

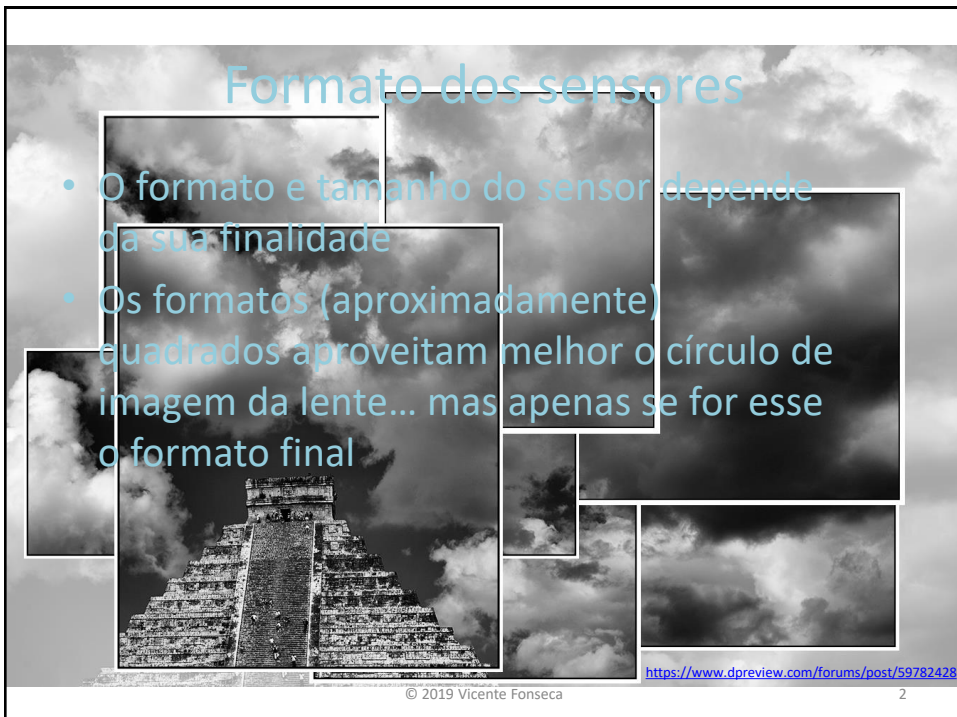
# sensor e ruído

Ótica Aplicada  
para  
Fotografia Digital

Universidade do Minho – 2019-2020

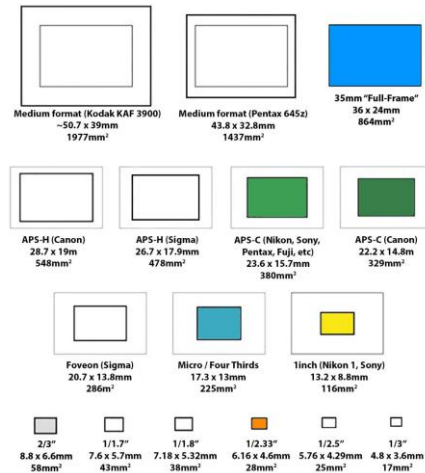
## Formato dos sensores

- O formato e tamanho do sensor depende da sua finalidade
- Os formatos (aproximadamente) quadrados aproveitam melhor o círculo de imagem da lente... mas apenas se for esse o formato final



## Tamanhos dos sensores

- Há uma grande variedade de tamanhos de sensores
- As vantagens e inconvenientes de cada tipo serão melhor compreendidas quando abordarmos a “equivalência” entre tamanhos diferentes de sensores



<https://www.ephotozine.com/article/sensor-size-and-crop-factor-explained-with-sample-photos-17813>

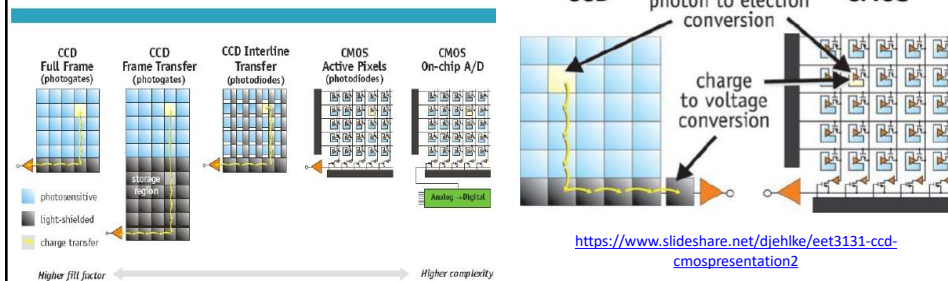
© 2019 Vicente Fonseca

3

## CCD e CMOS

- **CCD:** Charge Coupled Device
- **CMOS:** Complementary Metal Oxide Semiconductor

### CCD versus CMOS



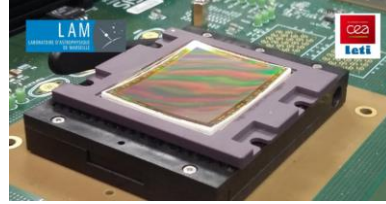
<https://www.slideshare.net/djehike/eet3131-ccd-cmospresentation2>

© 2019 Vicente Fonseca

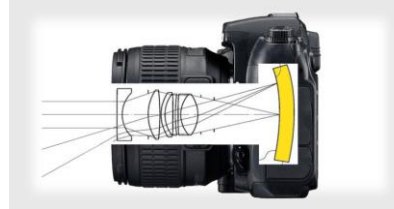
4

## Sensores curvos

- Este tipo de sensores, em desenvolvimento atualmente, pode ser útil para máquinas fotográficas que não trocam de lente
- Para as máquinas fotográficas que trocam lentes poderá não ser tão útil



<https://www.dpreview.com/news/1869782227/cea-leti-has-developed-a-fully-functional-curved-full-frame-image-sensor>



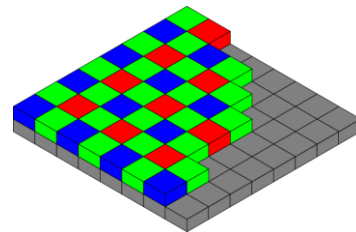
<https://petapixel.com/2017/07/21/nikon-patents-35mm-f2-lens-full-frame-camera-curved-sensor/>

© 2019 Vicente Fonseca

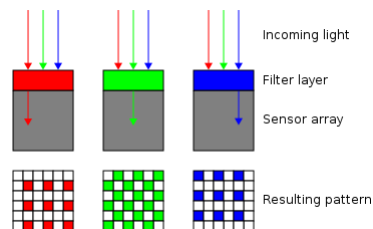
5

## Padrão bayer

- Este é o padrão mais divulgado para detetar cor
- Este padrão é muito regular o que o torna suscetível ao moiré
- Para evitar o moiré usa-se um filtro anti-aliasing que consiste habitualmente em quadruplicar a imagem ligeiramente deslocada para reduzir o detalhe fino da imagem



[https://en.wikipedia.org/wiki/Bayer\\_filter](https://en.wikipedia.org/wiki/Bayer_filter)



© 2019 Vicente Fonseca

6

# Moiré

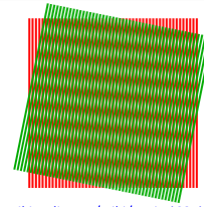
Este é o padrão mais divulgado

Este padrão é muito regular o que o torna suscetível ao moiré

Para evitar o moiré usa-se um filtro anti-aliasing que consiste habitualmente em quadruplicar a imagem ligeiramente deslocada para reduzir o detalhe fino da imagem



<https://petapixel.com/2013/08/29/nikon-patent-shows-onoff-switch-for-anti-aliasing-filter/>



[https://en.wikipedia.org/wiki/Moir%C3%A9\\_pattern](https://en.wikipedia.org/wiki/Moir%C3%A9_pattern)



<https://www.dpreview.com/news/5645755619/sony-a7r-iii-pixel-shift-lifts-a-veil-off-your-landscapes>

© 2019 Vicente Fonseca

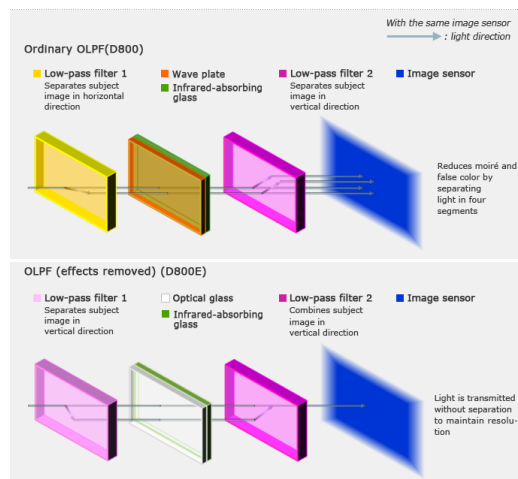
7

# Filtro anti-aliasing

Este tipo de filtro gera quatro imagens transladadas lateralmente o que reduz alguns problemas relacionados com os filtros Bayer e não só.

O assunto foi muito discutido quando Nikon lançou um modelo de câmara com duas versões (com e sem o filtro anti-aliasing).

Ricoh, ex Pentax, simula em algumas câmaras este filtro fazendo vibrar o sensor.



[http://www.nikon.co.id/en\\_id/nikon\\_school/nikon\\_school\\_article?ID=template\\_data/en\\_Asia/taggable\\_content/data/learn\\_and\\_explore/The-D800E&Category=learn-and-explore&Section=nikon-technology/dslr-series](http://www.nikon.co.id/en_id/nikon_school/nikon_school_article?ID=template_data/en_Asia/taggable_content/data/learn_and_explore/The-D800E&Category=learn-and-explore&Section=nikon-technology/dslr-series)

© 2019 Vicente Fonseca

8

## Padrão bayer → filtros

- O sensor Bayer tem o padrão de filtros de cor seguinte:

<https://vimeo.com/103279734>

<https://www.dpreview.com/forums/post/58694212>

- Por cada pixel vermelho há um pixel azul e dois pixéis verdes
- Alguns espectros de filtros Bayer:

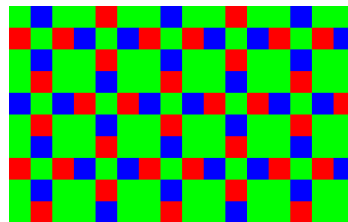
<https://www.dpreview.com/forums/post/60307743>

© 2019 Vicente Fonseca

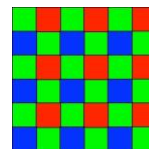
9

## Padrão X-Trans

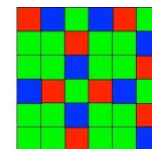
- Este o padrão equipa apenas alguns sensores das câmaras da Fujifilm
- Pretende reduzir o efeito moiré
- Poucos softwares comerciais têm bons algoritmos de demosaicing deste padrão



[https://en.wikipedia.org/wiki/Fujifilm\\_X-Trans\\_sensor](https://en.wikipedia.org/wiki/Fujifilm_X-Trans_sensor)



BAYER



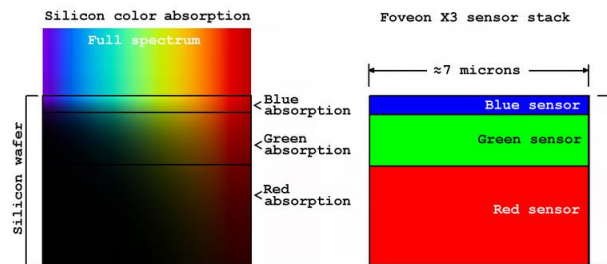
FUJI X-TRANS

© 2019 Vicente Fonseca

10

## Foveon

- É o sistema de captação de cor da Sigma
- É pouco popular
- Tem alguns problemas na definição de cores
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Foveon\\_X3\\_sensor](https://en.wikipedia.org/wiki/Foveon_X3_sensor)



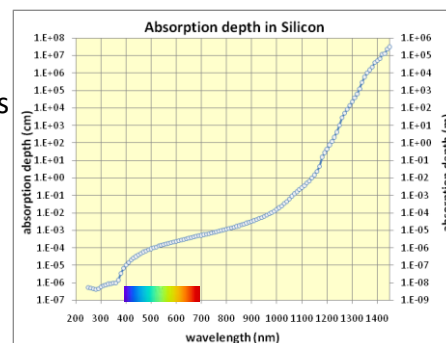
© 2019 Vicente Fonseca

11

## Penetração dos fotões no silício

- A zona do visível vai, sensivelmente, dos 400 aos 700 nm
- O azul penetra menos do que o vermelho
- <http://www.pveducation.org/pvcdrom/materials/optical-properties-of-silicon>

- Nota: este efeito afeta todos os tipos de sensores, dependendo da profundidade da zona que capta a luz

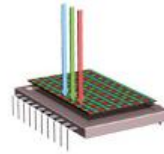


© 2019 Vicente Fonseca

12

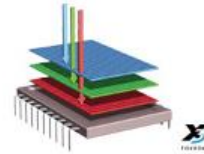
## Comparação Foveon – Bayer, etc.

- 16 MP Bayer capta  
4 MP vermelho  
8 MP verde  
4 MP azul
- 16 MP Foveon capta  
16 MP vermelho  
16 MP verde  
16 MP azul
- Mas a qualidade da informação cromática é inferior no Foveon
- <http://www.foveon.com/article.php?a=67>



Then came digital.

TYPICAL DIGITAL SENSORS have just one layer of pixels and capture only *part* of the color.

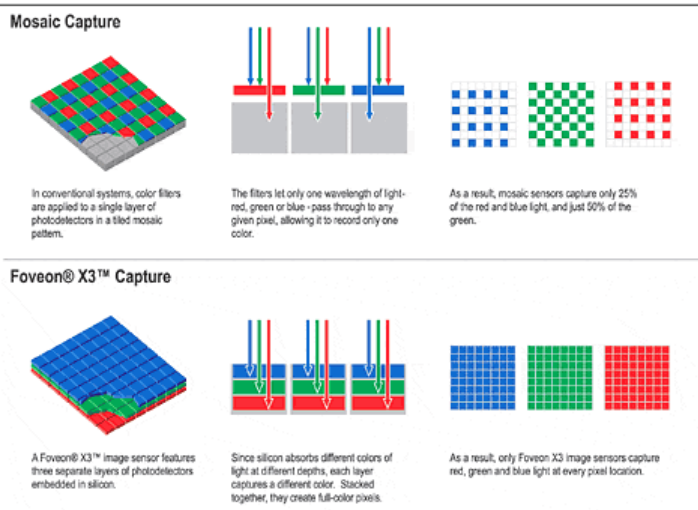


Now there's Foveon X3.

FOVEON X3 direct image sensors have three layers of pixels which directly capture *all* of the color.

## Comparação Foveon – Bayer, etc.

- <https://www.dpreview.com/articles/7559294753/foveonx3>





## Demosaicing

- Corresponde à conversão da informação bruta do sensor (ficheiro RAW) num formato JPG ou similar
- Pode criar artefactos na imagem

Exemplo de moiré:

<http://spie.org/Publications/Proceedings/Paper/10.1117/12.766768>

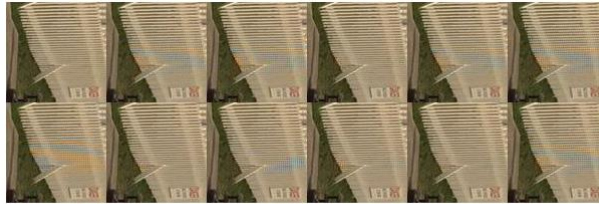


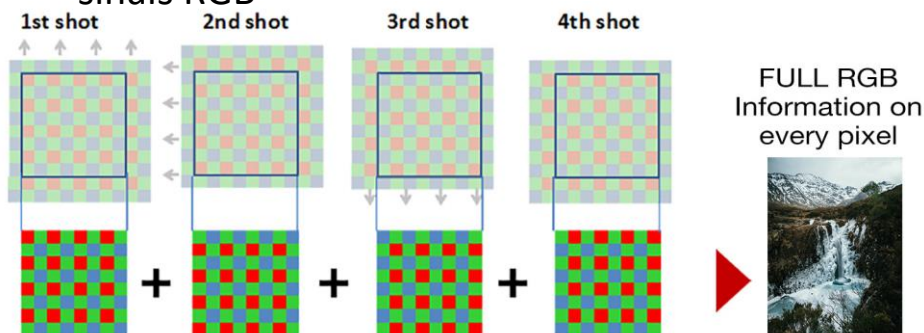
Figure 5. Comparison of fence portion of demosaiced images by different algorithms for *imgS* (lighthouse): top-down and left-right, original, algorithms 1-11 respectively.

© 2019 Vicente Fonseca

15

## Aumentar resolução (evita? Moiré)

- Algumas câmaras (Ricoh, Olympus, etc.) usam o movimento do sensor para captar fotos com maior resolução: cada pixel mede os três sinais RGB



<https://chrisyrewalker.com/the-hi-res-mode-of-the-olympus-om-d-e-m1-mark-ii/>

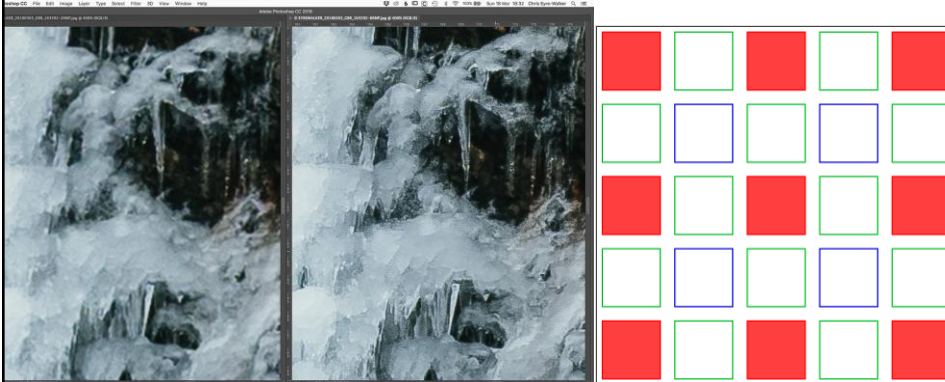
© 2019 Vicente Fonseca

16



## Aumentar resolução (evita? Moiré)

- Algumas câmaras vão mais longe e medem “meios” pixéis:



<https://chrisewalker.com/the-hi-res-mode-of-the-olympus-om-d-e-m1-mark-ii/>

© 2019 Vicente Fonseca

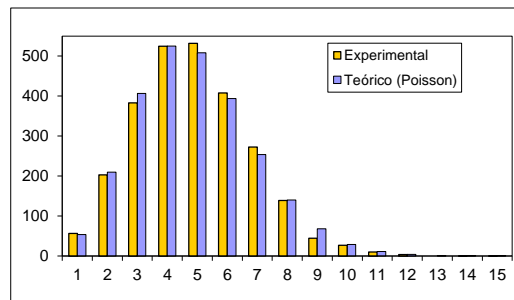
17

## Ruído intrínseco à luz: shot noise

- A cadência a que chegam os fotões ao sensor tem caráter aleatório. Ver animação:

[http://www.gigaphysics.com/gmtube\\_lab.html](http://www.gigaphysics.com/gmtube_lab.html)

- A variabilidade nas contagens devida a essa aleatoriedade chama-se shot noise



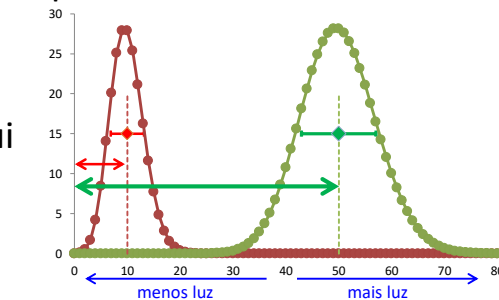
Dados experimentais de partículas alfa emitidas em intervalos de 1/8 de minuto, retirados da referência: Rutherford, Geiger & Bateman, 1910, Phil. Mag. 20, 698-707

© 2019 Vicente Fonseca

18

## Variação do ruído shot noise

- Podemos caracterizar o ruído pela largura a meia altura do histograma
- Quando o valor médio passa de 10 para 50 (cinco vezes mais), o ruído apenas aumenta 2.2 vezes
- O ruído visível é o ruído relativo ao sinal e este diminui quando aumenta a luz captada

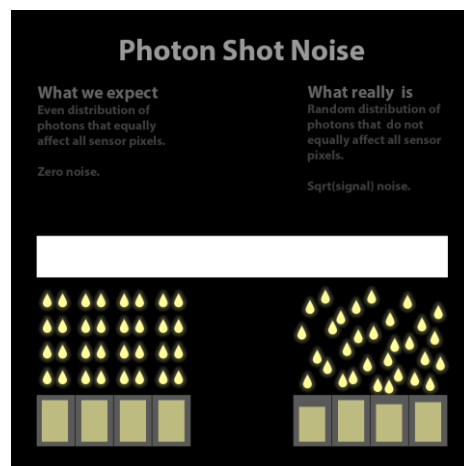


© 2019 Vicente Fonseca

19

## Ruído shot noise numa foto

- À direita mostra-se o resultado de fotografar uma superfície branca uniformemente iluminada: Esperaríamos o mesmo sinal (contagem) em todas as fotocélulas (esquerda) e não é isso que obtemos (direita)

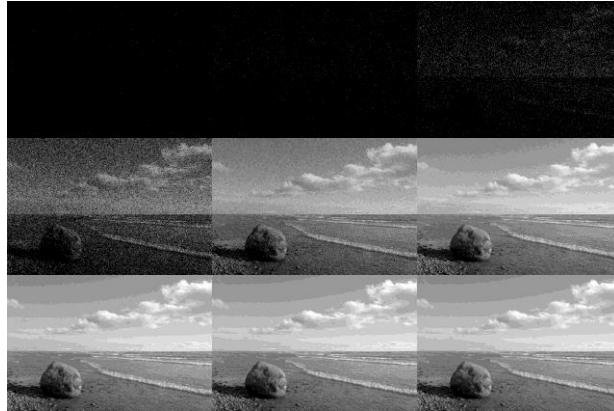

<http://jonista.com/2013/12/17/digital-noise-part-3-what-is-it/>

© 2019 Vicente Fonseca

20

## Efeito do shot noise nas fotografias

- As zonas da foto com pouca luz têm ruído mais visível



[https://en.wikipedia.org/wiki/File:Photon\\_noise.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Photon_noise.jpg)

© 2019 Vicente Fonseca

21

## Shot noise versus “electronic” noise

- A luz que é filtrada por cor e atinge o sensor onde excita eletrões armazenados em condensadores (ruído: **shot noise**) <https://vimeo.com/103279734>
- Em seguida esses eletrões são transferidos, eventualmente amplificados e medidos em ADCs (*Analog to Digital Converter*) (esta operação acrescenta **ruído “eletrónico”**)
- Uma vez em formato digital, o sinal pode ser processado ‘sem’ adicionar ruído

© 2019 Vicente Fonseca

22

## Ruído devido à leitura do sensor

- A conversão do sinal analógico (fotões que chegaram ao sensor e foram convertidos em eletrões) em sinal digital (sinal binário, zeros e uns) também introduz variações (ruído ADC)
- Este ruído soma-se ao shot noise em quadratura:



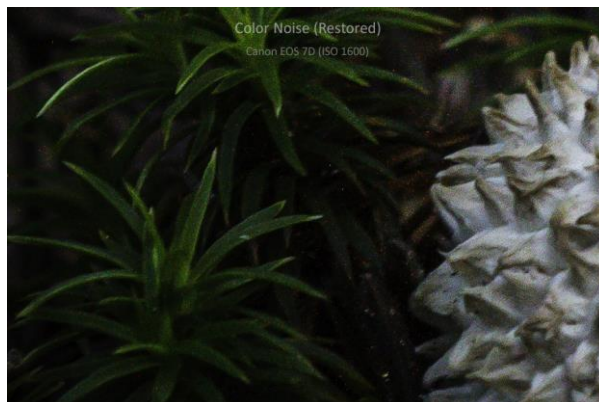
- Pouca luz: predomina o ruído do ADC
- Muita luz: predomina o shot noise

© 2019 Vicente Fonseca

23

## Efeito do ruído nas fotos

- Há diversas fontes de ruído (shot noise, ADC, térmico, padrão, ...)
- O efeito é mais visível nas zonas com pouca luz captada

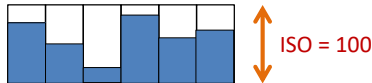

<http://jonista.com/2013/12/17/digital-noise-part-3-what-is-it/>

© 2019 Vicente Fonseca

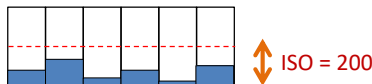
24

## Otimizar o sensor: ISO

- Se a luz captada for suficiente para “encher” o sensor usa-se o ISO de base



- Se a luz captada não “encher” completamente o sensor existe a opção de usar um ISO mais alto: o sistema de conversão A→D é otimizado, reduzindo o ruído por comparação ao ISO mais baixo.



© 2019 Vicente Fonseca

25

## O engano do ISO

- O procedimento muitas vezes inverte-se:
  - O fotógrafo seleciona o ISO à priori
  - A câmara sugere ao fotógrafo quanta luz deve captar (isto é, qual deve ser a exposição) para o sensor não saturar com o ISO escolhido
  - O fotógrafo obedece e tira a foto
- Nas condições acima, as fotos com maior ISO terão maior ruído, não porque o ISO é maior mas porque a exposição (luz captada) foi menor

© 2019 Vicente Fonseca

26

## O engano do ISO

- Uma mesma foto poderá ter zonas com maior ruído e outras com menor ruído. Porquê?
- Se o ruído dependesse do ISO, ele deveria ser igual em toda a foto porque o ISO foi o mesmo para toda a foto
- Contudo verifica-se sempre que as zonas de maior ruído receberam menos luz (menor exposição)

© 2019 Vicente Fonseca

27

## A técnica ETTR para reduzir o ruído

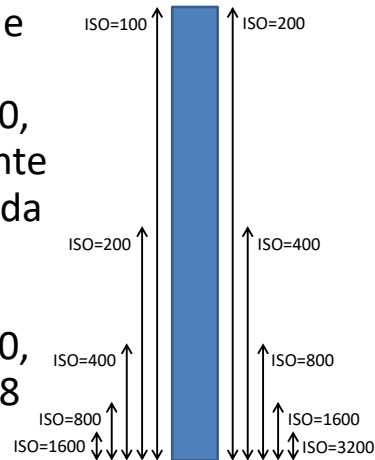
- ETTR (*Exposing To The Right*) é uma técnica (complexa de pôr em prática se levada ao extremo) que tenta maximizar a quantidade de luz captada:
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Exposing\\_to\\_the\\_right](https://en.wikipedia.org/wiki/Exposing_to_the_right)
- Muitos sites discutem a técnica. Exemplo:
- <https://photographylife.com/exposing-to-the-right-explained>
- Problemas práticos:
  - Histogramas não fidedignos do sinal captado
  - Não linearidades do sensor

© 2019 Vicente Fonseca

28

## Escala de ISO

- Um sensor com um ISO de base igual a 100, se seleccionarmos o valor 200, só converterá corretamente fotocélulas cuja luz captada não ultrapasse 50% do valor máximo. Se seleccionarmos o valor 800, converterá apenas até 1/8 do valor máximo, etc.



© 2019 Vicente Fonseca

29

## Relação entre o ISO e o ruído

- Regra geral, para a mesma luz captada, maior ISO => conversor otimizado => menos (ou igual, depende da máquina fotográfica) ruído visível
- Contudo, seleccionando um ISO maior a máquina fotográfica procura captar menos luz (para evitar a saturação) o que resulta numa foto com mais ruído visível
- Conclusão: em geral seleccionam-se maiores ISO quando se capta menos luz. O ruído visível está diretamente relacionado com a luz captada e só indiretamente relacionado com o ISO

© 2019 Vicente Fonseca

30

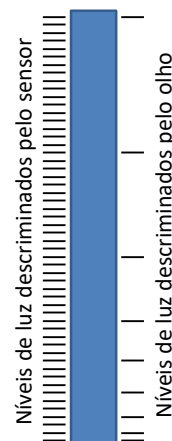


## O site de Emil Martinec

- Um dos melhores sites disponíveis que aborda a origem do ruído em fotografias é:  
<http://theory.uchicago.edu/~ejm/pix/20d/tests/noise/>
- O site, embora escrito de forma clara e com o objetivo de divulgação, está ainda assim a um nível elevado...
- ...Mas não resisti a incluí-lo aqui 😊

## Ficheiro: formatos RAW e JPG

- O sensor tem uma resposta dita linear: deteta igualmente bem um incremento de luz quando há pouca luz como quando há muita luz
- O olho humano não é linear (diz-se que tem uma resposta logarítmica, tal como o ouvido humano): quanto mais luz ambiente, maior o incremento de luz necessário para ser detetável



## Ficheiro: formatos RAW e JPG

- O formato RAW guarda a imagem com todo o detalhe captado pelo sensor
  - ficheiros maiores
- O formato JPG procura guardar apenas os detalhes detetados pelo olho humano
  - deita fora muita da informação captada pelo sensor
  - ficheiros menores

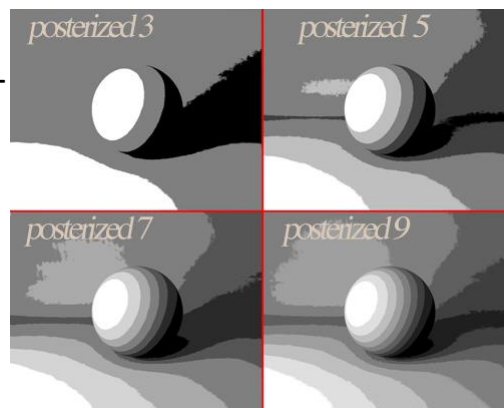
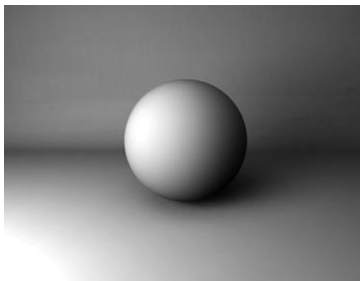
<https://www.dpreview.com/articles/4653441881/bit-depth-is-about-dynamic-range-not-the-number-of-colors-you-get-to-capture>

© 2019 Vicente Fonseca

33

## Posterização

- Resulta dos níveis digitais serem discretos
- Com degraus suficientemente pequenos não é visível



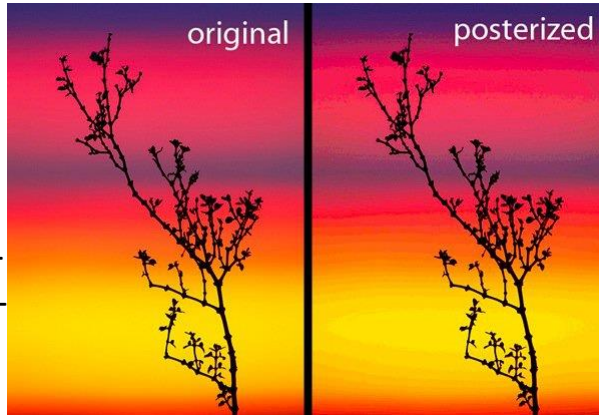
<http://www.wetcanvas.com/forums/showthread.php?t=866372>

© 2019 Vicente Fonseca

34

## Posterização

- É mais evidente em zonas da fotografia com gradientes mais suaves
- Exemplo: céu
- Pode resultar do tratamento de ficheiros jpg



original

posterized

<http://digital-photography-school.com/16-bit-vs-32-bit-vs-64-bit-what-does-it-all-mean/>

© 2019 Vicente Fonseca

35

## Gama dinâmica

- A separação em stops entre o máximo de luz capturada sem saturar e o menor incremento de luz detetável pelo sensor é chamado gama dinâmica.


[https://en.wikipedia.org/wiki/High-dynamic-range\\_imaging#Example](https://en.wikipedia.org/wiki/High-dynamic-range_imaging#Example)

© 2019 Vicente Fonseca

36

## Gama dinâmica

- Quando o sensor não consegue captar toda a imagem, é possível combinar várias imagens  
Exemplo a partir das quatro imagens anteriores:



© 2019 Vicente Fonseca

37

## Gama dinâmica

- A gama dinâmica dos sensores das máquinas fotográficas atuais varia entre menos de 10 stops e 14 ou mais stops (o valor também depende da forma como for definido)
- Mesmo assim, em fotos de paisagem contendo céu e terra, fotos noturnas, fotos incluindo fontes de luz (por exemplo, o sol), etc., as máquinas fotográficas não conseguem captar toda a gama dinâmica

© 2019 Vicente Fonseca

38