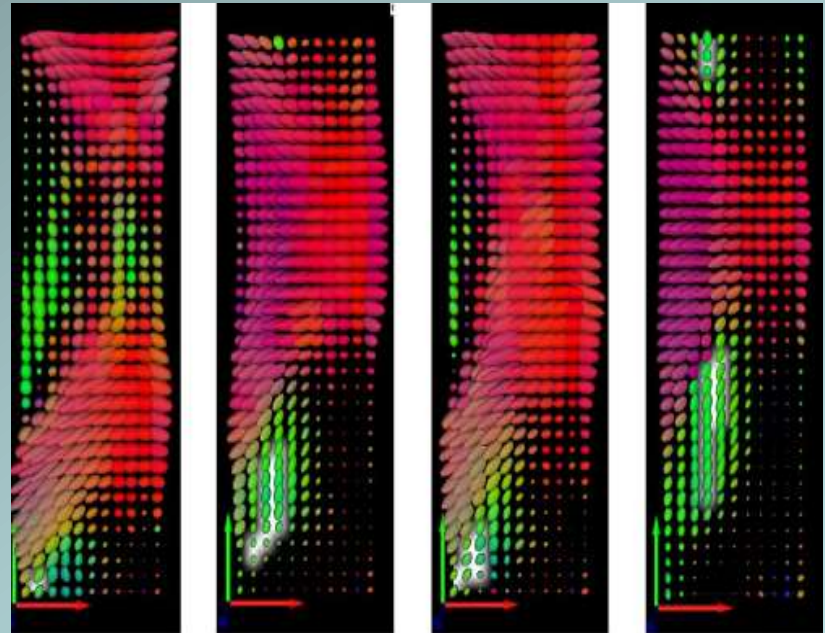
## CRITÉRIOS DE PARAGEM:

Quando a anisotropia é muito baixa



a definição do vector principal da difusão não é definido com clareza (pode-se recorrer à técnica de *thresholding* do FA, por exemplo, “retirando” os valores mais baixos).

Outro critério pode ser a angulação das diferentes fibras Tench *et al.* definem  $10^\circ$  por 1mm no máximo, pois poderá provocar ruído de imagem e volume parcial.



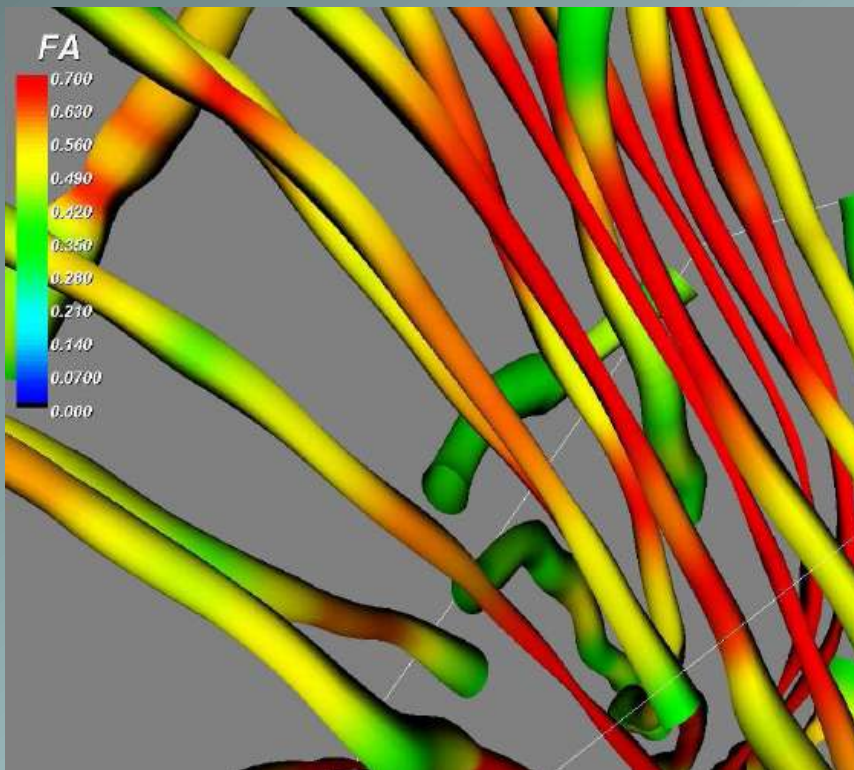
**VOLUME PARCIAL**





# Ferramenta Aplicacional do DTI – *HyperStreamlines* *Tractografia:*

- Extensão do traçado das fibras: também demonstram a direcção dos outros dois vectores e não só o principal.



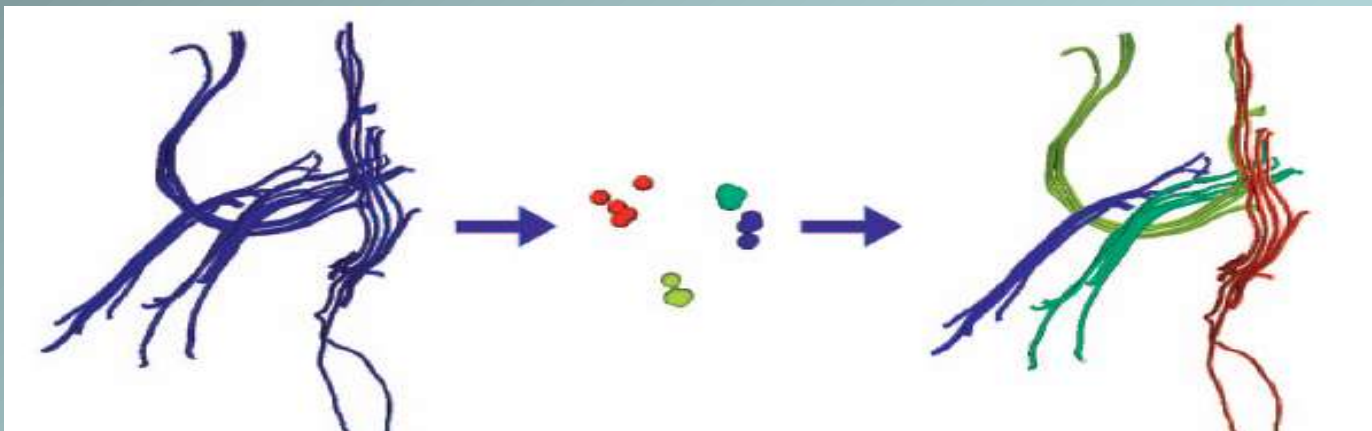
## Codificação de cores segundo FA

Áreas com baixo FA (anisotropia) são mais grossas, enquanto as que têm elevado FA são mais finas.



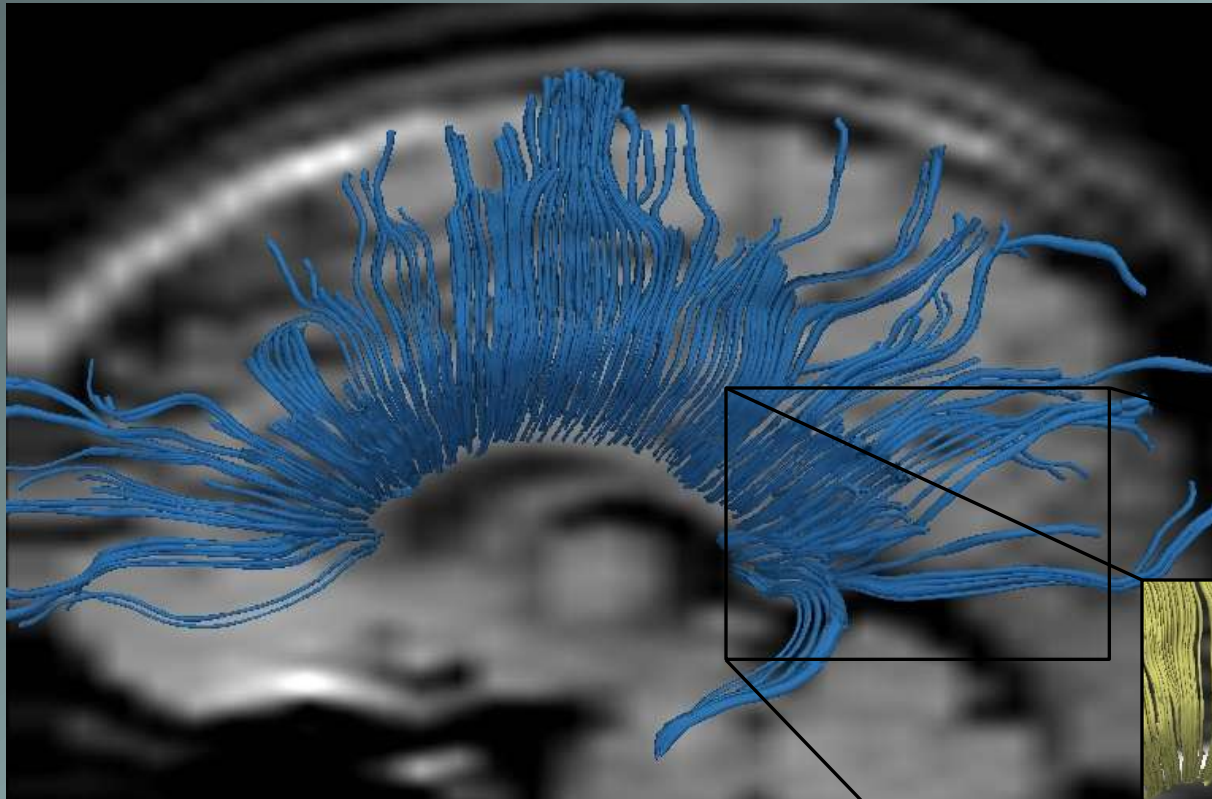
# Clustering das Fibras:

- Técnica de processamento de imagem usado nesta modalidade de imagem, que permite separar determinadas fibras umas das outras, agrupando-as de acordo com a sua similaridade;
- Esta é baseada na forma e posição das fibras;
- Para calcular a similaridade das vias nervosas a distância média entre os vizinhos mais próximos, em termos da direcção de difusão dos vectores e índices escalares, como a FA (“encaixe espectral”).

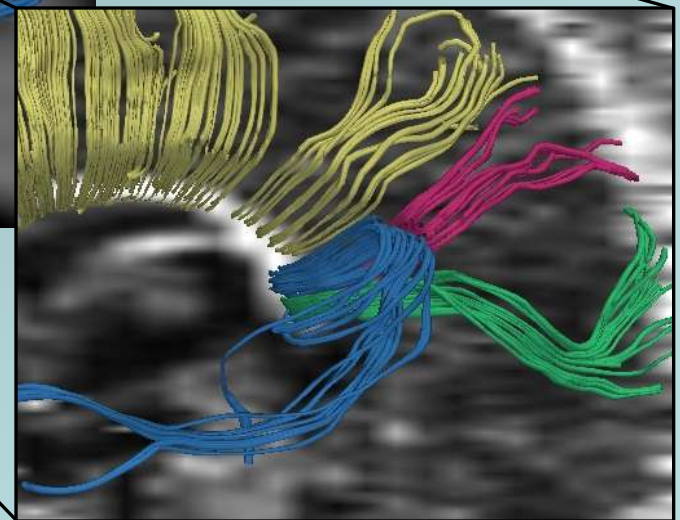


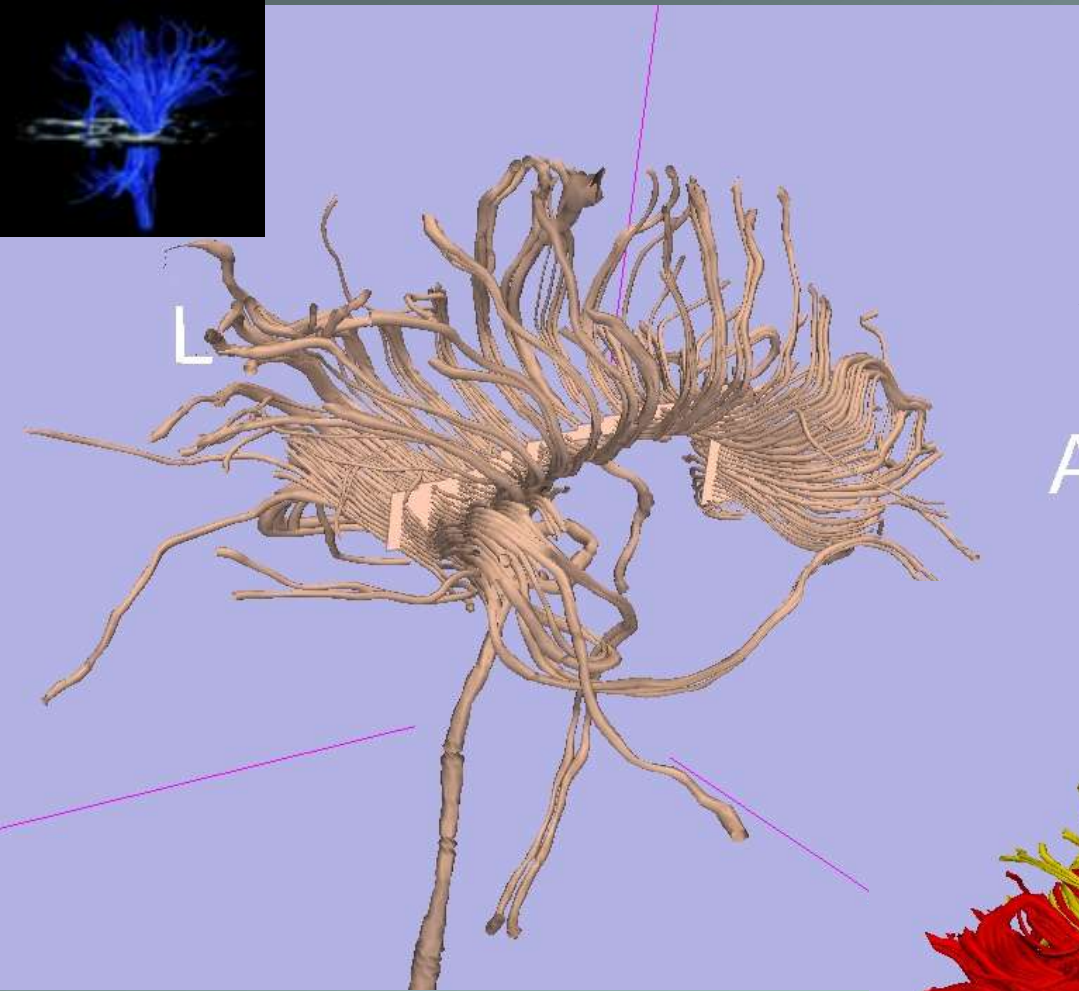


# Clustering das Fibras:



*Ferramentas automáticas (aplicação) separam as fibras com base na sua forma e projecção.*

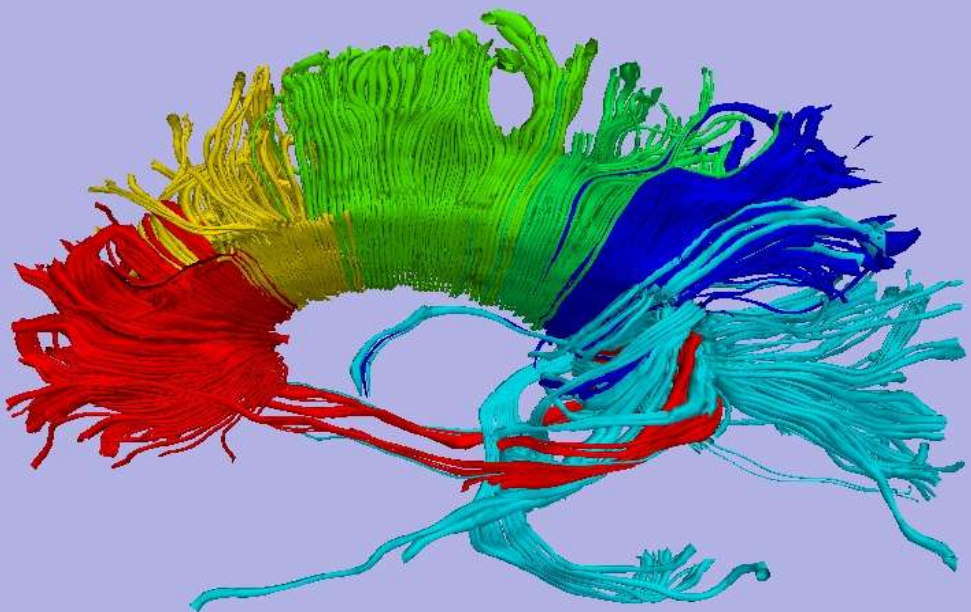


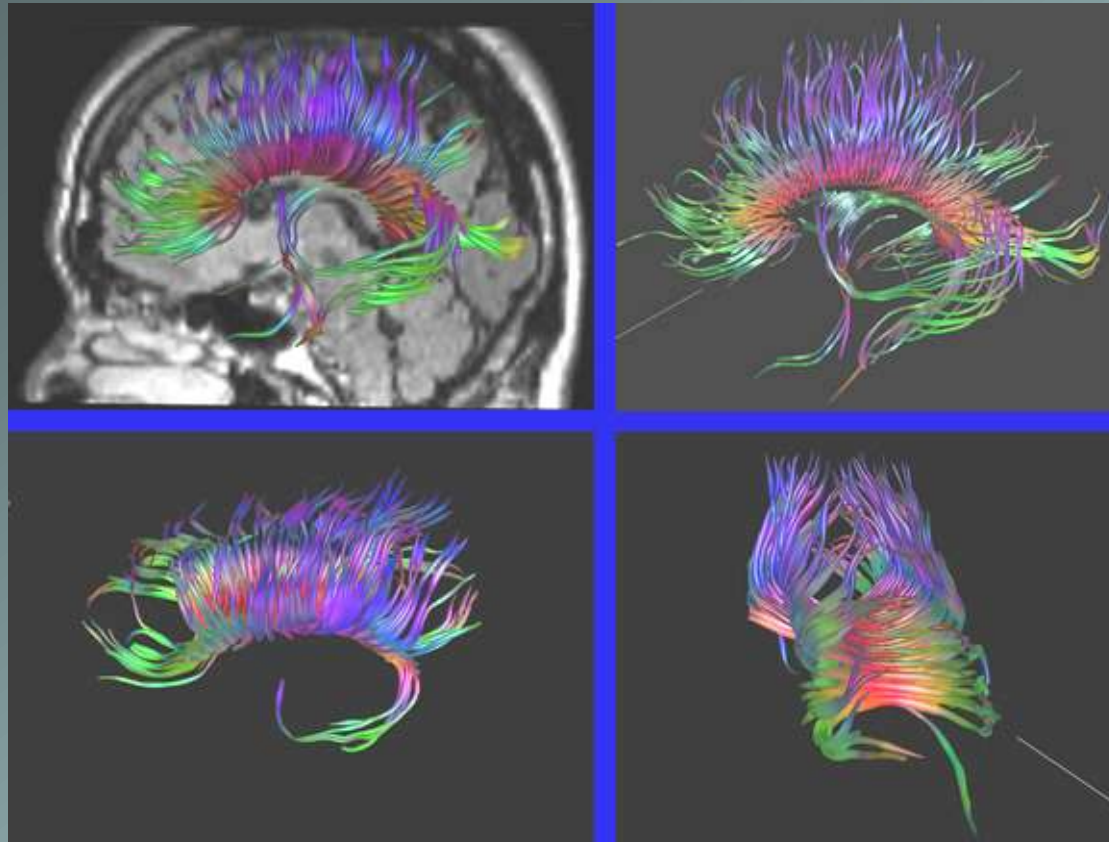


Tractografia  
das Fibras  
*Fiber Tracking*



Clustering das  
Fibras  
*Fiber Clustering*





### **Paciente normal**

As fibras nervosas são representados por faixas de cores, codificado para indicar a direcção da difusão anisotrópica em feixes nervosos:

Vermelho = esquerda para a direita.

Azul = cima para baixo.

Verde = anterior para posterior.



# DTI *Volume Rendering*:

Sub-área da  
computação gráfica.

Gera imagens a partir  
de dados  
volumétricos.

Efectuado através do  
mapa FA: torna  
possível a análise de  
dados, para mostrar  
informações do  
interior dos volumes e  
não apenas das  
superfícies.



# Aplicações:

- Diâmetro e visualização das fibras nervosas cerebrais e sua densidade;
- Estado da mielinização na neurogênese (recém-nascidos);
- Grau de (des)mielinização ao longo da idade e em casos de doença;
- Estudos pré e pós operatórios cerebrais;
- Esclerose Múltipla;
- Desordens psiquiátricas: Esquizofrenia;
- Estudo do miocárdio (músculo cardíaco).



# Aplicações:



Vista superior das  
fibras nervosas  
cerebrais



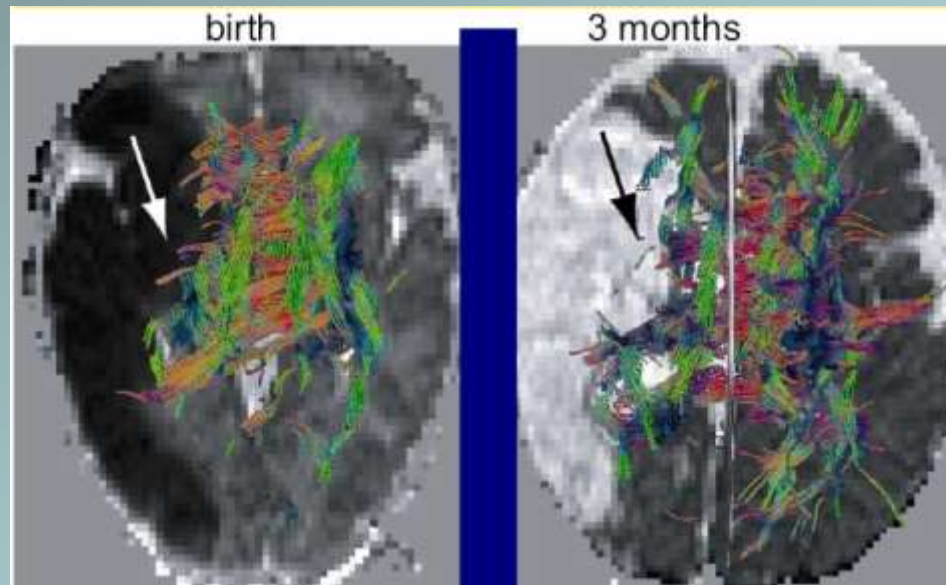
Vista lateral das fibras  
nervosas cerebrais





# Aplicações:

- Recém-nascidos:
  - O aumento da anisotropia verifica-se na substância cinzenta cerebral;
  - A anisotropia diminui progressivamente durante os primeiros meses de vida.



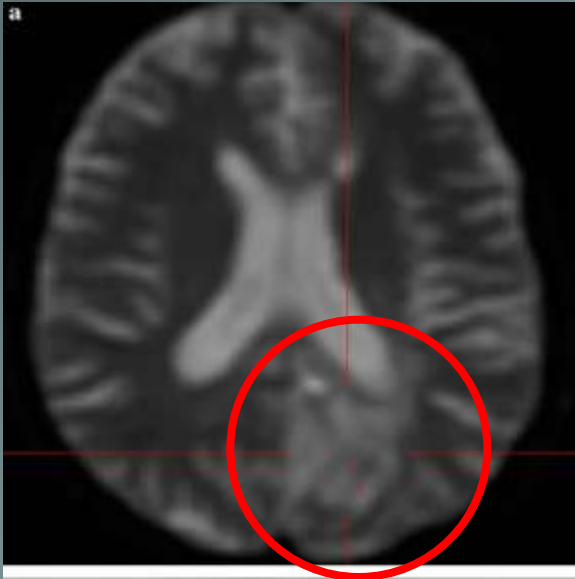


# Aplicações – Tumor Cerebral:

*Oligodendroglioma occipital* ,  
homem com 49 anos.

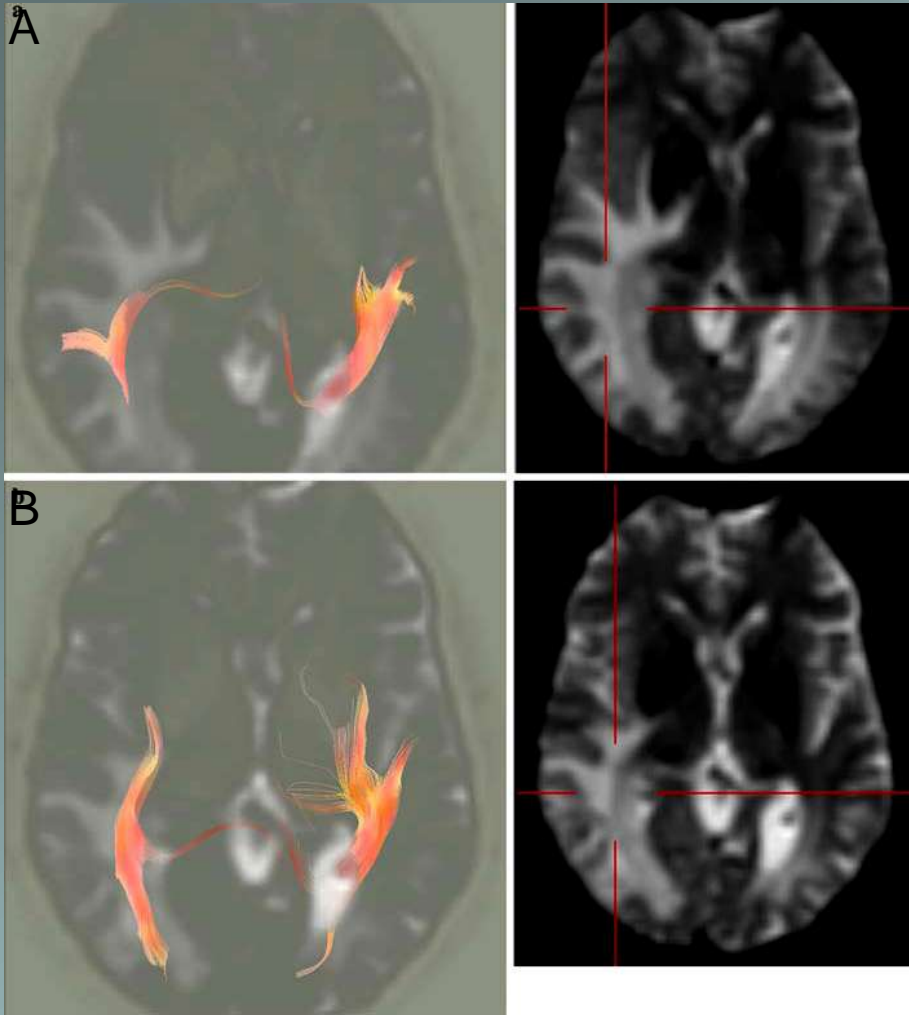
- Imagem superior: hipersinal acentuado no lobo occipital esquerdo correspondente ao oligodendroglioma, com o edema envolvente.

- Imagem Inferior: falta de difusão anisotrópica e reconstrução do tracto das fibras.





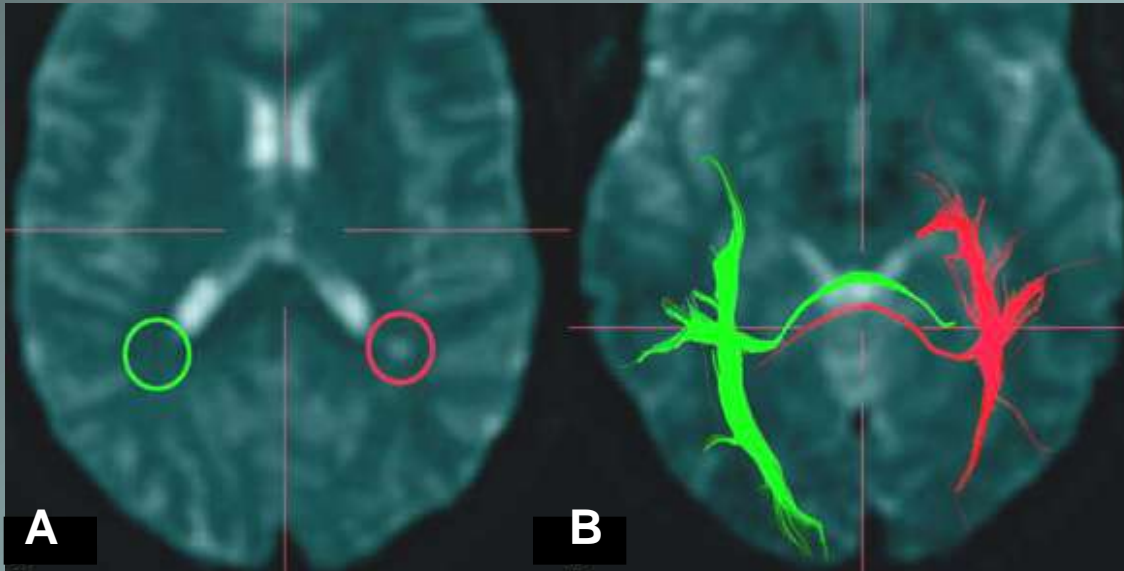
# Aplicações – Metástases Cerebrais:



Recuperação da direcção do tracto das fibras nervosas num homem de 53 anos com metástases occipitais bilaterais antes (a) e após tratamento com quimioterapia (b).



# Aplicações – Esclerose Múltipla:

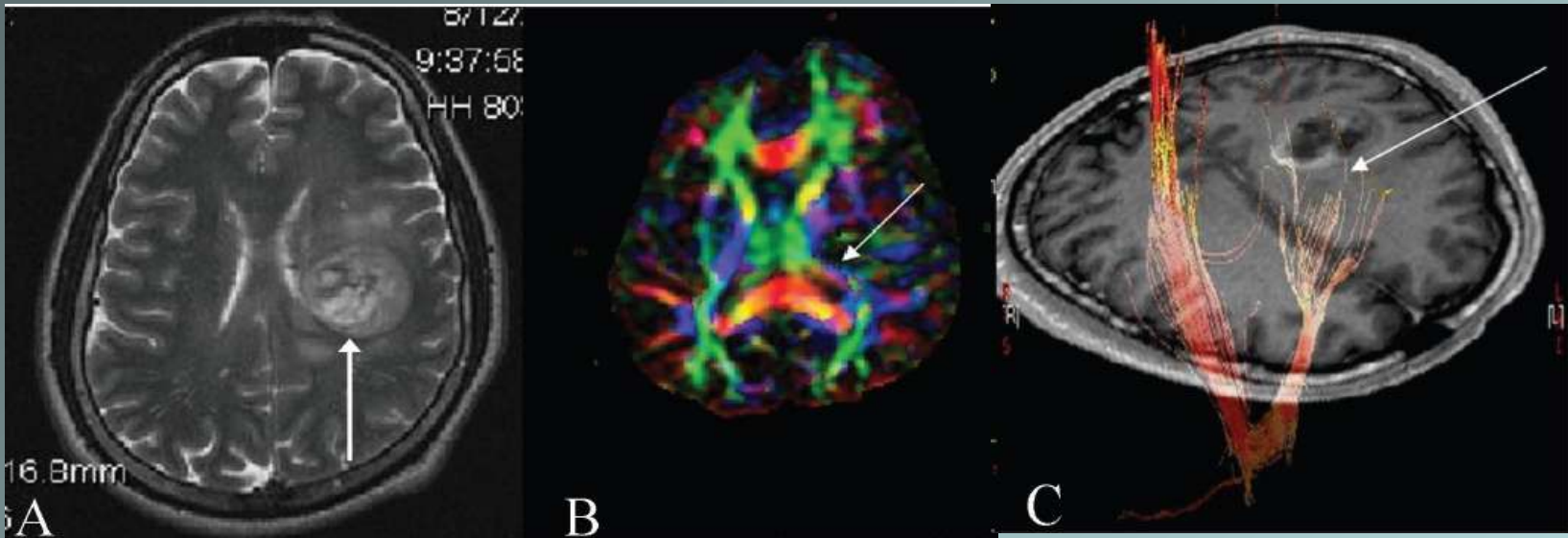


**A** - Círculos correspondem a regiões de interesse onde tem início a reconstrução do tracto da fibra nervosa.

**B** - Sobreposição da reconstrução do tracto das fibras.

Nota: redução da reconstrução do tracto da fibra da substância branca lesada, em especial para conexões visuais occipitais, em comparação com o hemisfério contralateral.

# Aplicações – Tumor Cerebral:



## Paciente com défices neurológicos do lado direito

- A) Imagem anatómica cerebral – visualização de massa tumoral;
- B) Mapa de cores da anisotropia direccional – distorção e coloração alterada (relativamente ao lado contralateral) na região tumoral;
- C) Tractografia 3D sobreposta a uma sequência de imagens 3D – demonstra um *cut-off* das fibras cortico-espinais esquerdas

Ruptura completa do tracto das fibras nervosas (feixe corticoespinal esquerdo), muito bem demonstrado pela Tractografia.



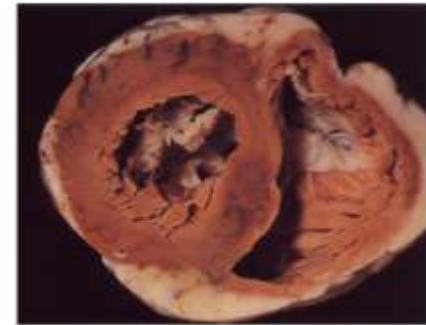
# Aplicações - Miocárdio:

## CORAÇÃO (Miocárdio):

- Em áreas isquêmicas:
  - As paredes do músculo ficam mais finas;
  - Aumento da anisotropia;
  - Orientação das fibras aleatórias.

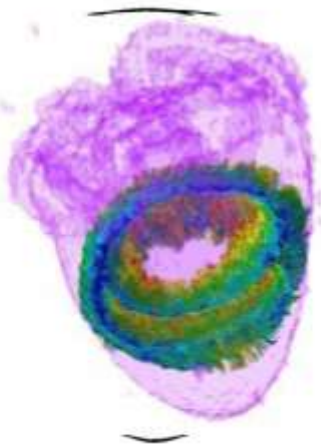


Sagittal section through the heart

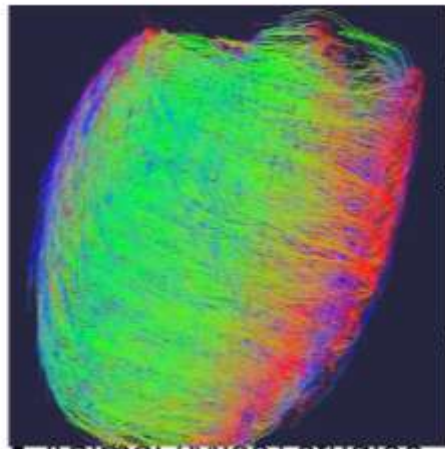


Short-axis section through the heart

[Anderson, 1980]

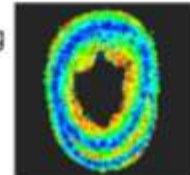


Model of Left Ventricle, depicting helix angle [Bovendeerd, 1992]

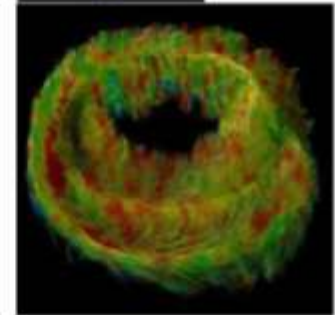
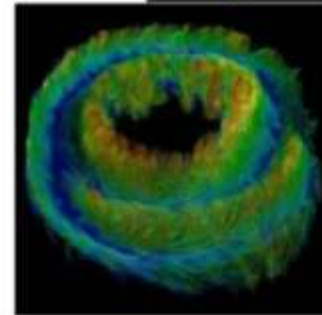
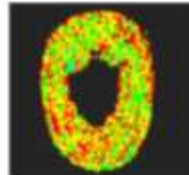


Animal (Mice) studies

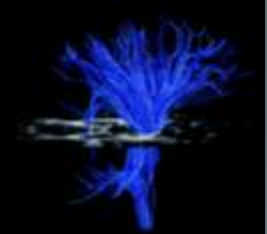
Hue color mapping  
Helix Angle



Hue color mapping  
Fractional Anisotropy



Illuminated lines + Shadows



Amostras



Técnicos  
Matemáticos

Aquisição de dados

Imagens de difusão  
Imagem do tensor de difusão

Aplicações

Anatomia da substância branca

Estrutura Muscular

Aplicações Clínicas

Biólogos  
Médicos  
Neurocientistas



Dados



Números

Computação e visualização

Cientistas computacionais  
Matemáticos

Índices  
escalares

*Tracking*  
*Clustering*

Glyphs



# Conclusões:

- DTI possibilita a visualização detalhada da substância branca cerebral e fibras musculares do miocárdio (mais recentemente);
- Detecção precoce de patologias para delinear um tratamento mais eficaz (eficácia na prática clínica);
- Permite a demonstração de uma variedade de perturbações cerebrais, como a esclerose múltipla e doenças degenerativas;





# Conclusões:

- Melhorias nas técnicas de imagem e seu processamento possibilitam novas formas de analisar imagens de RM, como por exemplo RM funcional;

Human Brain  
fMRI DTI



# Conclusões:

- Maior sensibilidade e especificidade que a imagem de RM convencional para visualização da integridade das fibras nervosas;
- Contribuição para o planeamento de cirurgias em neuro-oncologia e epilepsia;
- Poderá vir a ser uma ferramenta útil na investigação da relação entre estruturas e funções cerebrais;
- Ainda é uma técnica em crescimento e desenvolvimento, tendo de ultrapassar certas limitações, tanto na aquisição como no processamento das imagens, como por exemplo, na angulação das fibras nervosas (para um melhor processamento) e em regiões com baixa anisotropia.



# Um Vídeo...





# Referências Bibliográficas:

- Awate S., Zhang H., A Fuzzy, Nonparametric Segmentation Framework for DTI and MRI Analysis: With Applications to DTI-Tract Extraction, IEEE Transactions Actions on Medical Imaging, Vol.26, No.11, November 2007.
- Basser P., Pajevic S., In Vivo Fiber Tractography Using DT-MRI Data, Magnetic Resonance in Medicine, 44:625-632, 2000;
- Berenschot G., Visualization of Diffusion Tensor Imaging, Eindhoven, 2003;
- Bihan D., Mangin JF, Diffusion Tensor Imaging: Concepts and Applications, Journal of Magnetic Resonance Imaging, 13:536-546, 2001;
- Conturo T., Lori N., Tracking Neuronal fibers pathways in the living human brain, Neurobiology, Applied Physical Sciences, Vol.96, 10422-10427, 1999;
- Field A., Diffusion and Diffusion Tensor Imaging, RSNA Multisection Course VN31, 2007;
- Jellison B., Field A., Diffusion Tensor Imaging of Cerebral White Matter: A Pictorial Review of Physics, Fiber Tract Anatomy, and Tumor Imaging Patterns, American Journal of Neuroradiology, 25:356-369, March 2004.
- O'Donnell LJ, Kubicki M, A Method for Clustering White Matter Fiber Tracks, AJNR 27, May 2006;
- Pierpaoli C., Basser P., Toward a quantitative assessment of diffusion anisotropy, Magnetic Resonance in Medicine, 36:893-906, 1996;
- Vilanova A, Zhang S, Kindlmann G, Laidlaw D, An Introduction to Visualization of Diffusion Tensor Imaging and Its Applications, Eindhoven.
- Westin CF, Maier SE, Image Processing for Diffusion Tensor Magnetic Resonance Imaging, Proceedings of Second Int. Conf. on Medical Image Computing and Computer-assisted Interventions, 441-452, 1999;
- Wiegell M., Larsson H, Fiber Crossing in Human Brain Depicted with Diffusion Tensor Imaging, Radiology, 217:897-903, 2000;