

Resum

El present projecte pretén presentar una alternativa als actuals mètodes de comprovació qualitatiu i quantitatiu de les instal·lacions lumíniques.

Aquesta alternativa té l'objecte de ser més assequible tant a nivell econòmic com a nivell d'especialització de l'operari. La intenció és dissenyar un procés mitjançant el qual es pugui determinar si la il·luminació és suficient (segons normativa) o no. La dificultat rau en que, per tal de disminuir-ne la inversió inicial, es vol migrar de la utilització del luxímetre o de les diferents tipologies de càmeres reglades cap a càmeres comercials. Així mateix, el procés s'automatitzarà en la mesura del possible plantejant una interfície intuïtiva per tal d'apropar-lo a un usuari de perfil tècnic baix.

El procés que es pretén seguir consisteix, a partir d'una imatge en HDR (High Dynamic Range) en processar-la, per una banda, per tal d'extreure'n un mapa lumínic de la mateixa (mitjançant un programa inclòs al projecte i el corresponent motor de càlcul); mentre que per una altra banda, es sotmet a un programa de segmentació d'imatges (també desenvolupat internament al projecte) per tal de diferenciar quins polígons de la imatge representen calçades, voreres, façanes, etc. Creuant ambdós resultats, es procedirà a discernir els nivells d'il·luminació de cadascuna de les parts en què resulti dividida la imatge per facilitar que, a posteriori, l'usuari determini si es tracta d'un carrer correctament il·luminat o no (sempre prenent com a criteri la normativa vigent).

El resultat del projecte és un programa a mode d'interfície gràfica que permet obtenir, mitjançant certs processos computacionals, d'una banda, un mapa de luminàncies i, de l'altra, una imatge segmentada. A la imatge segmentada es pretén que cadascuna de les seves parts inclogui certa informació rellevant per tal de facilitar a tot aquell usuari interessat l'accés a dades diverses de cada imatge tractada (candeles per metre quadrat a cadascuna de les superfícies diferenciades, mesura mitjana, mesura mínima, etc.).

Sumari

RESUM	1
SUMARI	3
1. GLOSSARI	5
2. PREFACI	7
2.1. Origen del projecte	7
2.2. Motivació	7
2.3. Requeriments previs	8
3. INTRODUCCIÓ	9
3.1. Objectius del projecte	9
3.2. Abast del projecte	9
4. MÈTODES ACTUALS DE MESURA VIAL	11
4.1. Anàlisi de requeriments tècnics i normatius	11
4.2. Mètodes de mesura actuals	11
5. ESTAT DE LA TÈCNICA	17
5.1. Mapa de luminàncies	17
5.1.1. Definició prèvia	17
5.1.2. Nocions fotogràfiques	18
5.1.3. Principis físics comuns	21
5.1.4. Funció inversa	22
5.1.5. Mètodes per a la recuperació de la funció inversa	22
5.2. Segmentació de la imatge	24
5.2.1. Mètodes de segmentació de la imatge	26
6. DETERMINACIÓ D'EINES UTILITZADES	37
6.1. Mapa de luminàncies	37
6.1.1. Procés	37
6.1.2. Instrumental	41
6.1.3. Determinació de la corba de resposta per recuperar les luminàncies	45
6.2. Segmentació de la imatge	49
7. METODOLOGIA PROPOSADA	51
7.1. Mapa de luminàncies	51
7.2. Segmentació de la imatge	53

7.2.1.	Creació de la imatge texturitzada	53
7.2.2.	Creació de la imatge segmentada	56
7.3.	Determinació dels valors lumínics d'anàlisi	58
8.	RESULTATS OBTINGUTS DE L'APLICACIÓ DEL MÈTODE _____	61
8.1.	Determinació de la corba resposta de la càmera fotogràfica.....	61
8.1.1.	Ajust corba resposta per a escenes amb llum groga	61
8.1.2.	Ajust corba resposta per a escenes amb llum blanca	66
8.2.	Segmentació de la imatge	71
8.2.1.	Bondat de la segmentació d'imatges il·luminades amb llum blanca	72
8.2.2.	Bondat de la segmentació d'imatges il·luminades amb llum groga.....	75
8.2.3.	Conclusió conjunta	77
9.	APLICACIÓ GENERAL A L'ENLLUMENAT PÚBLIC. VIABILITAT TÈCNICA _____	79
9.1.	Metodologia proposada	79
9.2.	Avantatges i inconvenients	82
9.3.	Aplicació econòmica	83
10.	PRESSUPOST _____	87
11.	IMPACTE MEDIAMBIENTAL _____	91
12.	FUTURES VIES D'ACTUACIÓ RECOMANADES _____	95
12.1.	Manteniment	95
12.2.	Ampliació	95
BIBLIOGRAFIA	_____	97
	Referències bibliogràfiques.....	97

1. Glossari

GPS: Global Positioning System. Sistema global de navegació per satèl·lit que permet determinar la posició al món de quelcom mitjançant la triangulació. Es parteix de les dades de la distància de la posició a un conjunt de satèl·lits (mínim tres) en xarxa.

HDR: High Dynamic Range. Conjunt de tècniques que permeten un millor rang dinàmic de luminàncies entre les zones més clares i les més fosques d'una imatge del que les tècniques d'imatge digital estàndard permeten. Els dos principals orígens de les imatges en HDR són els renderitzats per ordinador i la mescla de múltiples fotografies que són conegudes com fotografies de baix rang dinàmic (LDR) o bé de rang dinàmic estàndard (SDR).

LDR: Low Dynamic Range. Cadascuna de les imatges de baix rang dinàmic que es fan servir per a elaborar una imatge en HDR.

SDR: Estándar Dynamic Range. Cadascuna de les imatges de baix rang dinàmic que es fan servir per a elaborar una imatge en HDR.

Candela (cd) : Una de les unitats bàsiques del Sistema Internacional (SI) d'intensitat lluminosa. Es defineix com la intensitat lluminosa en una direcció donada , d'una font que emet una radiació monocromàtica de freqüència $540 \cdot 10^{12}$ hertz i de la qual la intensitat radiada en aquesta direcció és d'1/683 Watts per estereoradiant.

Estereoradiant (srad) : Es defineix en referència a una esfera de radi r . Si l'àrea de closca d'una porció d'aquesta esfera és de r^2 , un estereoradiant és l'angle sòlid comprès entre aquesta porció de closca i el centre de l'esfera.

CCD: Charge-Coupled Device. Sensor amb diminutes cèl·lules fotovoltaïques que enregistren la imatge a una càmera fotogràfica digital.

CIELAB: Es tracta d'un espai de components dels colors amb dimensions L per lluminositat i a i b per a les dimensions dels components color. Es basa en comprimir no linealment les coordenades espacials de l'espai color CIE XYZ.

Braketing: En fotografia, tècnica consistent en la presa de varies imatges variant entre cadascuna d'elles paràmetres de l'exposició.

2. Prefaci

2.1. Origen del projecte

La idea original del projecte sorgeix de l'escassetat d'eines per a la comunitat tècnica a l'hora de mesurar la luminància, el cost prohibitiu de les eines existents i l'elevat nivell de coneixement que requereix per part de l'usuari.

Afortunadament, la societat s'està conscienciant de la importància de la il·luminació urbana en multitud d'àmbits i la comunitat tècnica ho reflexa en esforços per fer més assequibles les diferents eines de mesura a un ventall cada cop més ampli de ciutadans.

Un exemple clar és la pàgina web[1] que ha estat la inspiració inicial d'aquest estudi i que permet la elaboració de mapes lumínics a usuaris amb perfils tècnics baixos.

Aquest projecte va un pas més enllà plantejant la idea de que el procés no finalitza amb la generació del mapa de luminàncies. Les dades que s'hi plasmen s'han de gestionar, sotmetent-les a lectures de zones determinades i càlculs específics, a fi d'obtenir dades concretes aplicables a l'hora d'extreure'n conclusions vàlides i útils. Per això s'ha considerat que la segmentació de la imatge aporta un valor afegit important facilitant la lectura de les dades i els càlculs que s'han de dur a terme a partir del mapa de luminàncies.

2.2. Motivació

Aquest projecte pren origen en la necessitat de reduir tant costos econòmics (passant de fer servir un luminancímetre a una càmera fotogràfica) com costos d'oportunitat (passant de necessitar a un tècnic de perfil alt a un operari format). Cal esmentar la motivació extra que comporta el present projecte i que radica en el desenvolupament d'un producte tan característic com pot ser un software, la qual cosa es fa palesa a l'hora de desenvolupar una interfície gràfica adient per l'usuari operari.

2.3. Requeriments previs

Els requisits que han de complir, en termes generals, les fotografies per poder ser sotmeses a tractament són les següents: que el format del fitxer sigui HDR, que la imatge s'hagi captat amb la càmera fotogràfica per a la qual s'ha plantejat l'estudi, que els paràmetres de la càmera s'hagin fixat en consonància amb la descripció que es durà a terme més endavant i, és igualment important, que les imatges en LDR siguin el més semblants possible i que en cap d'elles hi aparegui cap tipus de llum intrusa que no es vulgui mesurar.

Ja que l'interès del projecte rau a la seva aplicació sobre zones urbanes, les escenes que es prendran al llarg del treball de camp per tal de conformar la base de dades pertinent, han de respondre a la mateixa tipologia. El factors a tenir en compte a l'hora de classificar les escenes són tals com el nivell d'urbanització, geometria, nivell d'il·luminació, etc.

3. Introducció

3.1. Objectius del projecte

L'objectiu del present projecte és el de dotar els operaris, encarregats de la comprovació dels nivells lumínics urbans, d'una eina que permeti obtenir mapes de luminàncies i les dades dels nivells d'il·luminació de manera estructurada i que en faciliti la seva assimilació i estudi. El motor computacional que farà servir aquesta eina es desenvoluparà per complert al marc d'aquest projecte.

Això s'aconseguirà substituint el mètode dels nou punts per mapes de luminàncies a l'hora de mesurar les candeles per metre quadrat que il·luminen els carrers. L'objectiu és que resulti aplicable a una auditoria a nivell municipal, és per això que també s'estudiarà, de manera general, la viabilitat d'implementació en un municipi de mida mitjana.

3.2. Abast del projecte

L'eina que s'obtindrà com a resultat permetrà la mesura dels nivells d'il·luminació urbans en candeles per metre quadrat.

El projecte inclou una sèrie de mesures de camp per donar lloc a una base de dades sobre la que treballar. A partir de la mateixa, es desenvoluparà un sistema de computació que permeti traduir els valors dels píxels en RGB en valors de luminància en candeles per metre quadrat. Amb aquest objectiu es definiran les variables explicatives adients. A més, es prepararà la segmentació de la imatge a fi d'automatitzar, en la mesura del possible, la síntesi de la informació obtinguda.

Donada l'aplicació municipal i urbanística del programari es contrau el compromís de realitzar tot l'estudi parant especial cura a la tipologia d'enllumenat i la banda de l'espectre lluminós que ocupi.

La totalitat del programari que es generi com a producte de l'estudi ha de poder-se executar localment a qualsevol ordinador, independentment de si es troba connectat a internet o a una xarxa. D'aquesta manera el sistema serà autònom i aplicable a un major nombre d'escenaris.

Aquest projecte no contempla dins del seu abast la formació de les imatges en format HDR, a tal efecte existeix gran diversitat de programari a l'abast de qualsevol internauta i s'ha considerat que és un aspecte amb manca d'interès acadèmic.

S'exclou també del projecte la generació de mapes geogràfics on situar els resultats mitjançant la geolocalització de les imatges present en alguns dels programes comercials especialitzats. Donada aquesta exclusió, tampoc no es fa necessari cap codi d'interpolació amb l'objectiu d'aconseguir dades de les zones de difícil accés mitjançant processos d'interpolació.

Els estudis de mercat pel que fa a la càmera fotogràfica i luminancímetres, així com el desenvolupament d'un mètode de fixació de la mateixa que eviti les vibracions i la geolocalització de les imatges es consideren fora de l'abast del projecte actual.

4. Mètodes actuals de mesura vial

4.1. Anàlisi de requeriments tècnics i normatius

Atès que l'eina que s'està projectant té com a objectiu específic la mesura de la il·luminació urbana nocturna, per tal d'adequar-la a la normativa alhora que generi un estalvi energètic augmentant-ne l'eficiència, és adient un anàlisi previ de la normativa vigent al respecte.

La normativa que regeix la il·luminació en les vies públiques dels nuclis urbans és el Reial Decret 1890/2008[2] i les instruccions tècniques que el complementen són de la ITC EA-01 a la 07[3]. Pel que fa a la mesura de il·luminàncies, en aquest document es descriu el mètode dels nou punts, que es descriu en detall al següent apartat. Al document, el requeriment de rigor més restrictiu de les mesures fetes servir és que l'error relatiu que presentin ha de ser menor als cinc punts percentuals.

Per tant, normativament, el Reial Decret descriu dues condicions que ha de complir el sistema que s'està dissenyant: d'una banda que l'error relatiu sigui menor al cinc per cent i de l'altra que s'ha de fer servir una retícula de mesura de com a mínim nou punts tal i com s'indica a la instrucció tècnica complementaria descrita a continuació.

4.2. Mètodes de mesura actuals

Com ja s'ha esmentat a l'anterior apartat, en l'actualitat és el Reial Decret 1890/2008[2] el vigent pel que respecta a la normativa d'il·luminació en vies públiques de les zones urbanes. La instrucció tècnica complementaria d'aquest Reial Decret és la ITC EA-01 a 07[3]. En aquesta instrucció tècnica es descriu el mètode a seguir per la mesura de les il·luminàncies, el conegut mètode dels nou punts, que consisteix a mesurar fent servir una retícula de mesura de nou punts com a mínim. A continuació, es procedeix a la descripció d'aquest mètode:

La retícula de mesura és el conjunt de punts en els que es mesuraran els valors de luminància. En sentit longitudinal, la retícula cobrirà el tram de superfície comprès entre dues lluminàries consecutives del mateix costat del carrer. En sentit transversal, haurà d'abastar l'amplada definida per a l'àrea de referència.

Els punts de mesura es disposaran, amb una separació uniforme, de manera que longitudinalment la separació no sigui superior als 5 m mentre que la transversal no ha de superar els 1,5 m. El nombre de punts en cada direcció (longitudinal i transversal) no ha de ser en cap cas menor a tres, és a dir, nou punts en total; d'aquí el nom del mètode.

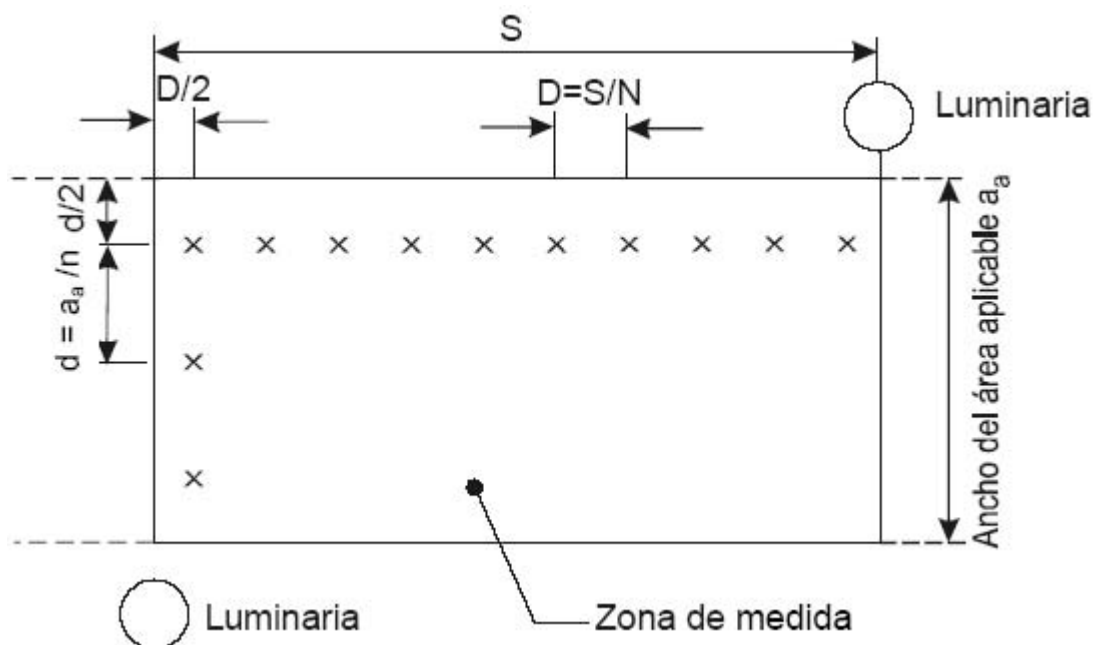


Fig. 4.1. Esquema d'aplicació del mètode de mesura d'eluminàncies

S = separació entre dos punts de llum consecutius

X = punts de mesura de la luminància

a_a = amplada de l'àrea aplicable

n = número de punts de mesura en direcció transversal (mínim 3)

N = número de punts de mesura en direcció longitudinal (mínim 3)

D = distància en direcció longitudinal entre dos punts de mesura contigus

d = distància en direcció transversal entre dos punts de mesura contigus

En l'actualitat, per desenvolupar el mètode dels nou punts, un cop definida la retícula, es fan servir luminancímetres o luxímetres, depenent de si es desitja mesurar la luminància o la il·luminància respectivament, per dur a terme el que és pròpiament la presa de mesura.



Fig. 4.2. Imatges de luminancímetres i luxímetre, respectivament

Una altra opció a l'abast dels usuaris és un sistema de luxímetre-GPS que es pot integrar a un vehicle per tal de dinamitzar la presa de dades. Òbviament, es tracta d'un sistema més complex donat que pot compondre-se de diverses sondes luxomètriques que no tan sols han d'estar coordinades entre elles sinó que també s'han de coordinar amb el sistema de geolocalització a l'hora de prendre mesures. D'aquesta manera, cada cop que les sondes prenen una mesura el sistema GPS s'encarrega d'adjuntar-hi una posició geogràfica amb prou exactitud com per generar un plànol de carrers on hi apareixen correctament localitzades les mesures preses anteriorment. Això es veu reflectit en un corresponent increment del preu.

No cal esmentar que sense un vehicle motoritzat adient aquest sistema manca de qualsevol valor afegit. Addicionalment, les unitats de les dades resultants són luxs, un lumen per metre quadrat, pel que es fa necessària la conversió d'unitats de lumen a candela. La conversió fa necessari el coneixement de l'angle sòlid corresponent. Tanmateix les dades que es recopilen sacrifiquen el rigor i precisió en pro d'abastar un territori d'una grandària considerable.

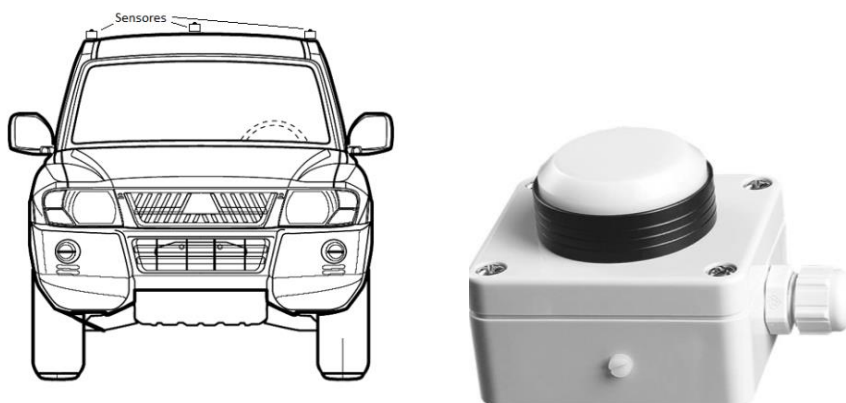


Fig. 4.3. Imatge del sistema luxímetre-GPS aplicat sobre un vehicle i d'un dels sensors que el componen



Fig. 4.4. Exemple de dades obtingudes mitjançant un luxímetre-GPS

Per últim, també cal avaluar la possibilitat que ofereixen els fotòmetres i vídeo fotòmetres, ja siguin basats en la captació de luminàncies o en la de color. Es tracta d'una mena de càmeres fotogràfiques o de vídeo adaptades únicament per a enregistrar mesures lumíniques. Malgrat que, com en el cas anterior, permeti un estalvi important en el temps invertit en les mesures; la inversió inicial és elevada. La diferència entre aquesta opció i la

escollida recau en si les modificacions es duen a terme a nivell de hardware o de programari.



Fig. 4.5. Imatge d'un fotòmetre

5. Estat de la tècnica

5.1. Mapa de luminàncies

5.1.1. Definició prèvia

En primer lloc, i per tal de facilitar la comprensió de la resta del projecte, es fa necessària la definició del que és un mapa de luminàncies.

Un mapa de luminàncies no és altra cosa que una imatge mapejada en colors falsos corresponents als valors de luminància que presenten les àrees corresponents a cada píxel a l'escena real.

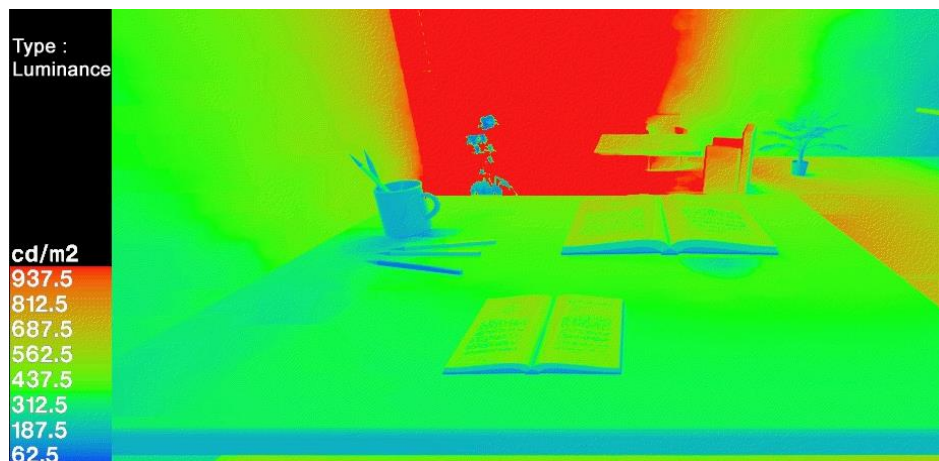


Fig. 5.1. Exemple d'un mapa de luminàncies

Un cop definit, és de capital importància plantejar-se la qüestió de quin paper desenvolupen els mapes de luminàncies a l'àmbit del món de la il·luminació. Els mapes de luminàncies constitueixen una eina de mesura dels nivells d'il·luminació, els indicadors clau per estudiar l'eficiència, manteniment i contaminació de les instal·lacions d'enllumenat.

Com es pot observar a l'exemple de mapa de luminàncies permet identificar els diferents nivells d'il·luminació presents a la imatge, les zones sobreil·luminades, les zones infrail·luminades i els gradients d'il·luminació extrems que puguin generar enlluernaments.

D'aquesta manera faciliten enormement la identificació de les característiques de cada escena per tal d'identificar els errors específics i poder posar-hi solució.

5.1.2. Nocions fotogràfiques

Per tal d'entendre en profunditat la manera com es tracten les imatges i de com se'n recupera la informació desitjada, en aquest cas el mapa de luminàncies, cal adquirir prèviament unes nocions bàsiques sobre la llum i les càmeres fotogràfiques[4].

És important reflexionar sobre el procés que es dona a l'hora de fer una fotografia abans de comprendre la manera en que es pot recuperar la informació. Tot comença al focus emissor de llum o radiació visible. Aquesta radiació s'estén per tota l'escena il·luminada i cada superfície sobre la que incideix la reflexa en dependència de la seva reflectivitat[5]. Finalment, aquestes ones lumíniques acaben incidint sobre la lent de la càmera fotogràfica. La modificació que pateix la radiació quan travessa la lent depèn de factors diversos tals com el seu factor de transmissió per a les radiacions corresponents a la banda de l'espectre visible, la concavitat i convexitat de la pròpia lent, l'estat de conservació de la mateixa, etcètera.

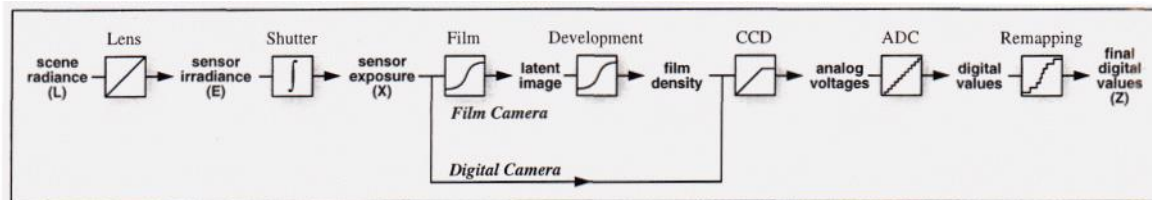


Fig. 5.2. Esquema de blocs del procés de generació d'una imatge dins d'una càmera fotogràfica

Un cop superada la lent, la llum incideix sobre l'obturador i el sensor d'irradiància que el regeix[6]. Depenent del temps d'obertura de l'obturador i pel mateix grau d'obertura, l'energia lumínica captada serà més gran o més petita encara que la luminància de la escena sigui la mateixa.

Arribats a aquest punt, es fa palesa la divergència entre el funcionament i elements d'una càmera fotogràfica analògica i les actuals càmeres fotogràfiques digitals. En el primer cas, el film fotogràfic que es fes servir així com la seva densitat entrarien en joc. No obstant, el

cas que ens ocupa és el segon, on la radiació lumínica incideix sobre el dispositiu de càrrega acoblada (abreviat CCD, de l'anglès Charge-Coupled Device)[7]. Aquest dispositiu és el sensor que enregistra la imatge mitjançant diminutes cèl·lules fotoelèctriques (píxels).



Fig. 5.3. Imatge d'un dispositiu de càrrega acoblada (CCD)

Els píxels enregistren gradacions dels tres colors llum bàsics: vermell, verd i blau (abreviat RGB, de l'anglès Red, Green, Blue) de manera que tres píxels, un per cada color, formen una unitat o conjunt de cèl·lules fotoelèctriques capaces de captar qualsevol color a la escena. Per tal d'aconseguir aquesta separació de colors, la majoria de càmeres fan servir màscares de Bayer[8] que filtren la llum de tal manera que per cada quatre píxels un enregistra llum vermella, un altre enregistra llum blava i es reserven dos píxels per captar-ne la llum verda (donat que l'ull humà és notablement més sensible a la llum verda que no pas als colors vermell o blau). El resultat final inclou informació sobre la lluminositat en cada píxel però amb una resolució en color menor de la resolució amb il·luminació que és la informació realment interessant en aquest cas. Per això, aquest filtre és més adient que no pas aquells que aconsegueixen una millor separació dels colors mitjançant l'ús de dispositius amb tres CCDs acoblats i un dispositiu de separació de llum com un prisma dicroic[9] que separa la llum incident en els seus components vermell, verd i blau. Aquest últim suposa, a més, un increment del preu del sistema. Algunes càmeres professionals d'alta gamma fan servir un filtre de color rotant[10] per enregistrar imatges d'alta resolució de color i lluminositat, però es tracta de productes cars i que només poden fotografiar objectes estàtics.

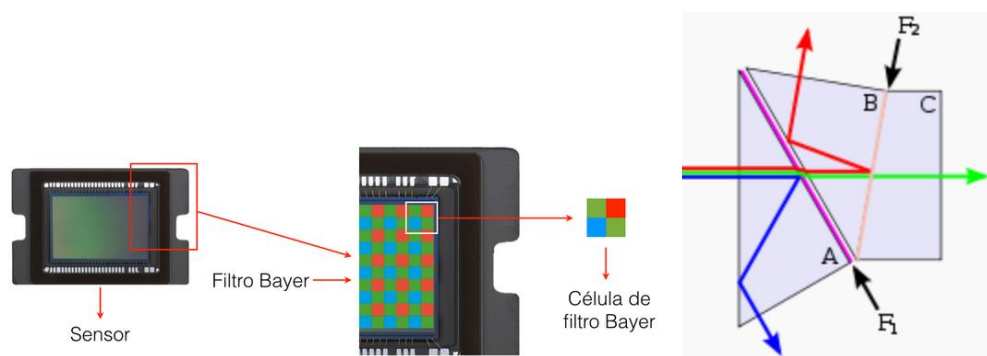


Fig. 5.4. Esquema del funcionament del filtre de color Bayer i d'un prisma dicroic

La senyal de sortida d'un CCD és una senyal elèctrica analògica, uns voltatges analògics. El següent element en intervenir i modificar aquesta senyal és un convertidor analògic-digital (abreviat ADC, de l'anglès Analògic to Digital Converter)[11]. Es tracta d'un component electrònic intern a la càmera fotogràfica relacionat amb l'electrònica de senyal. Aquest, duu a terme la digitalització; procés consistent en la transcripció de les senyals analògiques en senyals digitals amb el propòsit de facilitar-ne el seu posterior processat (codificació, compressió, etc.) i que en resulti una senyal digital que, per natura, és més difícilment corrompible pel soroll i d'altres interferències a les que les senyals analògiques es mostren més sensibles.



Fig. 5.5. Esquema del funcionament d'un convertidor analògic-digital (ADC)

La conversió d'una característica analògica contínua a un nombre digital, que representa l'amplitud d'aquesta característica, comporta la quantificació de la senyal d'entrada, introduint d'aquesta manera un petit error. En comptes de dur a terme una única conversió, un ADC habitualment porta a terme les conversions (mostreja l'entrada) periòdicament. En resulta una seqüència de valors digitals que han estat convertits des d'una senyal analògica de temps i amplitud contínua a una de digital on tant el temps com l'amplitud responen a característiques discretes.

Un ADC es defineix pel seu ample de banda (el rang de freqüències que pot mesurar) i la relació entre la senyal i el soroll (amb quina precisió pot mesurar una senyal en relació al soroll que hi afegeix). L'ample de banda real d'un ADC es caracteritza principalment per la seva freqüència de mostreig i, en menor mesura, per la capacitat que té de controlar els errors. El rang dinàmic d'un ADC depèn de diversos factors, incloent la resolució (el nombre de nivells de sortida als que pot reduir una senyal), linealitat i precisió (quant s'ajusten aquests nivells de sortida a la vertadera senyal analògica) i els petits errors de temporització que introdueix el soroll addicional. Normalment, el rang dinàmic d'un ADC es redueix a una sola dada: el seu nombre de bits efectiu (abreviat ENOB, de l'anglès Effective Number Of Bits)[12], el nombre mig de bits que cada mesura retorna que no són soroll. Un ADC ideal té un ENOB igual a la seva resolució. Els ADCs s'escullen tenint en compte la relació entre l'ample de banda i la relació entre la senyal requerida i el soroll inclòs. Si un ADC funciona amb una freqüència de mostreig més gran del doble de l'ample de banda de la senyal, llavors és possible reconstruir-la perfectament suposant un ADC ideal i menystenint l'error de quantificació. L'existència de l'error degut a la quantificació limita el rang dinàmic fins i tot per a un ADC ideal, de totes maneres, si el rang dinàmic del ADC és més gran que el de la senyal d'entrada, els seus efectes es poden menystenir donant resultat a una representació perfecta de la senyal d'entrada.

5.1.3. Principis físics comuns

Com queda palès al capítol anterior, els sensors CCD tenen un funcionament semblant a un luminàncímetre. Aquesta és la idea inicial que porta a pensar que es podrien fer servir, amb el tractament adient, com a sistema substitutiu. Per tal de confirmar-ho s'ha de comprovar que les semblances són suficients.

Els detectors CCD, tal com les cèl·lules fotovoltaïques, es basen a l'efecte fotoelèctric, la conversió espontània de llum rebuda en corrent elèctrica que succeeix en alguns materials. La sensibilitat del detector CCD depèn de la eficiència quàntica del xip, la quantitat de fotons que han d'incidir sobre cada receptor per produir una corrent elèctrica. El nombre d'electrons produït és proporcional a la quantitat de llum rebuda (a diferència de la fotografia convencional sobre film negatiu fotoquímic). En finalitzar el temps d'exposició, els electrons produïts es transfereixen de cada detector individual (fotosite) per una variació cíclica d'un potencial elèctric aplicada sobre bandes de semiconductors horitzontals i

aïllades entre elles per una capa de diòxid de silici. D'aquesta manera, el CCD es llegeix línia a línia, encara que existeixen nombrosos dissenys de detectors diferents.

A tots els CCDs, el soroll electrònic augmenta notablement amb la temperatura (acostuma a doblar-se cada 6-8 °C). És per això que els detectors dels luminancímetres es troben refrigerats per tal de poder fer-los servir de manera perllongada sense que la seva exactitud es vegi compromesa.

5.1.4. Funció inversa

En aquest àmbit el terme funció inversa fa referència a la funció inversa a la funció que modela les diferents transformacions patides per la llum al llarg del seu viatge des de la font emissora fins a obtenir la imatge digital. La determinació d'aquesta funció no és trivial donat els nombrosos factors que hi influeixen com es pot intuir de la lectura de l'apartat de nocions fotogràfiques. Una complicació afegida és que les transformacions patides pel feix de llum no són únicament lineals, fet que complica més, si cap, l'obtenció no ja de la funció directa sinó de la inversa.

Donada la dificultat d'aquesta tasca no és estrany que diversos autors i especialistes hagin publicat extensa bibliografia al respecte. En aquest apartat es pretén donar una idea breu sobre les idees publicades al respecte de la recuperació de la funció inversa.

5.1.5. Mètodes per a la recuperació de la funció inversa

El punt de partida dels mètodes estudiats és una imatge en alt rang dinàmic (HDR). Es tracta d'un format digital d'imatge, encara que la representació de la mateixa es dugui a terme mitjançant nombre real en comptes d'enters. El motiu és que aquest tipus d'imatge sorgeix de la necessitat de plasmar un rang dinàmic ample en una imatge. Això permet no perdre detalls degut a la sobreexposició o a la infraexposició adquirint-ne respectivament els detalls de les seccions fosques o de les altament il·luminades[13].

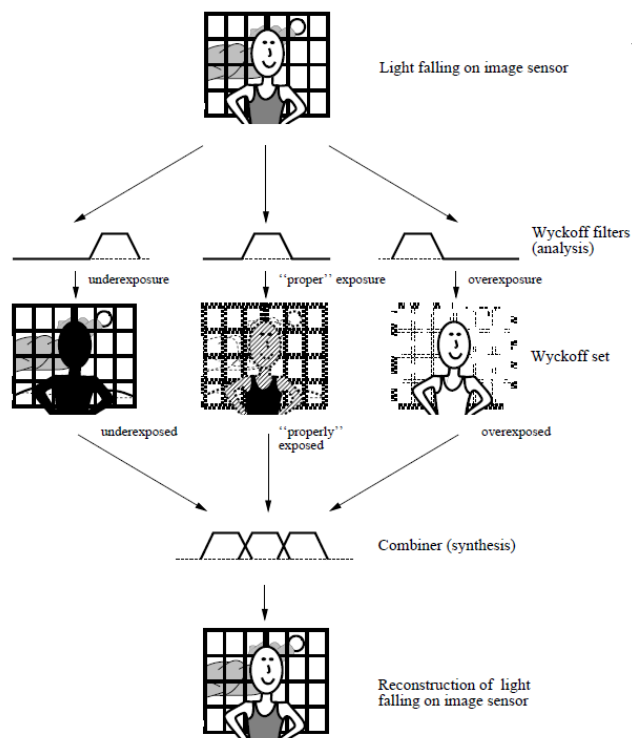


Fig. 5.6. Esquema de la generació d'una imatge en format d'alt rang dinàmic (HDR)

Gràcies a aquesta evolució en el camp de la fotografia, juntament amb la corba de resposta de les càmeres fotogràfiques, s'obre un nou camí per, inicialment, la recuperació de mapes de radiàncies. Mann i Picard[13] aproximen la corba de resposta amb una funció del tipus $M = \alpha + \beta \cdot I^\gamma$. El coeficient independent α s'estima prenent una imatge amb la lent tapada, mentre que al coeficient β se li dóna un valor arbitrari. Per calcular el valor de γ s'aplica una regressió sobre diferents mesures de les quals no cal conèixer els valors de la radiància I , sinó tan sols la proporció que els relaciona.

L'algoritme proposat per Debevec i Malik[14] permet recuperar la funció resposta i les exposicions dels píxels observats mitjançant la minimització dels errors quadrats. El nou model no es limita a observar les funcions resposta del tipus exponencial, donant només per fet que es tracta d'una corba amb continuïtat de segon tipus, pel que els resultats obtinguts són més acurats. Aquesta funció resposta és aplicable a la totalitat dels píxels per obtenir-ne les radiàncies corresponents.

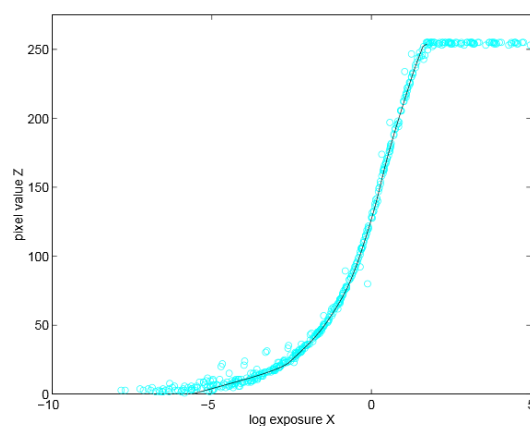


Fig. 5.7. Gràfic valor de píxel-logaritme de la exposició de la imatge

Per la seva banda, Mitsunaga i Nayar[15] van un pas més enllà proposant una calibració dinàmica que fa possible l'aplicació del seu algoritme a sistemes de vídeo, més susceptibles a canvis en l'apertura d'exposició que el sistema de Debevec i Malik manté constant. La innovació en aquest cas, resideix en l'ús d'un model paramètric flexible basat en les característiques físiques de la càmera que s'utilitza, cosa que defineix els paràmetres que es fan servir. D'aquesta manera, no es fa necessari conèixer amb exactitud les exposicions a que es troben sotmeses les escenes. Aquest model permet representar acuradament un ampli rang de les corbes respostes que es troben a la pràctica.

En el cas que ens ocupa, s'ha optat per una solució intermèdia entre les últimes dues. Com a l'algoritme de Mitsunaga i Nayar s'ha adoptat un model polinòmic que s'ha demostrat que s'adapta amb una major exactitud a les corbes de resposta real presentades per les càmeres fotogràfiques. No obstant, tenint en compte el cost computacional de l'autocalibració dinàmica i que les mesures es prendran de manera estàtica, s'ha renunciat a aquest punt fent servir una calibració estàtica tal i com es proposa a l'algoritme de Debevec i Malik.

5.2. Segmentació de la imatge

Dins del camp de la visió computacional, la segmentació d'imatges[16] és el procés de partició d'una imatge digital en múltiples segments (conjunts de píxels coneguts com superpíxels). L'objectiu de la segmentació pot ser tant la simplificació com el canvi de

representació d'una imatge de manera que mostri més informació o ho faci de manera més entenedora i fàcil d'analitzar. La segmentació d'imatges es fa servir habitualment per localitzar elements a la imatge que per a l'ull humà serien imperceptibles o minimitzar l'esforç de l'usuari a l'hora de localitzar aquests elements. Parlant més exactament, la segmentació d'imatges consisteix en classificar els píxels d'una imatge de manera que els píxels que pertanyin a la mateixa classificació dins d'una imatge comparteixin certs trets visuals. En el cas que ens ocupa, aquests trets s'especifiquen en pertànyer a la vorera, la calçada, les façanes o bé al "cel" o segment de fuita de la imatge.



Fig. 5.8. Exemple de segmentació d'imatge

El resultat de la segmentació d'imatges és un conjunt de segments que en conjunt componen la imatge sencera, o bé un conjunt de contorns extrets o recuperats de la imatge (en el cas de la detecció de vores). Cadascun dels píxels a un segment o regió són semblants respecte a alguna característica o propietat definida, ja sigui el color, la intensitat o bé la textura. Les regions adjacents són significativament diferents respecte a aquestes característiques enumerades o propietat calculada o computada.

5.2.1. Mètodes de segmentació de la imatge

Els diferents mètodes[16] a seguir per tal d'aconseguir la simplificació d'una imatge a diversos superpíxels es poden agrupar en funció del principi en que es basen a tal efecte:

5.2.1.1. Mètodes de llindar

Es tracta dels mètodes més simples i rudimentaris pel que fa a segmentació de la imatge. El principi és el d'aplicar un valor llindar[17] sobre una imatge en escala de grisos de manera que cada píxel serà classificat en funció de si es troba per sobre o per sota del valor límit, resultant-ne una imatge binària. És de particular importància per aquests mètodes la tria del valor llindar. L'evolució natural d'aquest procediment és la de dividir la imatge en un major número de segments. Diversos exemples dels mètodes de llindar són el mètode de màxima entropia o el mètode d'Otsu[18][19] (o de la màxima variància).

Exemple:

- Mètode d'Otsu[18]: Aquest mètode, limitat a les imatges en escala de grisos, prova de minimitzar el soroll de rerefons de la imatge original abans de calcular el valor llindar. El valor llindar es calcula intentant minimitzar ambdós variàncies, la present entre el píxels blancs i la dels negres.



Fig. 5.9. Aplicació del mètode llindar sobre una imatge en escala de grisos

5.2.1.2. Mètodes d'agrupació

L'exemple més notable d'aquesta família de mètodes[19] és l'algoritme de les K-mitjanes[20][21], una tècnica iterativa que es fa servir per tal de dividir una imatge en K agrupacions. L'algoritme bàsic és: triar K centres de les agrupacions ja sigui aleatòriament o bé basant-se en algun mètode heurístic, assignar cada píxel de la imatge a l'agrupació que minimitzi la distància entre el píxel i el centre de l'agrupació, recalculer els centres de les agrupacions fent les mitjanes de tots els píxels de l'agrupació, per últim cal comprovar si els centres de les agrupacions han convergit. De no ser així, caldrà repetir els passos anteriors fins a la convergència.

Cal esclarir que, en aquest cas, quan ens referim a distància ens referim a la diferència quadrada o absoluta d'un píxel amb el centre d'una agrupació. És habitual que la diferència es basi en el color, intensitat, textura o localització (o una combinació ponderada de les anteriors). El nombre K pot ser triat aleatòriament, arbitràriament o per heurística. La convergència del mètode està garantida, no així que la solució sigui òptima; depenent això de la tria inicial de centres i de la variable K.

Exemples:

- Segmentació basada en color per agrupació de les K-mitjanes[20][21]: Aquest mètode tradueix la imatge a l'espai CIELAB de manera que les variacions en brillantor es fan paleses explícitament. L'espai LAB es troba caracteritzat per tres paràmetres: la característica de lluminositat (L), la característica de cromaticitat (A), que indica la situació del color al llarg de l'eix vermell-verd, i una segona característica de cromaticitat (B), que fa la mateixa funció d'indicar la situació del color sobre un eix; l'eix blau-groc en aquest cas. Tota la informació cromàtica es troba als paràmetres A i B, cosa que permet calcular la distància entre dos colors mitjançant la formulació de la distància euclidiana. Aquesta distància permet dur a terme l'agrupació pertinent en K superpíxels. A posteriori aquest mètode permet fer un segon agrupament de cada superpíxel aplicant el mètode de llindar sobre el paràmetre de lluminositat de manera que obtenim 2K agrupacions dividint cadascuna de les anteriors en píxels lluminosos i píxels que no ho son.

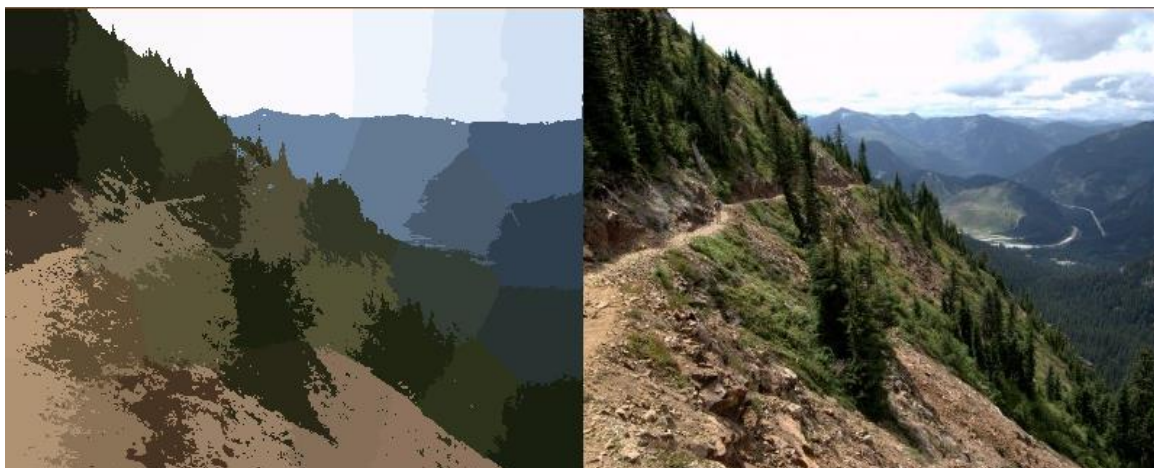


Fig. 5.10. Exemple d'aplicació del mètode d'agrupació a una imatge

- Agrupació per textures: Aquest mètode fa servir filtres de textures per abordar la segmentació de la imatge. En primer lloc es calcula l'estadístic d'aleatorietat (entropia amb els píxels veïns) per a cada píxel, se n'obté una imatge de textures. Sobre la matriu obtinguda s'aplica el mètode llindar amb un valor llindar adient per tal d'identificar les diferents textures presents a la imatge i se suavitzen i defineixen els contorns del resultat. Cal esmentar que altres mètodes opten per fer servir l'estadístic de desviació estàndard o bé la diferència entre el valor màxim i el mínim dels píxels veïns.

5.2.1.3. Mètodes basats en la compressió

Aquests mètodes subscriuen que donat que la segmentació d'imatges és la simplificació de les imatges o la reducció de les mateixes al mínim exponent (superpíxels), la segmentació òptima és aquella que minimitza la codificació de les dades. La connexió entre aquests conceptes es fa palesa en què la segmentació prova de trobar patrons a les imatges i qualsevol regularitat o repetibilitat a una imatge permet comprimir-la. Aquests mètodes descriuen cada segment de la imatge mitjançant la seva textura i la forma de la seva frontera límit. Cadascun dels components es modela per la funció de distribució de probabilitat.

5.2.1.4. Mètodes basats en l'histograma

En primer lloc, cal aclarir que quan es parla d'un histograma d'una imatge es tracta de l'histograma que mostra el valors discrets que pot prendre cada píxel. Mentre que a una imatge en escala de grisos l'histograma és únic, en el cas d'una imatge en color aquest histograma és triple. Aquest mètodes són molt eficients computacionalment ja que habitualment només han de recórrer els píxels de la imatge un sol cop. A aquesta tècnica s'elaboren els histogrames pertinents a partir de la informació aportada pels píxels de la imatge, els pics i valls mostrats a aquestes gràfiques permeten la definició dels agrupaments de la imatge prenent com a mesura el color o intensitat.

Una evolució d'aquest algoritme és la d'aplicar recursivament la cerca a través de l'histograma amb l'objectiu de dividir cadascun dels superpíxels en agrupaments més petits. Aquest procés es pot repetir fins al punt de no aconseguir agrupaments més petits. La principal dificultat del mètode recau en la identificació dels pics i valls de l'histograma.

5.2.1.5. Detecció de vores

La detecció de vores[22] és un camp profundament desenvolupat dins del processat d'imatges. Les fronteres i vores de les regions estan íntimament relacionades, doncs és habitual que a les fronteres de les regions es doni un important gradient a la intensitat de les imatges. És per això que les tècniques de detecció de vores s'hagin fet servir com a base per a un altre mètode de segmentació d'imatges.

Les vores identificades acostumen a ser inconnexes. No obstant, per tal de segmentar una imatge es fan necessàries fronteres tancades. Les vores que es busquen són aquelles que junt amb les detectades completen contorns tancats. Els mètodes de segmentació són, doncs, aplicables a les vores detectades a posteriori.



Fig. 5.11. Aplicació de la detecció de vores sobre una imatge en escala de grisos

Exemples:

- Mètode de Canny[23]: es tracta d'un operador de detecció de vores que fa servir un algoritme que presenta diversos estadis per tal de detectar un ampli rang de vores a les imatges.
- Mètode de Sobel[24]: és un operador de diferències finites, computa una aproximació del gradient de la funció intensitat de la imatge. Per a cada píxel de la imatge en resulta el corresponent vector gradient o bé aquest vector normalitzat.

5.2.1.6. Mètodes de regió creixent

La segmentació en aquests mètodes es basa en l'assumpció que els píxels veïns a una regió de la imatge presenten valor semblants. El procediment habitual consisteix a comparar un píxel amb els seus veïns. Si els píxels satisfan el criteri de semblança es pot atribuir al grup el nou píxel. Es fa palès que els resultats es veuran notablement influenciats tant pel criteri de semblança com pel soroll que pugui presentar la imatge.

Exemples:

- Fusió estadística de regions: Comença per la suposició que cada píxel forma una regió per sí mateix. En endavant l'algoritme decideix si fusionar aquestes regions comparant mitjançant un criteri de semblança, en aquest cas un predicat estadístic, els píxels connectats vertical i horitzontalment.

- Creixement de la regió sembrada: Pren com a punt d'inici un conjunt de "llavors" distribuïdes per la imatge. Cadascuna d'aquestes "llavors" assenyala a un dels diferents objectes a ser segmentats. Les regions creixen amb cada iteració a mesura que es comparen els píxels sense assignar a les regions creixents. En aquest cas, el criteri de semblança és la diferència entre la intensitat del píxel candidat i la mitjana dels pertanyents a la regió. El píxel que presenta una diferència més petita mesurada d'aquesta manera s'atribueix a la consegüent regió. Aquest procés continua fins que la totalitat dels píxels de la imatge han estat atribuïts a una o altra regió. És obvi, en aquest cas, que la tria de les "llavors" té un impacte crucial en el resultat final així com que el soroll de la imatge dificulta la òptima localització de les "llavors".



Fig. 5.12. Aplicació de mètode de regió creixent a una imatge en escala de grisos

- Creixement de la regió no sembrada: Es tracta d'una modificació del mètode anterior que no requereix de llavors explícitament. Parteix d'una única regió d'un únic píxel, aquest píxel no afecta significativament al resultat final de segmentació. A cada iteració considera el píxels veïns com a candidats per a la regió creixent tal i com ho feia el mètode anterior. La diferència amb l'algoritme anterior és que si el píxel candidat no satisfà el criteri de semblança, que continua sent la diferència entre la intensitat del píxel candidat i la mitjana dels pertanyents a la regió, passa a ser la "llavor" d'una nova regió.

5.2.1.7. Mètodes basats en equacions diferencials parcials

Solucionant l'equació diferencial parcial mitjançant càlcul numèric és possible segmentar la imatge.

Exemples:

- Propagació de corba: El concepte principal és calcular el camí que ha de seguir una corba buscant el mínim potencial dictat per una funció de cost. Per descomptat, el càlcul del mínim de la funció cost no és trivial i es tradueix en certes condicions de continuïtat (geomètriques) sobre la corba solució.
- Mètodes paramètrics: Es basen en parametritzar els contorns d'acord a alguna estratègia de mostreig i fer evolucionar els resultats obtinguts d'acord amb la imatge i termes interns. Aquestes tècniques presenten elevada eficiència i un minso temps d'execució, encara que la formulació purament paramètrica es troba limitada per la tria de l'estratègia de mostreig, les propietats geomètriques de la corba, els canvis topològics i un llarg etcètera. Això s'ha solucionat mitjançant formulacions discretitzades que pal·lien aquestes limitacions alhora que mantenen una elevada eficiència. En ambdós casos les derivades pròpies dels gradients es calculen mitjançant diferències finites.

5.2.1.8. Mètodes de divisió del gràfic

En aquests mètodes, la imatge es presenta com un gràfic indirecte ponderat. Normalment un píxel o un grup de píxels s'associen a un node i la ponderació dels eixos que els connecten defineix la semblança entre els píxels veïns. El gràfic (o imatge) es divideix d'acord a un criteri modelat per donar lloc a agrupacions de píxels, cadascuna de les que es consideraran un segment de la imatge.

5.2.1.9. Transformació de les conques

Es considera el gradient d'intensitat de la imatge com una superfície topogràfica. Aquells píxels que presenten un gradient d'intensitat més alt (un canvi d'intensitat més bruscat) corresponen a les línies que delimiten els marges entre segments. Metafòricament, l'aigua de cadascun dels píxels inclosos a un mateix segment regala baixant la pendent en direcció al mínim canvi d'intensitat local del segment. Per tant, el

focus (o mínim local) que capti l'aigua de cada píxel determina a quin segment pertany cada píxel.

Exemples:

- Segmentació de conques controlada per marcadors: La segmentació fent servir el mètode de transformació de conques funciona millor si s'identifiquen prèviament els objectes que es troben a primer pla i aquells que pertanyen al fons de l'escena. El procés que es segueix en aquest cas és el següent: calcular la funció de segmentació, calcular els superpíxels dels objectes a primer pla, identificar les zones pertanyents al fons, modificar la funció de segmentació per tal que només s'apliqui sobre el superpíxels pertanyents al primer pla (es considera que el rerefons no pertany a cap agrupació), per últim, només resta computar les conques i atribuir-hi els píxels adjacents mitjançant la nova funció modificada.

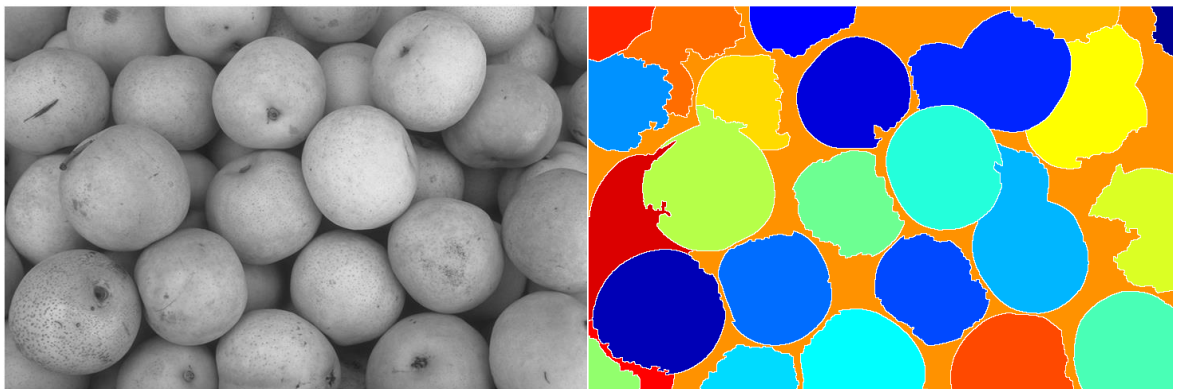


Fig. 5.13. Aplicació de la transformació de conques a una imatge en escala de grisos

5.2.1.10. Segmentació basada en models

La idea principal d'aquestes tècniques és que els objectes d'interès presenten un patró repetitiu de geometria. D'aquí que hom pugui definir un model probabilístic que expliqui la variació de la forma de l'objecte de manera que, quan es segmenti la imatge, aquest model imposi les condicions adjacents. Aquesta tasca implica la presa d'imatges de mostra seguint criteris estrictes, la representació probabilística de la variació entre les mostres captades i el desenvolupament d'una inferència estadística que relacioni les imatges amb el model desenvolupat.

5.2.1.11. Segmentacions multiescales

Les segmentacions d'imatges es calculen en múltiples escales espaials i acostumen a propagar-se de les escales amb menys detall a les més detallades. El criteri de segmentació pot ser arbitràriament complex i pot tenir en compte ambdós criteris, el global i el local. El requisit comú és que cadascuna de les regions ha d'estar connectada en algun sentit.

Exemples:

- Segmentació jeràrquica de la senyal unidimensional: Les senyals unidimensionals es poden segmentar en regions ambigüament, controlant la escala de la segmentació.

5.2.1.12. Segmentació semiautomàtica

Són aquelles en que l'usuari tria la regió que presenta interès i s'apliquen una sèrie d'algoritmes dels que en resulten els marges que més s'ajusten a la vora de la regió.

5.2.1.13. Segmentació entrenada

La majoria dels mètodes de segmentació es basen únicament en la informació aportada pels píxels de la imatge. Els humans fan servir nombrosos coneixements a banda del color a l'hora de dividir una imatge, però la implementació d'aquest coneixement tindria un cost considerable en temps de computació a més de fer-se necessària una base de dades amb coneixements de camps molt diversos, cosa de la que encara no es disposa avui dia. A banda dels mètodes de segmentació de la imatge tradicionals, hi ha mètodes de segmentació entrenada, que podrien modelar part d'aquest coneixement.

Exemples:

- La segmentació de xarxes neuronals: Es basa en processar petites àrees d'una imatge fent servir una xarxa neuronal artificial o un conjunt de xarxes. Després d'aquest procés el mecanisme de presa de decisions senyala les àrees de la imatge d'acord a la categoria reconeguda per la xarxa neuronal.

- Xarxes neuronals d'impulsos acoblats: Es tracta de models proposats inicialment per modelar el còrtex visual d'un gat i desenvolupats mitjançant processat d'imatges biomètriques d'alta qualitat. Es va reconèixer ràpidament la seva aplicació potencial al camp del processat d'imatges. Es tracta d'una xarxa neuronal bidimensional. Cadascuna de les neurones correspon a un dels píxels de la imatge d'entrada, rebent com a estímul la informació corresponent al color i intensitat del píxel corresponent. Cada neurona connecta alhora amb les neurones veïnes, rebent estímuls locals d'aquestes. Els estímuls externs i locals es combinen a un sistema d'activació intern que acumula l'estímul fins a superar cert llindar dinàmic, moment en que allibera un puls com a resposta. Al llarg de la computació iterativa les neurones produeixen sèries cronològiques de polsos com a resposta. Aquestes sèries contenen informació de les imatges de partida i se'ls hi poden aplicar diversos algorismes de processat d'imatges. En comparació amb els mètodes de processat d'imatges habituals, presenta alguns avantatges, incloent la robustesa enfront el soroll a les imatges originals, independència de les variacions geomètriques i algunes altres.

6. Determinació d'eines utilitzades

6.1. Mapa de luminàncies

A continuació es descriu la metodologia que s'ha seguit un cop dissenyats els experiments estadísticament per tal de dur-los a terme. En primer lloc es descriu el procés seguit per, a continuació, entendre la rellevància de l'instrumental que s'ha fet servir; que serà, al seu degut temps, descrit.

6.1.1. Procés

Abans d'iniciar el treball de camp s'ha dut a terme una breu fase de documentació en dos aspectes específics: el nivell d'il·luminació dels carrers i l'ús de la càmera fotogràfica i el tipus. Pel que fa al primer punt, les lluminàries que il·lumina els nostres carrers es poden classificar en quatre tipus a grans trets: les de vapor de sodi, ja siguin de baixa o d'alta pressió, per un costat i les de vapor de mercuri i els LEDs per l'altre. Al cap i a la fi, el que ens interessa és l'espectre de llum que projecten cadascuna d'aquestes tipologies i, en aquest sentit, la divisió es pot reduir a dos tipus: les que emeten una llum d'espectre groc (les de sodi tant a baixa com a alta pressió) i les que emeten llum corresponent a l'espectre blanc (les lluminàries de vapor de mercuri i els LEDs). També s'han delimitat tres graus d'il·luminació qualitatiu (alta il·luminació, il·luminació mitja i baixa il·luminació) per tal de provar que la mostra reflectís el ventall de possibilitats que es troben a qualsevol carrer.

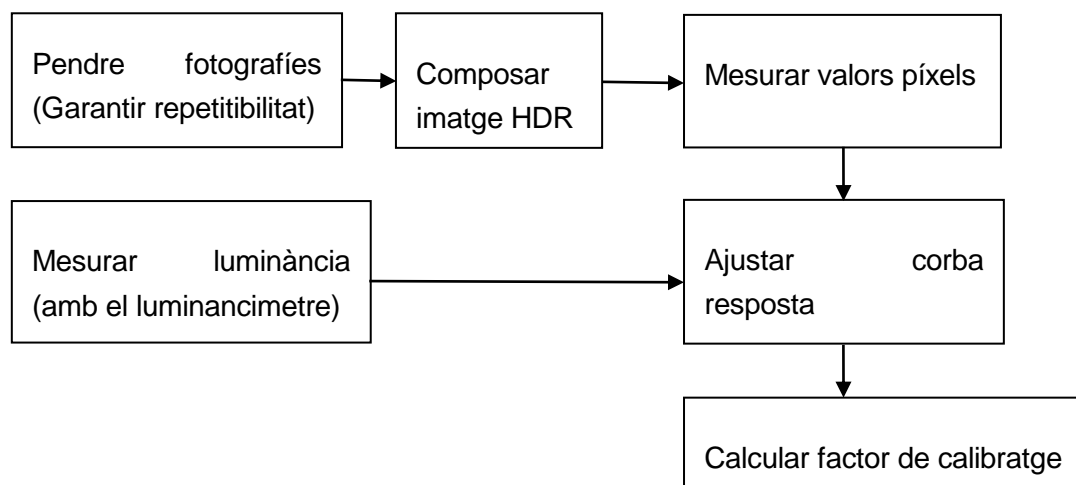


Fig. 6.1. Esquema de blocs del procés de calibració

A fi de mantenir exclosos tots aquells factors del conjunt de variables explicatives constants ha calgut certa documentació prèvia sobre l'ajustament dels mateixos a la càmera fotogràfica. En el referent a l'ús de la càmera cal parar esment a diversos punts[25]:

- Només s'ha de fer ús del bracketing d'exposició automàtica en el mode de prioritat en apertura. En el cas que ens ocupa s'ha optat pel mode manual per tal de controlar el màxim nombre de paràmetres a l'hora de prendre la fotografia.
- Cal desactivar el balanç automàtic de blancs i ajustar el balanç de blanc a la font de llum predominant a l'escena.
- Desactivar totes les característiques de realçament de color i contrast.
- És recomanable fer servir un trípod per tal de garantir que la posició de la càmera no es veu modificada dràsticament de manera que les imatges obtingudes siguin útils a l'hora de compondre una imatge HDR a partir d'elles.
- Malgrat que no és necessari, si és possible desactivar el mode d'enfocament automàtic s'observarà que la càmera tarda una mica menys en prendre les fotografies atès que no ha de desplaçar la lent tot cercant el seu punt òptim a l'hora d'enfocar l'escena.
- Tampoc no és estrictament necessari, encara que és recomanable, provar de controlar tant la configuració de l'exposició com el disparador a través d'un ordinador connectat a la càmera, de manera que la disposició de la càmera no es vegi modificada entre exposicions. Una opció intermèdia és utilitzar un control remot d'obturació.
- Cal assegurar-se de disposar de superfícies prou grans i homogènies, de gammes acromàtiques preferiblement, per poder mesurar-hi la luminància sense presentar problemes de continuïtat o bé de gradients. Per garantir el compliment d'aquesta premissa s'ha optat per fer servir l'equivalent acromàtic a una taula de Macbeth, quatre cartolines que van del color negre al blanc que seran emplaçades a l'escena mesurada i que seran les superfícies homogènies sobre les quals es faran les mesures.



Fig. 6.2. Exemple de taula cromàtica de Macbeth

- Una escena que presenti uns forts contrastos, és a dir a la que hi hagi zones molt fosques i d'altres altament il·luminades o brillants, serà d'ajut a l'hora de dur a terme la calibració. És per aquest motiu que es faran servir les cartolines per assegurar àrees suficientment grans i que presentin reflectàncies amb suficient diferència.
- Prendre una seqüència d'imatges entre les quals l'exposició presenti una diferència d'1 EV. Per les opcions disponibles al model de càmera utilitzada, les imatges presentaran -1 EV, 0 EV i +1 EV. Aquesta mesura equival aproximadament a reduir a la meitat o a duplicar l'exposició. Com que al llarg de l'experiment un dels objectius és el de mantenir l'apertura de l'objectiu, es reduirà a la meitat o es duplicarà el temps d'exposició respectivament.



Fig. 6.3. Exemples d'imatges presentant diferents exposicions

- És aconsellable que el fotograma que presenti el temps d'exposició més breu, i per tant un aspecte més fosc, no tingui valors RGB per sobre de 200, de la mateixa manera que la del temps d'exposició més llarg, que semblarà la més lluminosa, no hauria de contenir valors per sota de 20.

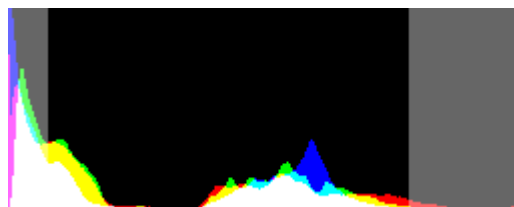


Fig. 6.4. Exemple d'histograma d'una imatge amb els valors extrems marcats en gris

- A fi de complir l'especificació anterior podem pensar conceptualment en un histograma que representi els valors dels píxels. Les cues dels extrems, corresponents als colors negre (de 0 a 20) i blanc (de 200 a 255) s'exclouran de la computació amb un pas previ. L'efecte obtingut és una millor i més senzilla lectura dels fotogrames obtinguts amb un temps d'exposició extrem ja sigui extremadament curt o extremadament llarg.
- Mitjançant un luminàncímetre es prenen mesures de la luminància emesa o reflectida per les diferents cartolines que componen l'equivalent acromàtic de la taula de Macbeth i captada des del punt de vista de la càmera. Donat que aquest aparell realitza mesures per superfícies minúscules, no hi ha manera d'assegurar que coincideixin amb les dels píxels seleccionats a posteriori. És per això que es pretindrà, en la mesura del possible, que les cartolines estiguin il·luminades tan uniformement com es pugui. Val a dir que no és necessari conèixer el valor de la reflectància característica de cada cartolina. Les dades recopilades seran degudament anotades per al seu posterior processat i estudi del qual se n'extraurà la corba resposta per a la càmera feta servir.
- A continuació i amb l'ajut de qualsevol programa que ho permeti, es procedirà a la lectura dels valors dels píxels de les diferents cartolines, ulteriorment a la composició de la imatge HDR a partir dels diversos fotogrames corresponents als diferents temps d'exposició. Per a aquest pas es pot procedir de dues maneres diferents; es pot triar un píxel que es consideri representatiu del total dels píxels de

la cartolina, o bé calcular la mitjana dels valors RGB de tots els píxels que pertanyin a la superfície de cada cartolina. Per descomptat, aquesta darrera opció, alhora que presenta un cost de computació substancialment més elevat, ofereix una fiabilitat molt més gran.

- Fent ús d'un programa estadístic, o d'un full de càlcul en cas de no disposar-ne, caldrà relacionar les diferents mesures acumulades fins al moment. D'una banda, les luminàncies mesurades amb el luminancímetre sobre les superfícies homogèniament il·luminades a l'escena fotografiada i, de l'altra, els valors dels píxels que representen aquestes superfícies a la imatge HDR. Es prendran com a variable resposta i variables explicatives respectivament. La relació s'ajustarà en forma de funció polinòmica: l'anomenada corba resposta.
- Idealment, l'aplicació de la funció resposta sobre les variables explicatives hauria de donar com a solució el valor de la variable resposta, però, com és sabut, habitualment existeix una part que la regressió no és capaç d'explicar, anomenada error. Aquest error es deu en part a l'aleatorietat de certs factors que escapen al nostre control i d'altra banda a variables explicatives excloses de la regressió. Per tal de tenir en compte aquest fet i per corregir-lo s'inclou al model explicatiu el factor de calibratge.
- El càlcul del factor de calibratge és simple, es redueix a la relació de la luminància computada gràcies a la corba resposta obtinguda a partir dels valors dels píxels de la imatge en HDR sobre el valor de la luminància real mesurada a l'escena fotografiada:

$$CF = \text{luminància real} / \text{Luminància HDR}$$

Aquest factor ha de presentar un valor proper a la unitat, de no ser així el procés s'ha dut a terme de forma errònia ja sigui per la manera en com s'han pres les mesures o per com s'ha ajustat o calibrat la funció resposta. Si és així, cal repetir el procés a partir del pas en que s'hagi comès l'error.

6.1.2. Instrumental

Bàsicament els instruments que s'han fet servir per prendre les mesures dels experiments han estat una càmera fotogràfica i un luminancímetre.

6.1.2.1. Càmera fotogràfica (Canon EOS 300D)

En primer lloc cal comentar que la característica que ha decantat la selecció en ambdós casos, tant pel que fa a la càmera[26] com en el cas del luminancímetre, ha estat la disponibilitat. Més enllà de certs paràmetres bàsics que es consideren imprescindibles, i que comentarem més endavant, la possibilitat que algú en permetés fer servir el material ha estat clau en la decisió. Es procedeix a l'enumeració de les diferents característiques que ofereix la càmera fotogràfica.



Fig. 6.5. Imatge de la càmera fotogràfica Canon EOS 300D

General

En primer lloc, cal presentar el tipus de càmera que s'ha fet servir, es tracta d'una càmera de tipus reflex de la marca Canon amb objectius intercanviables. Malgrat que en un futur, donats els procediments i mètodes triats, el software es pot aplicar sobre càmeres digitals en primera instància s'ha preferit una càmera de tipus reflex per minimitzar l'impacte del tractament digital de la imatge.

Captació de la imatge

Pel que fa a la captació de la imatge la balança s'ha desequilibrat en favor del sensor CMOS enfront del CCD donat que la primera intenció del projecte és la d'abaratir costos. El soroll que això suposa sobre la captació de la imatge és menystenible per l'aplicació que ens ocupa.

Encara que no s'ha arribat a determinar una resolució mínima, a major resolució més dades. Això es tradueix en una precisió més gran i la possibilitat de mesurar luminàncies de superfícies cada cop més discretes a mesura que s'augmenten els píxels de que disposa la càmera.

Control de l'exposició

El control sobre l'exposició, com ha quedat palès al punt anterior que descriu el procés seguit, és d'una importància capital en el procediment de presa de dades i calibració. És per això que la possibilitat de fer servir un mode de control d'exposició que permeti fixar l'obertura del diafragma mentre es varia el temps d'exposició resulta cabdal a l'hora de modificar l'exposició d'un electronvolt en un electronvolt.

Tanmateix, és necessari un rang d'exposició adient, així com un rang de velocitat d'obturació prou ampli. Per últim, també és bàsic disposar d'un mode manual per ajustar el balanç de blancs que ens el permeti anul·lar-lo.

Control de la disparada

Pel que fa al control de disparada una de les particularitats que són de gran ajut és la disparada en ràfega, que junt amb el bracketing permet la presa de la totalitat d'imatges intermèdies necessàries per conformar la imatge en HDR. Aquesta característica és de gran ajuda a l'hora d'evitar el moviment de la càmera entre captures d'un mateix escenari.

Tipus de càmera	reflex amb objectius intercanviables
Sensor d'imatge	CMOS
Resolució	6,5 MP (Total), 6,3 MP (Efectiva)
Modes	Auto, manual, prioritat a la obturació, prioritat a l'apertura, programa, escenes (4)
Compensació d'exposició	De -2 a +2 EV en passes de 1/2, 1/3
Velocitat d'obturació	1/4 a 30 s

Tau. 6.1. Dades generals càmera fotogràfica Canon EOS 300D

6.1.2.2. Luminancímetre (Minolta LS100)

El luminancímetre de mà LS-100[27] ofereix la fiabilitat i robustesa (pel que fa a mesures) dels nivells superiors de la classe de qualitat DIN B, que el col·loca entre els millors en el mercat. Aquest aparell s'alimenta amb una bateria de 9 volts cosa que el fa compacte i lleuger.

Disposa d'un sistema òptic basat en la tecnologia de lent reflex única (SLR) que permet una orientació precisa mentre s'assegura que el visor delimiti l'àrea a mesurar independentment de la distància. Aquesta sèrie és capaç de mesurar una àmplia gamma de mides a partir dels diàmetres de 14,4 mm.

Una pantalla de set segments il·luminada mitjançant LEDs permet visualitzar el valor de la mesura de luminància en temps real permetent a l'usuari gestionar la mesura sense haver de separar l'ull del dispositiu. Per a les mesures de fonts de llum intensa, inclou un filtre de densitat neutra en forma de lent. L'empunyadura està dissenyada per tal de facilitar-ne una subjecció estable.



Fig. 6.6. Imatge del luminancímetres Minolta LS100

L'aparell presenta un rang mínim de mesura de $0,001\text{cd/m}^2$ cosa que el fa capaç de mesurar superfícies excepcionalment fosques, característiques de les escenes urbanes nocturnes. El dispositiu inclou funcionalitats tant de calibratge com de correcció del color, funcions que permeten a l'usuari triar tant fer la mesura de la luminància de manera

estàndard com fer servir les funcions que corregeixen les característiques de les diferents fonts de llum establint certs valors de mesura: relació de luminàncies, la luminància discreta i valor màxim de luminància.

6.1.3. Determinació de la corba de resposta per recuperar les luminàncies

Pres a la decisió de calibrar la corba de la funció inversa, que relacionarà el valor dels píxels de la imatge amb la luminància de les àrees corresponents a la escena, s'inicia l'estudi estadístic. En primer lloc, cal determinar i dissenyar l'experiment estadístic[28] per tal que els resultats que se n'obtinguin siguin vàlids i representatius. Amb aquesta intenció s'estudia la situació mitjançant un anàlisi de variàncies (ANOVA) que permet definir la grandària de la mostra necessària per considerar que l'experiment és suficientment representatiu en relació a la població total. De no complir-se aquest requisit la mostra no s'aproparia suficientment a la realitat i a l'hora de determinar els coeficients de la corba s'obtindria una corba que prediria la realitat amb un error massa alt i de comportament irregular. L'estudi es duu a terme separatament per les escenes il·luminades amb llum groga i per a les que ho estan amb llum blanca.

El nombre de nivells ve determinat per les variables explicatives que s'han triat: els valors vermell, verd i blau enregistrats als píxels (la variable explicativa del tipus d'il·luminació ja s'ha anul·lat en el moment en que s'ha dividit l'estudi en funció d'aquest factor). El valor de la màxima diferència entre mitjanes així com la desviació estàndard s'han estimat a partir de les dades consultades d'estudis anteriors. Per últim, s'ha definit un índex de confiança del noranta-cinc per cent, un valor estàndard àmpliament acceptat per defecte a la comunitat estadística.

6.1.3.1. Disseny de l'experiment

Resultats del disseny de l'experiment per a escenes il·luminades amb llum groga

Les dades d'inici requerides per al disseny de l'experiment[28] mitjançant l'anàlisi de variàncies no són altres que el nombre de nivells, la diferència màxima assolida entre mitjanes, l'interval de confiança al que s'aspira com a mínim i la desviació estàndard que presenta la mostra:

Nombre de nivells	3
Valors de la diferència màxima entre mitjanes	3
Interval de confiança	0,95
Desviació estàndard	0,97

Tau. 6.2. Dades generals disseny experiment llum groga

A partir dels quals s'obté la gràfica solució següent:

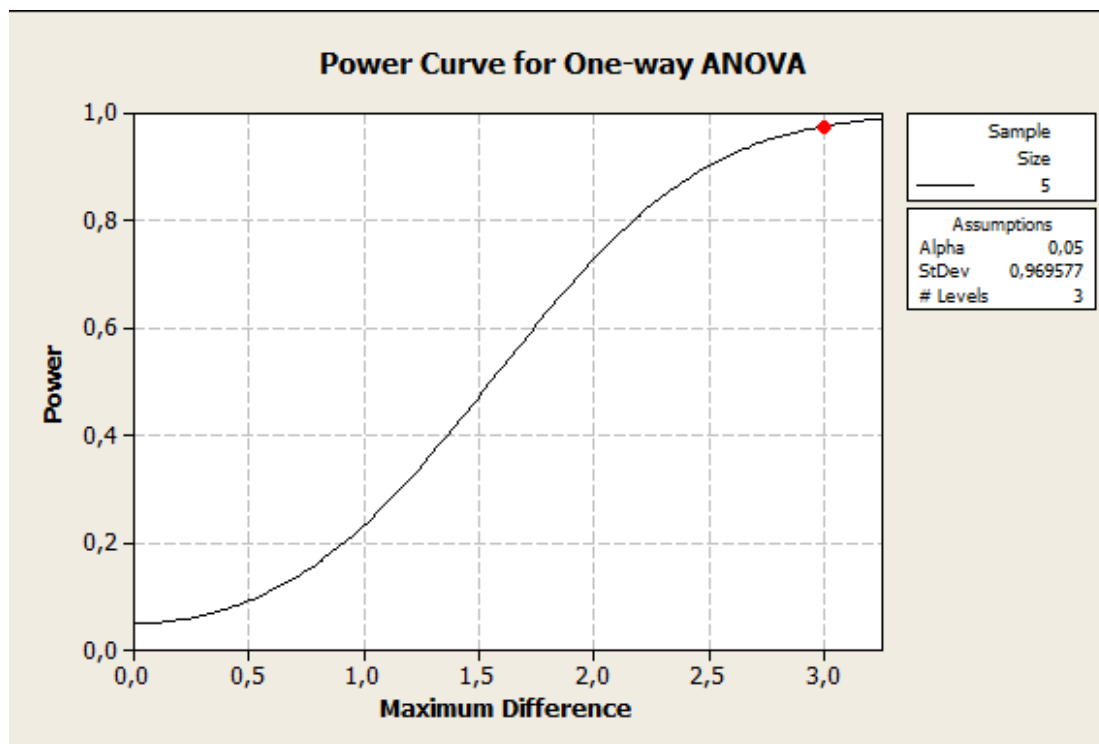


Fig. 6.7. Gràfic resolució tamany mostra experiment llum groga

D'aquest gràfic, a banda de la informació que apareix a la llegenda del marge i de la relació existent entre les diferències màximes entre mitjanes i els intervals de confiança, se'n poden extreure diverses dades addicionals. Alguns exemples de les dades extra que se'n

dedueixen són el valor alfa (complementari de l'interval de confiança), la quantitat d'experiments necessaris a la mostra i l'interval de confiança real obtingut en cas de que la mostra presentés aquest nombre d'experiments:

Valor alfa	0,05
Grandària de la mostra	5
Interval de confiança objectiu	0,95
Interval de confiança obtingut	0,98

Tau. 6.3. Resultats disseny experiment llum groga

Els resultats mostren que serien necessaris cinc experiments per tal de superar el llindar de l'índex de confiança fixat amb una confiança del 97,62%. Es considera que aquest nivell de confiança és més que suficient i que la grandària de la mostra necessària és assumible.

Resultats disseny de l'experiment per a escenes il·luminades amb llum blanca

Pel segon disseny[28] es necessiten les mateixes dades de partida idènticament que per al corresponent a la llum groga. És evident que les dades corresponents als nivells i a l'interval de confiança mínim admès seran les mateixes, però com que el valor de la màxima diferència i de la desviació estàndard s'han estimat a partir dels resultats obtinguts a estudis anteriors aquestes dues dades prenen un nou valor que disten significativament dels del cas anterior:

Nombre de nivells	3
Valors de la diferència màxima entre mitjanes	1
Interval de confiança	0,95
Desviació estàndard	0,39

Tau. 6.4. Dades generals disseny experiment llum blanca

Basant-nos en aquestes dades de partida es pot graficar la següent corba:

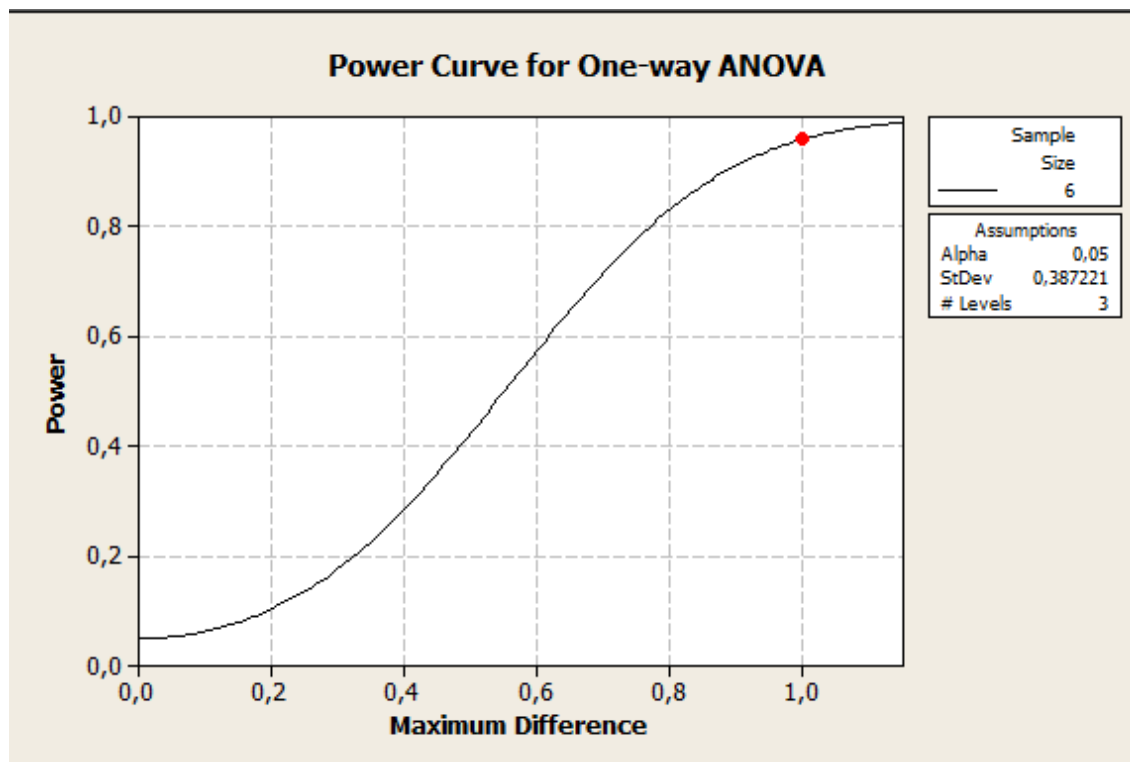


Fig. 6.8. Gràfic resolució tamany mostra experiment llum blanca

I si un cop més n'extraïem la informació addicional d'aquesta solució gràfica tal com el valor alfa, la quantitat d'experiments mínims per superar l'interval de confiança mínim admès i l'interval de confiança que s'assoliria en cas de que la mostra es reduís a aquest nombre d'experiments, ho podem tabular de la següent manera:

Valor alfa	0,05
Grandària de la mostra	6
Interval de confiança objectiu	0,95
Interval de confiança obtingut	0,96

Tau. 6.5. Resultats disseny experiment llum blanca

Degut a que la distància entre mitjanes és notablement més gran, s'ha triplicat, i la desviació estàndard és evidentment menor; en aquest segon cas, l'exigència mostral s'eleva fins als sis experiments que permetrien assolir un índex de confiança bastant menor degut a la natura de la població. La confiança que s'aconseguiria seria del 95,88%, també gens menystenible.

Cal parar esment al fet que, com s'han fet servir quatre cartolines de diferent reflectància a cada presa de dades, cada fotografia correspon a quatre experiments. Atès que dues fotografies amb cada tipus d'il·luminació serien suficients, i que es vol assegurar la validesa dels experiments, es duran a terme el doble d'experiments dels estrictament necessaris, és a dir un total de vuit fotografies; quatre per a cada tipologia d'il·luminació. Tanmateix, a priori es pretindrà, qualitativament, que els diversos experiments reflecteixin els diferents nivells d'il·luminació que hom pot trobar als carrers urbans.

6.2. Segmentació de la imatge

Valorant la funcionalitat específica que se li vol donar al sistema que s'està desenvolupant s'ha pres la decisió de combinar dos dels mètodes descrits a l'apartat anterior. En primer lloc s'aplicarà un filtre de textures, doncs a les escenes urbanes en general la paleta de colors es mou entre tons acromàtics i donat que en molts casos el color no serà un factor diferenciador es confia que les textures siguin més determinants. Un cop diferenciades les diferents textures presents a l'escena i sobre aquest resultat intermedi es farà servir un mètode l·lindar per tal d'acabar d'afinar els resultats i preparar-los per a l'etiquetat posterior de tots els segments en què s'hagi dividit la imatge.



Fig. 6.9. Esquema de blocs sobre el procés de segmentació d'una imatge HDR

7. Metodologia proposada

En aquest apartat, s'ha desenvolupat l'explicació del procés computacional que es duu a terme, amb cada imatge en HDR, per aconseguir el mapa de luminàncies i la segmentació corresponents.

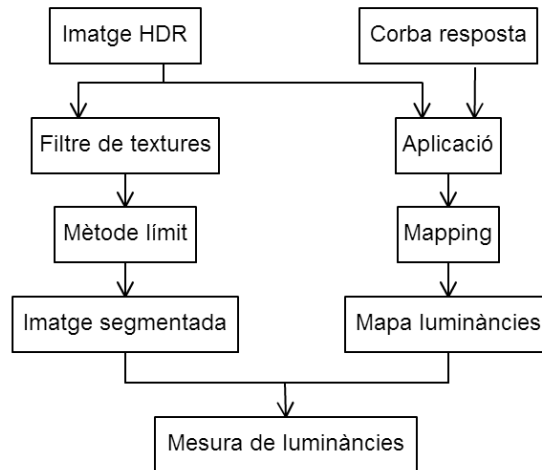


Fig. 7.1. Esquema de flux de la metodologia proposada

7.1. Mapa de luminàncies

Seguint la metodologia proposada a l'apartat anterior per desenvolupar correctament els experiments que s'han dissenyat, s'obtenen quatre imatges en format HDR per a cada tipus d'il·luminació observada, vuit en total. Com que els experiments han estat dissenyats per separat, en aquest apartat també es tractaran les tipologies d'il·luminació per separat.

En qualsevol dels casos, ja estigui l'escena il·luminada amb llum blanca o groga, se'n triaran quatre imatges.



Fig. 7.2. Imatge en escala de grisos aplicant la corba resposta

Aplicant la corba resposta sobre cadascuna de les imatges se n'obté una nova imatge en escala de grisos com la mostrada. A aquesta nova imatge el valor de cada píxel es correspon amb el valor de luminància que presentava la superfície corresponent a l'escena a l'hora de prendre la fotografia. Sembla obvi que com a mètode per emmagatzemar la informació resulta útil i intuïtiu, valors que es perden totalment a l'hora d'interpretar la imatge. És aquest motiu el que fa necessari l'aplicació d'un procés de mapping que doti d'un espectre de color la imatge de manera que en resulti una lectura i interpretació més fàcil i intuïtiva.

LLUM	EXPERIMENTS	CARTOLINES	CARTOLINES TOTALS	PUNTS DE CALIBRAT	GRAUS DE LLIBERTAT CORBA RESPOSTA
GROGA	4	4/Experiment	16	16	13
BLANCA	4	4/Experiment	16	16	13

Tau. 7.1. Dades dels punts de calibrat i graus de llibertat per a la calibració

Dels experiments desenvolupats només es faran servir quatre per determinar els coeficients de les corbes de resposta. Cadascuna d'aquestes quatre imatges presenta quatre cartolines al seu interior que són, realment, els punts de calibrat. Els punts de calibrat són aquells per on es pretén fer passar la corba de manera que l'error sigui mínim, cadascun correspon a una cartolina de diferent color. Són, doncs, els encarregats de fixar els graus de llibertat de la corba general.

7.2. Segmentació de la imatge

Per tal d'aplicar la segmentació de les imatges[29] sobre un rang suficientment ampli com per resultar representatiu de totes les escenes urbanes observables no se'n descartarà cap de les vuit triades per a l'aplicació del mapa de luminàncies. Amb això s'aconseguirà que hi siguin representats els dos tipus d'il·luminació així com certa varietat pel que fa als nivells d'il·luminació.

En qualsevol dels anteriorment esmentat casos, el procés que se seguirà consta de quatre passes: en primer lloc s'aplicarà el filtre de textures amb la corresponent màscara d'entropia per, més endavant, sotmetre'n la imatge resultant a un filtre de valor llindar per afinar els resultats obtinguts, en tercer lloc, s'eliminen els macropíxels suficientment petits com per ser considerats soroll i, finalment, es duu a terme l'etiquetat de cada segment degudament.

Com es pot apreciar de la descripció del procés, aquest no varia ni el més mínim en funció de si la il·luminació de l'escena a mesurar és blanca o groga. Resulta una dada irrellevant per aquest apartat del processat computacional i, per tant, s'omet la divisió.

7.2.1. Creació de la imatge texturitzada

Es parteix de la imatge verge en format HDR que representa l'escena a mesurar.



Fig. 7.3. Imatge en format HDR a mesurar

A continuació es crea una nova matriu on cada element pren el valor de l'entropia dels seus veïns a la imatge HDR. Els valors d'entropia són calculats computacionalment fent servir el filtre d'entropia aplicant una màscara 9x9. L'entropia és una mesura estadística de l'aleatorietat.

Una vegada calculada l'entropia es normalitza la imatge texturitzada per tal que els valors que presenti estiguin compresos en el rang propi d'una imatge. D'aquesta manera s'aconsegueix la possibilitat de mostrar-la per pantalla en cas de ser necessari.

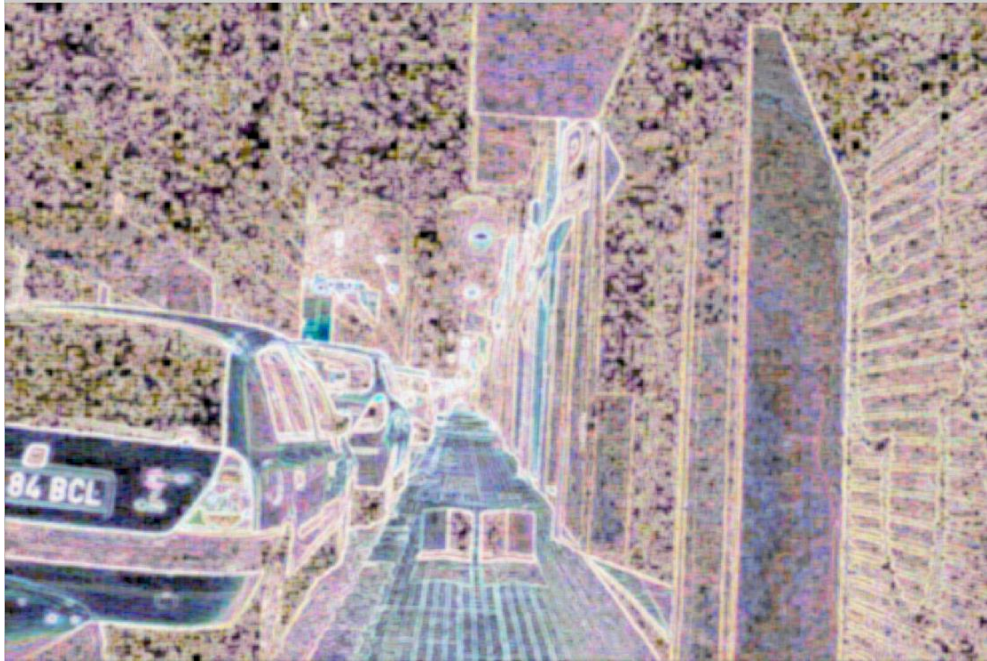


Fig. 7.4. Imatge texturitzada de l'entropia de la imatge

Degut a l'excés de soroll, la matriu manca d'utilitat amb finalitat de segmentar la imatge. En aquest estadi la matriu presenta un excés d'informació que s'ha de reduir a la seva expressió mínima a fi de que resulti útil per a la identificació dels diferents segments. Per dotar-la d'aquesta funcionalitat cal eliminar el soroll present a tota la matriu per, a continuació, eliminar els macropíxels que no assoleixin el tamany suficient per ser considerats segments.

S'elimina el soroll aplicant un filtre de valor límit a la imatge normalitzada per tal de separar-ne les textures presents. A priori es fa servir un valor llindar de 0,8 donat que arbitràriament es tracta d'un bona aproximació general de la intensitat mínima que presenten el píxels pertinents a les fronteres entre textures.

A continuació s'eliminen els macropíxels menors de cert tamany (inicialment es prenen el macropíxels més grans de 2000 píxels) que manquen d'interès per al procés de segmentació. També es tracen les voreres dels segments amb una major definició mitjançant una mascara de 9x9 escollida per mantenir les mateixes dimensions fetes servir per al càlcul de l'entropia. La matriu resultant es coneix com imatge texturitzada.

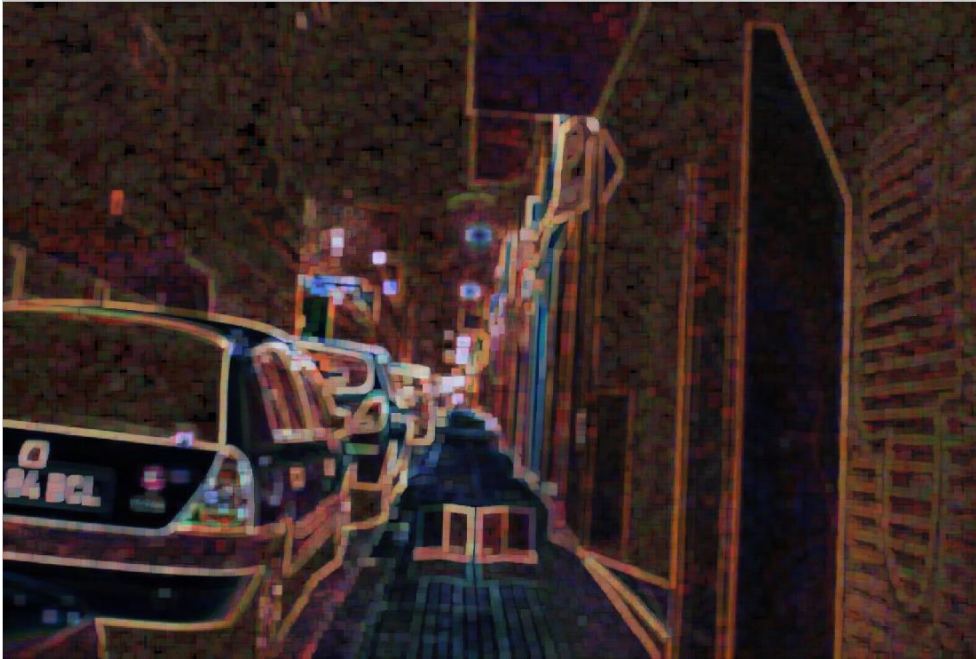


Fig. 7.5. Imatge resultant d'aplicar el mètode lllindar sobre la imatge texturitzada

7.2.2. Creació de la imatge segmentada

Sobre aquesta imatge s'aplica de nou un filtre de valor llindar obtenint-ne únicament les fronteres que separen cadascun dels segments desitjats. En aquest cas no es respecta el valor llindar utilitzat amb anterioritat i es pren com a valor límit 0,25 atès que el contrast s'ha vist incrementat substancialment.

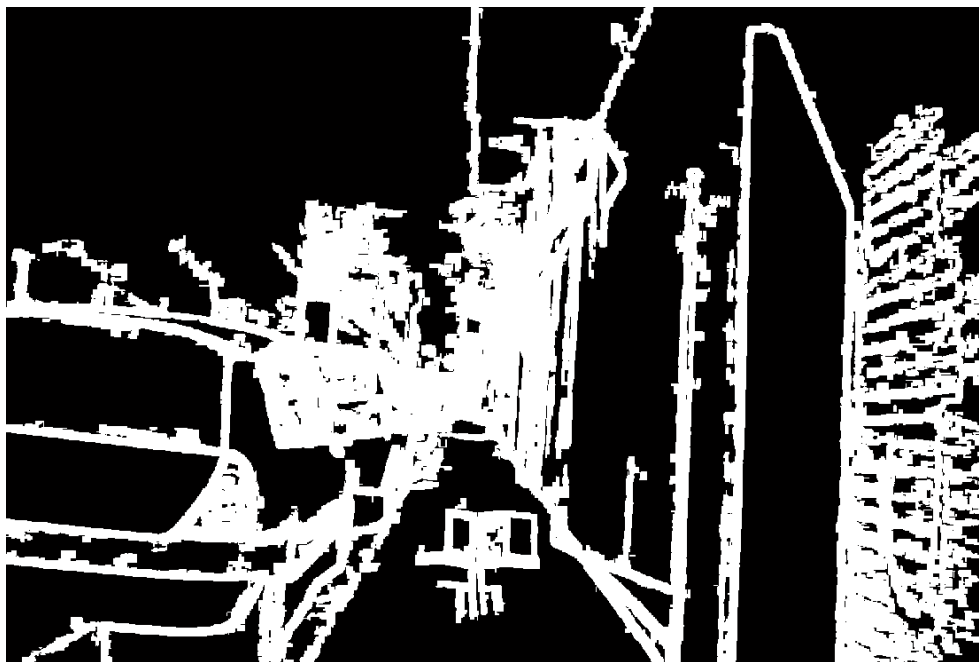


Fig. 7.6. Imatge resultant d'aplicar novament el mètode llindar

Finalment, i per raons de comoditat, aquesta matriu binària se sotmet a un procés "d'etiquetat" que agrupa tots els píxels d'un mateix segment en una estructura que conté la informació transcendental del conjunt segment[30]. A més de la informació a la qual permet un accés ràpid i intuïtiu, també facilita la representació de la matriu en un mapejat de fals color com es pot observar a continuació:

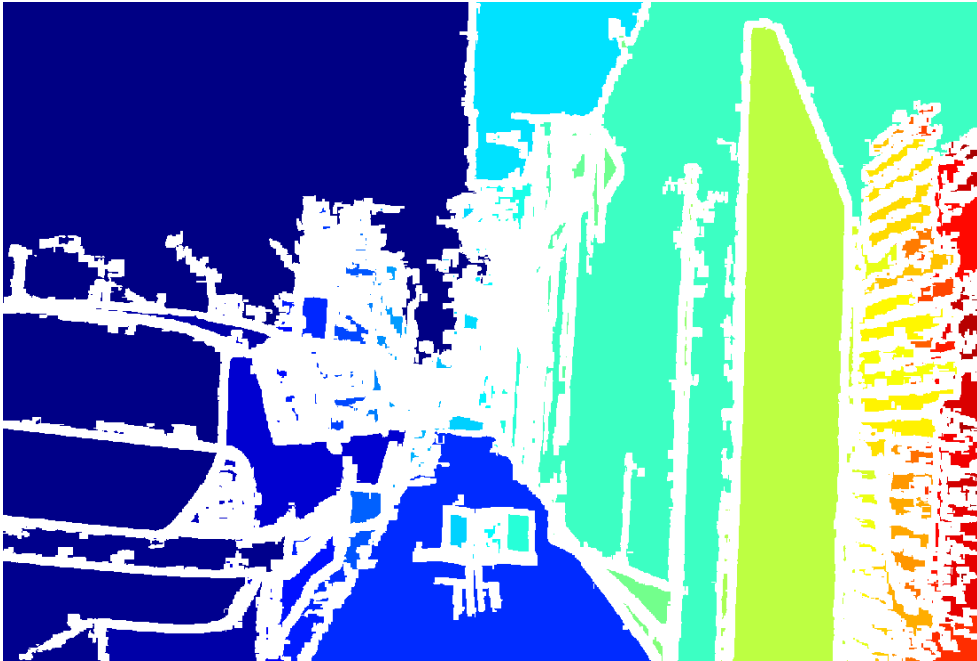


Fig. 7.7. Imatge "etiquetada" i mapejada en color fals

7.3. Determinació dels valors lumínics d'anàlisi

Seguidament, i per no incorporar informació innecessària pel lector, es detallen les dades incloses a les estructures de cada segment que resulten rellevants o aplicables a l'estudi que ens ocupa:

- Àrea: retorna un escalar que especifica el número de píxels que pertanyen a la regió.
- Percentatge: retorna un escalar resultat de la fracció entre els píxels que pertanyen al segment entre el nombre total de píxels de la imatge.
- Imatge: presenta una matriu binària on els elements corresponents al segment prenen el valor de la unitat mentre la resta presenta el valor zero.
- Perímetre: conté el valor del número de píxels que conformen el perímetre de la regió.
- Llistat de píxels: llista la posició dels píxels que inclou el segment.

A banda d'aquestes dades generals de la regió, l'estructura també en presenta d'altres que fan referència als valors dels píxels dins del segment en qüestió:

- Intensitat màxima: presenta el valor del píxel amb la intensitat més gran de la regió.
- Intensitat mitjana: retorna la mitjana aritmètica dels valors d'intensitat de tot el segment.
- Intensitat mínima: presenta el valor del píxel amb la intensitat més petita de la regió.
- Valors dels píxels: conté un vector amb els valors de tots els píxels presents al segment.

A partir d'aquestes dades es calcularan els següents valors per a un determinat píxel a lliure elecció de l'usuari:

- Posició: les coordenades que ocupa el píxel triat a la imatge. Es divideix en dues dimensions; X i Y. Es tracta d'un valor adimensional.
- Segment: Segment al que pertany el píxel triat. Aquest valor es llegeix directament de la matriu "etiquetada". Es tracta d'un valor adimensional.
- Luminància mitjana: Un cop obtingut el segment al que pertany el píxel triat es pot obtenir seguint una sèrie de senzills passos: obtenir el llistat de tots els píxels que pertanyen al mateix segment que el píxel triat, sumar els valors corresponents a aquest mateixos píxels de la matriu mapa de luminàncies i, per últim, dividir el valor obtingut pel nombre de píxels que podem obtenir, per exemple, del camp àrea de l'estructura de l'etiqueta del segment. El valor presenta unitats de candela per metre quadrat.
- Luminància mínima: La lectura de la luminància mínima és més directa. Només cal cercar quin píxel presenta el valor mínim a la matriu mapa de luminàncies d'entre el llistat de píxels trobats al punt anterior. De nou, les unitats que li corresponen són candelas per metre quadrat.
- Uniformitat: Un cop obtinguts els dos valors anteriors aquest darrer valor no és més que un càlcul directe: la proporció entre la luminància mínima i la mitjana. És costum presentar la uniformitat a mode de percentatge malgrat la seva adimensionalitat.

8. Resultats obtinguts de l'aplicació del mètode

A continuació es presenten els resultats obtinguts de l'aplicació dels mètodes proposats, tant pel que fa a la calibració de la corba resposta de la càmera fotogràfica com pel referent a la segmentació de la imatge, sobre les dades recollides durant el treball de camp. Per arribar a les corresponents conclusions generals de l'aplicació de la metodologia.

8.1. Determinació de la corba resposta de la càmera fotogràfica

Un cop dissenyats els experiments s'ha procedit a la presa de dades pràctica, al desenvolupament de les mesures pròpiament. A tal efecte, s'han intentat fixar els valors de tots els factors que no s'han pres com a explicatius, tals com la longitud de focus, l'obertura del diafragma de la càmera i d'altres. El temps d'exposició és l'únic paràmetre que s'ha variat per tal d'aconseguir les diferents exposicions necessàries per generar la imatge d'alt rang dinàmic.

Entre els factors explicatius mereix una menció especial el color de la llum que il·lumina les diferents escenes. La rellevància és tal que l'ajust de la corba resposta s'ha dut a terme independentment per a cadascuna de les tipologies. És per això que els resultats també es presenten per separat, donat que es parla de dues corbes independents l'una de l'altra.

8.1.1. Ajust corba resposta per a escenes amb llum groga

La taula a continuació mostra els valors vermell (R), verd (G) i blau (B) dels píxels centrals de cadascuna de les cartolines així com la mesura de luminància presa pel luminancímetre sobre cadascuna de les cartolines per a cada fotografia presa en escenes il·luminades amb llum groga:

FOTOGRAFIA	CARTULINA	R (comptes)	G (comptes)	B (comptes)	MESURA (cd/m ²)
H. CARRER VALLMAJOR	GRIS FOSC	177	91	40	1,5
	GRIS CLAR	229	107	34	3,6
	NEGRE	75	46	42	0,7
	BLANC	255	131	31	6,9
C2. CARRER TAVERN	GRIS FOSC	161	72	30	2,6
	GRIS CLAR	207	122	31	6,6
	NEGRE	93	64	30	1,6
	BLANC	252	155	22	12,8
D2. CARRER PLATÓ	GRIS FOSC	155	75	26	1,7
	GRIS CLAR	210	114	28	5,2
	NEGRE	92	67	27	0,9
	BLANC	250	150	26	9
E2. CARRER MONTECASSINO	GRIS FOSC	154	71	27	2,5
	GRIS CLAR	203	126	22	6,9
	NEGRE	79	67	25	1,5
	BLANC	255	154	22	14

Tau. 8.1. Dades dels valors dels píxels i mesures de luminància per a llum groga

Aquestes mesures han permès ajustar (o calibrar) una funció polinomial que predigui la luminància captada de la porció d'una escena representada per un píxel a partir dels valors emmagatzemats a aquest mateix píxel[31].

En primera instància cal tenir en compte els valors estadístics que resumeixen la bondat de l'ajust del model:

<i>Estadístiques de la regressió</i>	
Coefficient de correlació múltiple	0,9967
Coefficient de determinació R ²	0,9934
R ² ajustat	0,9669
Error típic (cd/m ²)	0,7630
Observacions	16

Tau. 8.2. Estadístiques de la regressió per a llum groga

Els anteriors valors estadístics presenten un coeficient de correlació múltiple de 0,9967 que s'aproxima a la unitat, és a dir, la funció ajustada és capaç de predir el valor de luminància a partir dels valors RGB del píxel amb un error inusualment petit. El fet que el valor sigui positiu ens corrobora que la pendent de la relació és positiva i no al contrari.

El coeficient de determinació també mostra una elevadíssima bondat de l'ajust de la corba per la seva proximitat al valor de la unitat. De la mateixa manera, el coeficient de R² ajustat, que presenta el mateix el concepte contextualitzat amb la grandària de la mostra no presenta un diferència de valor significativa.

Tanmateix, l'error típic observat és suficientment petit en comparació amb l'ordre de magnitud dels valors de les mesures i prediccions com per considerar-lo acceptable.

Totes aquestes estadístiques sobre la regressió fan referència als següents coeficients d'ajust de la corba:

Coeficient	Independent	R ¹	R ²	R ³	R ⁴
Valor	698,07	-1,88	0,01976	-8,773E-5	1,373E-7
Coeficient		G ¹	G ²	G ³	G ⁴
Valor		-5,577	0,091	-0,0006168	1,51E-6
Coeficient		B ¹	B ²	B ³	B ⁴
Valor		-66,26	3,136	-0,06433	0,0004817

Tau. 8.3. Valors dels coeficients de la regressió per a llum groga

Que donen lloc als següents residus o errors i al corresponent anàlisi dels residuals:

Observació	1	2	3	4	5	6	7	8
Pronòstic (cd/m ²)	1,45	3,60	0,73	7,04	2,78	6,56	1,56	13,40
Mesura real (cd/m ²)	1,50	3,60	0,70	6,90	2,60	6,60	1,60	12,80
Residu (cd/m ²)	0,05	0,00	-0,03	-0,14	-0,18	0,04	0,04	-0,60
Residu estàndard (cd/m ²)	0,15	0,00	-0,08	-0,42	-0,52	0,12	0,12	-1,75
Residu relatiu (%)	3,40	0,01	4,08	2,07	6,80	0,62	2,49	4,67

Observació	9	10	11	12	13	14	15	16
Pronòstic (cd/m ²)	2,30	5,03	0,89	9,06	1,85	6,97	1,50	13,29
Mesura real (cd/m ²)	1,70	5,20	0,90	9,00	2,50	6,90	1,50	14,00
Residu (cd/m ²)	-0,60	0,17	0,01	-0,06	0,65	-0,07	0,00	0,71
Residu estàndard (cd/m ²)	-1,76	0,50	0,02	-0,18	1,91	-0,19	0,01	2,09
Residu relatiu (%)	35,31	3,27	0,65	0,68	26,13	0,95	0,14	5,08

Tau. 8.4. Anàlisi dels residuals de la regressió per a llum groga

La conclusió més rellevant s'obté de l'observació dels residus relatius que en general es mantenen per sota del 5%. No obstant hi destaquen tres residus que superen àmpliament aquest llindar. Es tracta dels corresponents a les observacions 5, 9 i 13, aquestes mesures són precisament les preses sobre la cartolina de color gris fosc en els tres casos. Això indica que pels valors d'il·luminació d'entre 1,7 i 2,5 cd/m² la corba no s'ajusta tant exactament als resultats com a la resta de mesures de les mostres. L'única alternativa per millorar l'ajust en aquest tram de corba passa per ampliar la base de dades (el nombre d'experiments), cosa que es pretén fer paulatinament com a part de les mesures al llarg del estadi d'implantació i manteniment del programa.

Per últim, es para esment a la distribució de la probabilitat normal de la mostra. En aquest aspecte destaquen dos intervals amb una probabilitat notablement elevada. El primer és l'interval que va de les 1,5 a les 1,7 cd/m² que, malgrat ser un interval curt, acumula una probabilitat del 25%. El segon interval va de 6,6 a 6,9 cd/m² acumulant una probabilitat del 18,75%. El total acumulat és que hi ha un 43,75% de probabilitat de presentar una mesura dins d'un marge de 0,5 cd/m². Malgrat que la distribució que hauria de mostrar aquest gràfic hauria de ser normal el nombre d'experiments que s'han realitzat no permeten identificar aquesta tendència que quedaria més palesa quant més gran fos la mostra, de nou és una mesura a tenir en compte al llarg dels processos d'implantació i manteniment del programa.

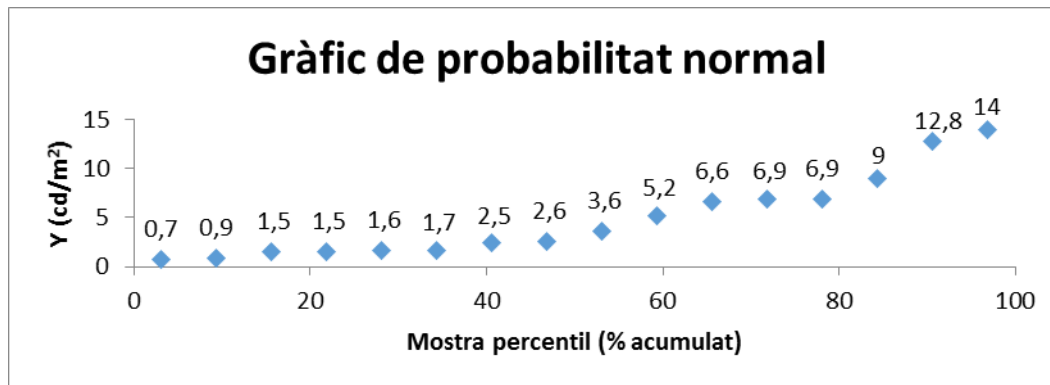


Fig. 8.1. Gràfic probabilitat normal de la regressió per a llum groga

8.1.2. Ajust corba resposta per a escenes amb llum blanca

Primerament, i com a l'apartat anterior, es presenta la taula que relaciona els valors que presenta cadascun dels píxels centrals de les cartolines, inclosos com a part de la mostra, amb les diferents mesures preses amb l'ajut del luminàncímetre sobre les superfícies de les corresponents cartolines. En aquest segon apartat les mesures, en forma de fotografies, s'han pres a escenes il·luminades amb llum blanca:

FOTOGRAFIA	CARTOLINA	R (comptes)	G (comptes)	B (comptes)	MESURA (cd/m ²)
B. CARRER MARC AURELI	GRIS FOSC	39	82	39	1,4
	GRIS CLAR	145	122	52	3
	NEGRE	71	68	37	0,9
	BLANC	201	156	99	5,4
D. CARRER MARC AURELI 2	GRIS FOSC	204	169	141	2,1
	GRIS CLAR	216	189	146	6
	NEGRE	135	104	83	0,6
	BLANC	221	216	223	7,6
E. CARRER MARC AURELI 3	GRIS FOSC	96	95	51	1,5
	GRIS CLAR	135	114	71	2,3
	NEGRE	43	53	42	0,8
	BLANC	215	170	113	6,4
F. CARRER MARC AURELI 4	GRIS FOSC	112	124	74	1,9
	GRIS CLAR	203	173	100	4,7
	NEGRE	94	83	79	1
	BLANC	219	198	135	7,8

Tau. 8.5. Dades dels valors dels píxels i mesures de luminància per a llum blanca

Amb aquestes dades ha estat possible calibrar la funció resposta que relaciona els valors dels píxels amb la luminància captada per la lent provinent de la superfície que es troba representada pel píxel en qüestió[31].

Per tal de quantificar la bondat de l'ajust de l'esmentada corba es calculen els següents valors estadístics:

<i>Estadístiques de la regressió</i>	
Coeficient de correlació múltiple	0,9920
Coeficient de determinació R^2	0,9840
R^2 ajustat	0,9201
Error típic (cd/m^2)	0,7220
Observacions	16

Tau. 8.6. Estadístiques de la regressió per a llum blanca

Aquests valors estadístics presenten un coeficient de correlació múltiple de 0,9920, notablement proper a la unitat, cosa que es tradueix en què la funció que se n'ha obtingut prediu amb un marge d'error suficientment petit el valor de luminància. De nou, el valor és positiu i en conseqüència també ho és la pendent de la funció.

En referència al coeficient de determinació, s'observa una petita davallada encara que el valor segueix sent molt proper a la unitat mantenint intacta qualitativament la bondat de l'ajust de la corba. Aquesta davallada es fa més palesa a l'hora de valorar el coeficient de R^2 ajustat, que disminueix sensiblement el seu valor en contextualitzar-lo amb la mostra. Malgrat tot, un 0,9202 es considera un valor acceptable, doncs suposa que les variables explicatives triades prediuen la major part de la mesura.

Per a aquesta part de la mostra l'error típic és menor que per a la corresponent a la il·luminació amb llum groga, i donat que la magnitud dels valors mesurats és semblant, també es pren com a vàlid.

Les dades estadístiques analitzades amb anterioritat fan esment a la corba ajustada amb els següents coeficients:

Coeficient	Independent	R^1	R^2	R^3	R^4
Valor	1,605	0,1477	-0,001992	8,479E-6	-5,653E-9
Coeficient		G^1	G^2	G^3	G^4
Valor		-0,7296	0,01147	-7,141E-5	1,532E-7
Coeficient		B^1	B^2	B^3	B^4
Valor		0,5607	-0,008402	4,634E-5	-8,893E-8

Tau. 8.7. Valors dels coeficients de la regressió per a llum blanca

I dels que se n'obté el següent anàlisi de residus:

Observació	1	2	3	4	5	6	7	8
Pronòstic (cd/m ²)	1,33	2,81	0,63	5,03	2,44	5,55	0,97	7,61
Mesura real (cd/m ²)	1,40	3,00	0,90	5,40	2,10	6,00	0,60	7,60
Residu (cd/m ²)	0,07	0,19	0,27	0,37	-0,34	0,45	-0,37	-0,01
Residu estàndard (cd/m ²)	0,23	0,57	0,84	1,14	-1,06	1,39	-1,14	-0,02
Residu relatiu (%)	5,22	6,19	30,23	6,83	16,30	7,50	61,52	0,09

Observació	9	10	11	12	13	14	15	16
Pronòstic (cd/m ²)	2,22	2,01	0,95	6,54	1,78	4,94	0,65	7,93
Mesura real (cd/m ²)	1,50	2,30	0,80	6,40	1,90	4,70	1,00	7,80
Residu (cd/m ²)	-0,72	0,29	-0,15	-0,14	0,12	-0,24	0,35	-0,13
Residu estàndard (cd/m ²)	-2,23	0,89	-0,47	-0,43	0,38	-0,75	1,07	-0,41
Residu relatiu (%)	48,08	12,52	18,81	2,19	6,44	5,19	34,69	1,70

Tau. 8.8. Anàlisi dels residuals de la regressió per a llum blanca

En aquest cas, l'observació més notòria ve conduïda per la columna dels errors relatius. S'aprecia una tendència, semblant a la de l'altra meitat de la mostra, del residu relatiu a presentar valors extremadament més grans en les mostres corresponents a una determinada cartolina. Mentre a les escenes il·luminades amb llum groga la cartolina que presentava aquesta tendència era la grisa fosca en el cas que ens ocupa és la de color negre. Només hi ha una observació fora de les esmentades que presenta un residu relatiu inusual, la que es correspon amb l'observació novena. Curiosament aquesta observació s'ha mesurat sobre la cartolina de color gris fosc. La conclusió conjunta és que per a valors de luminància baixos la corba presenta uns errors relatius més grans. És probable que això sigui degut a que un error absolut petit pot donar lloc a un residu relatiu de gran magnitud si la mesura real és suficientment petita.

Finalment, es presenta el gràfic de distribució de la probabilitat normal de la mostra. Novament, són dignes d'esment dos intervals: el que va de 0,6 a 1 cd/m² acumula una probabilitat del 21,875%, mentre que el que es troba acotat entre les 1,9 i les 2,3 cd/m² té una probabilitat del 12,5%. Si es tenen en compte ambdós trams la probabilitat de que la mesura pertanyi a aquests 0,8 cd/m² de marge és en total del 34,375. Podem concloure doncs que es tracta d'una mostra més heterogènia i dispersa que la corresponent a la il·luminació amb llum groga. En aquest darrer cas, la distribució també hauria de ser normal, no obstant i com ja hem comentat amb anterioritat, el nombre d'experiments de la mostra dificulta la tasca d'identificar aquesta distribució. Si ampliéssim el nombre d'experiments inclosos a la mostra la tendència es faria cada cop més palesa i podríem

obtenir una corba normal si en grafiquéssim l'histograma. El nombre de mesures s'ampliarà al llarg del desenvolupament dels estadis d'implantació i manteniment del projecte.

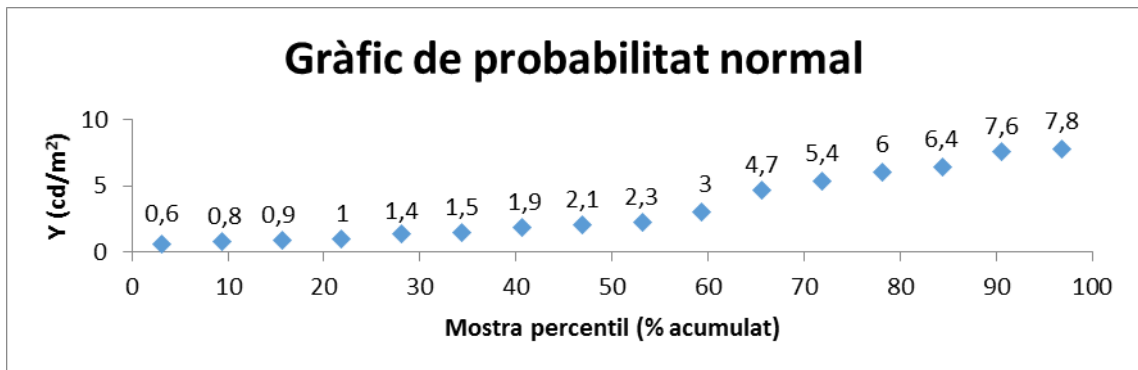


Fig. 8.2. Gràfic probabilitat normal de la regressió per a llum blanca

8.2. Segmentació de la imatge

Un cop definit l'algorisme a seguir per a la segmentació de les imatges cal quantificar la bondat d'aquest. Es comparen les àrees mesurades per l'algorisme amb les que es poden mesurar manualment ambdues mesurades en píxels. Malgrat que inicialment les superfícies de control corresponien a les quatre cartolines incloses a cada imatge, s'ha reparat en què l'objectiu final és la segmentació de voreres i calçades dins d'una imatge urbana. Per aquest motiu i havent-se centrat les imatges mostrals en voreres, per evitar problemes derivats del trànsit, finalment la superfície de control és la totalitat de la vorera.

Computacionalment, les àrees es determinen pel nombre de píxels que pertanyin al segment que inclogui la totalitat o major part de la vorera. Tant si el segment excedeix de la vorera com si no l'abasta per complet o qualsevol combinació de les anteriors, els píxels que seran comptabilitzats són única, exclusiva i completament tots els que composin el segment o macropíxel.

Les àrees calculades manualment resulten del tractament píxel a píxel de la imatge. S'han definit dues metodologies depenent de la complexitat de la superfície, de la precisió desitjada i del temps de què es disposi. En primer lloc, es determina el perímetre de la vorera sobre una imatge per, a continuació, fer un escorbrat per tota la imatge comprovant si cada píxel pertany al segment corresponent a la vorera alhora que està inclòs a l'àrea delimitada pel perímetre especificat.

Òbviament, quant més semblants siguin aquestes dues mesures més s'aproparà la segmentació a l'ideal de segmentació. S'assolirà aquesta fita quan l'àrea delimitada per l'usuari i el segment o macropíxel es corresponguin exactament. En els casos reals existeix un error absolut que es calcula com la diferència entre ambdues superfícies en número de píxels.

Una mesura una mica més complexa és l'error relatiu. Es tracta del percentatge que representa l'anteriorment esmentat error absolut sobre la totalitat de la mesura real, en aquest cas les superfícies calculades manualment. Expressa, doncs, l'error comés per cada píxel mesurat.

8.2.1. Bondat de la segmentació d'imatges il·luminades amb llum blanca

La presa de les dades, esmentades anteriorment, sobre les imatges que reflecteixen les escenes il·luminades amb lluminàries de color blanc presenten uns errors absoluts compresos entre els 1852 i els 44101 píxels. A priori i a grans trets, fa l'efecte que l'error absolut és de gran magnitud. No obstant, les mesures manuals i computacionals presenten valors substancialment més elevats. Això impossibilita l'extracció de conclusions sense consultar l'error relatiu, com es fa a continuació.

FOTOGRAFIA	MESURA MANUAL (píxels)	MESURA COMPUTACIONAL (píxels)	ERROR ABSOLUT (píxels)	ERROR RELATIU (%)
B. CARRER MARC AURELI	93660	91808	1852	1,98
D. CARRER MARC AURELI 2	71625	69628	1997	2,79
E. CARRER MARC AURELI 3	134985	90884	44101	32,67
F. CARRER MARC AURELI 4	249999	229681	20318	8,13

Tau. 8.9. Anàlisi dels errors absoluts i relatius de la segmentació per a llum blanca

Pel que fa a l'error relatiu podem observar que els valor percentuals es mantenen per sota dels tres punts en els dos primers casos. Als dos casos restants l'error es comporta de manera molt diferent. Per tant, no es pot afirmar que els errors absoluts siguin proporcionals a la grandària de les dades mesurades.

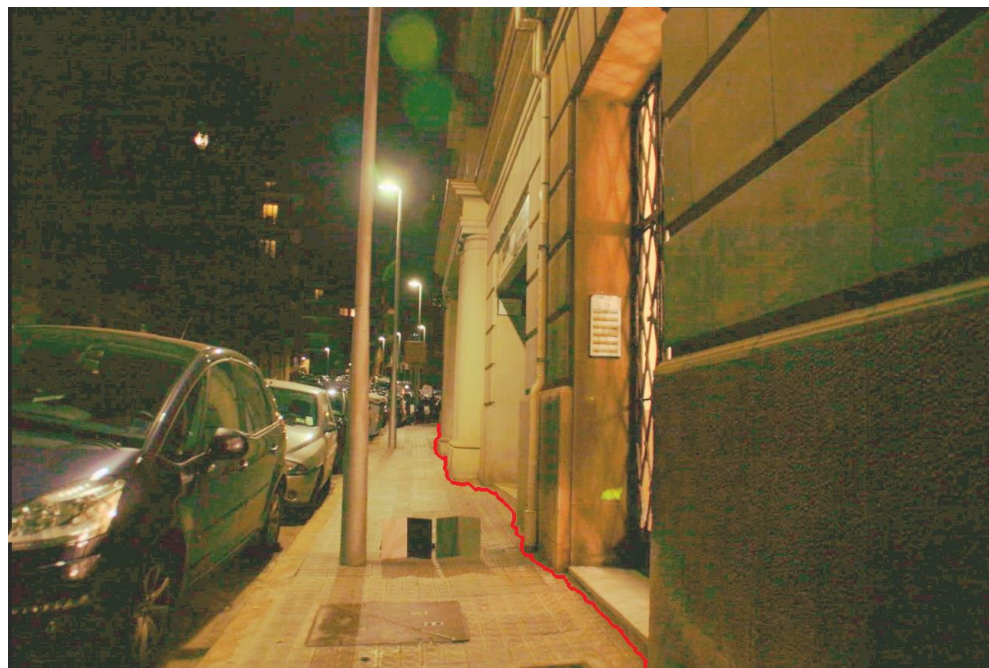


Fig. 8.3. Segmentació esperada de l'escena il·luminada amb llum blanca

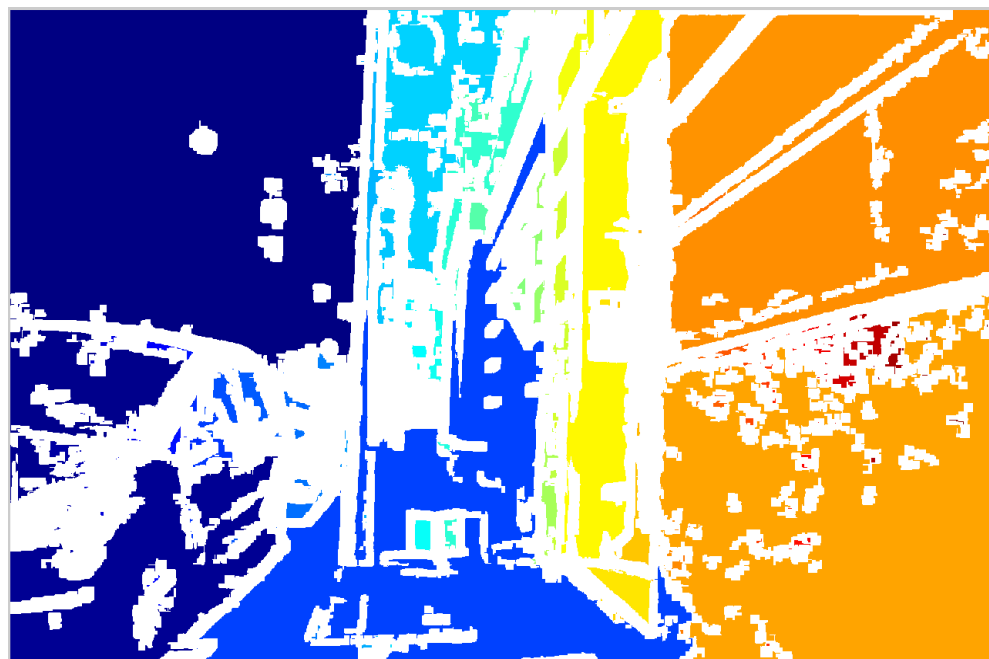


Fig. 8.4. Imatge segmentada del carrer Marc Aureli

En el cas E és degut a que la textura de la vorera i part de la façana són tan semblants que l'algoritme de segmentació no ha estat capaç de diferenciar-les i les ha inclòs en el mateix segment de la imatge. La part de la façana semblant en textura a la vorera presenta una àrea significativa, d'aquí que l'error pateixi un increment substancial.



Fig. 8.5. Segmentació esperada de l'escena il·luminada amb llum blanca

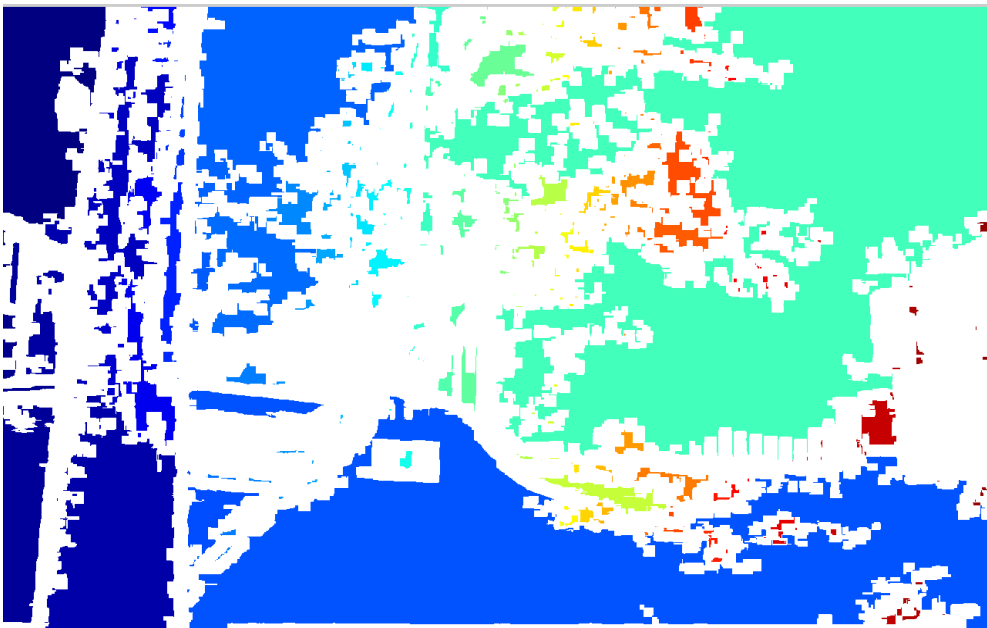


Fig. 8.6. Segmentació d'imatge que presenta segments per les ombres

En el cas F el motiu de l'increment de l'error és que, en tractar-se d'una vorera molt gran, existeixen parts amb un nivell d'il·luminació alt mentre que d'altres es troben sumides en la foscor. El contrast entre aquestes dues parts de la mateixa vorera és prou elevat com per confondre l'algorisme de segmentació que n'identifica dos segments en comptes d'un únic macropíxel. Queda palesa l'existència de dos factors que poden afectar a la bondat dels resultats de segmentació: la semblança de les textures de l'acera i els elements confrontants i l'efecte de la il·luminació (i ombres) sobre la identificació de les textures.

8.2.2. Bondat de la segmentació d'imatges il·luminades amb llum groga

De la segmentació de les imatges que representen les escenes il·luminades amb focus de llum groga no se n'obtenen resultats allunyats dels anteriors. Com es pot veure a continuació l'ordre dels errors absoluts augmenta. En aquests quatre casos l'error es troba comprès entre valors de 35977 i de 295862 píxels. El número de píxels mesurats en aquesta part de l'experiment varia en un rang que inclou des dels 125457 fins a un màxim de 635490 píxels, per tant també el rang de les mesures és major. De nou, és difícil aventurar cap conclusió sense observar prèviament els errors relatius.

FOTOGRAFIA	MESURA MANUAL (píxels)	MESURA COMPUTACIONAL (píxels)	ERROR ABSOLUT (píxels)	ERROR RELATIU (%)
H. CARRER VALLMAJOR	125457	89480	35977	28,68
C2. CARRER TAVERN	508647	212785	295862	58,17
D2. CARRER PLATÓ	310855	225612	85243	27,42
E2. CARRER MONTECASSINO	635490	514235	121255	19,08

Tau. 8.10. Anàlisi dels errors absoluts i relatius de la segmentació per a llum groga

Mitjançant l'observació de l'error relatiu, es constata un important salt quantitatiu. A la totalitat de les mesures d'aquest apartat es repeteix l'efecte ja esmentat pel cas E de l'apartat anterior:



Fig. 8.7. Segmentació esperada de l'escena il·luminada amb llum groga

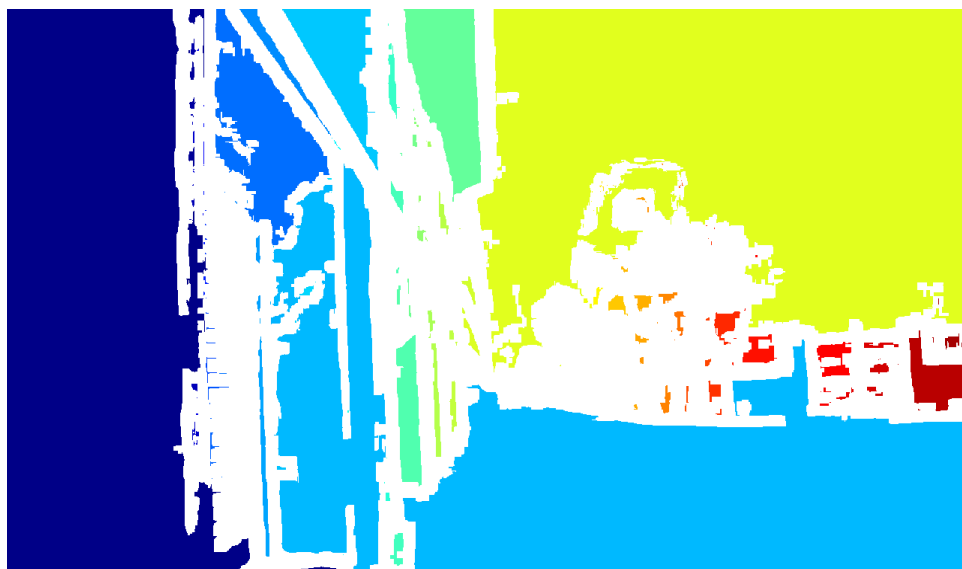


Fig. 8.8. Segmentació d'imatge que no diferencia la calçada de la vorera

Es conclueix que la il·luminació en groc fa inclús més difícil la diferenciació entre les diferents textures presents a les imatges.

8.2.3. Conclusió conjunta

A mode de conclusió es pot dir que el software de segmentació de la imatge no es troba en un estadi definitiu de desenvolupament, són necessaris certs ajustos per tal de dotar-lo de funcionalitat totalment autònoma. Malgrat que ha demostrat una elevada fiabilitat, l'existència de certes circumstàncies sota les quals no es comporta de manera predictable, la supervisió del corresponent tècnic de perfil alt és necessària. En conjunt s'han identificat dos factors de risc a l'hora de determinar els diferents segments de les imatges a tractar: la variació d'il·luminació (i ombrejat) dins de la mateixa superfície, que pot portar a identificar-la com a més d'un segment, i la similitud de textures entre superfícies veïnes que comporta el risc de classificar els píxels que les componen com pertanyents a un mateix segment. Aquest últim factor es veu potenciat per la il·luminació amb llum groga que dificulta la identificació de les diferents tipologies de textura presents a les imatges.



Fig. 8.9. Imatge HDR d'escena il·luminada amb llum groga

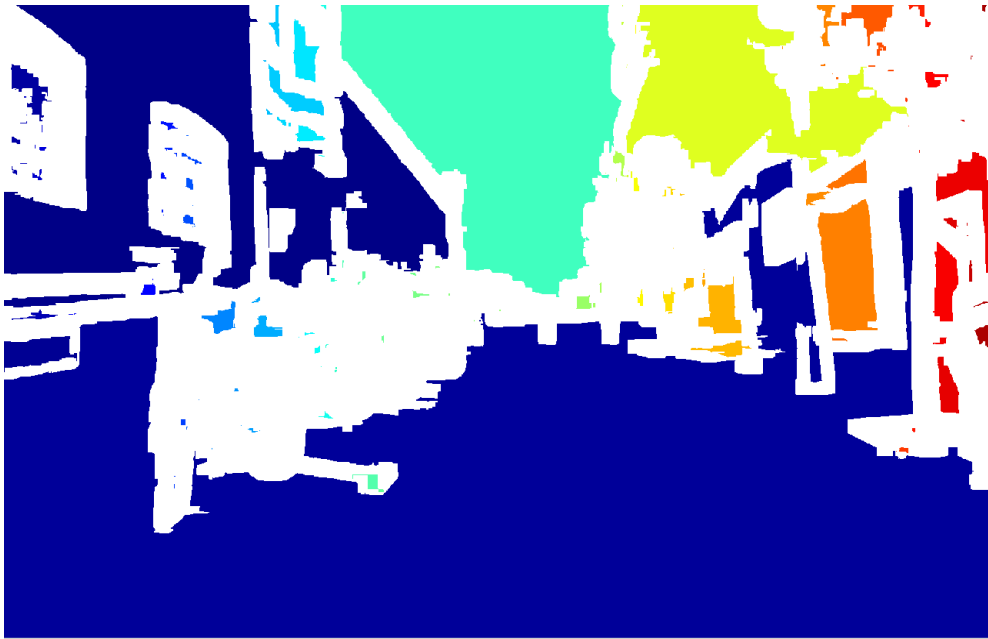


Fig. 8.10. Segmentació d'imatge que no diferencia la vorera de les façanes

9. Aplicació general a l'enllumenat públic. Viabilitat tècnica

Fins a aquest punt els sistemes i processos descrits fan referència únicament a l'anàlisi d'escenes puntuals o aïllades. Al present apartat es presenten les metodologies adients per aplicar el sistema dissenyat al cas particular d'estudi d'un municipi mitjà. Sota aquesta hipòtesi es desenvolupa una metodologia aplicable així com s'analitza críticament la seva viabilitat.

9.1. Metodologia proposada

Per a la implantació del projecte a nivell operatiu es proposa la metodologia que s'exposa a continuació:

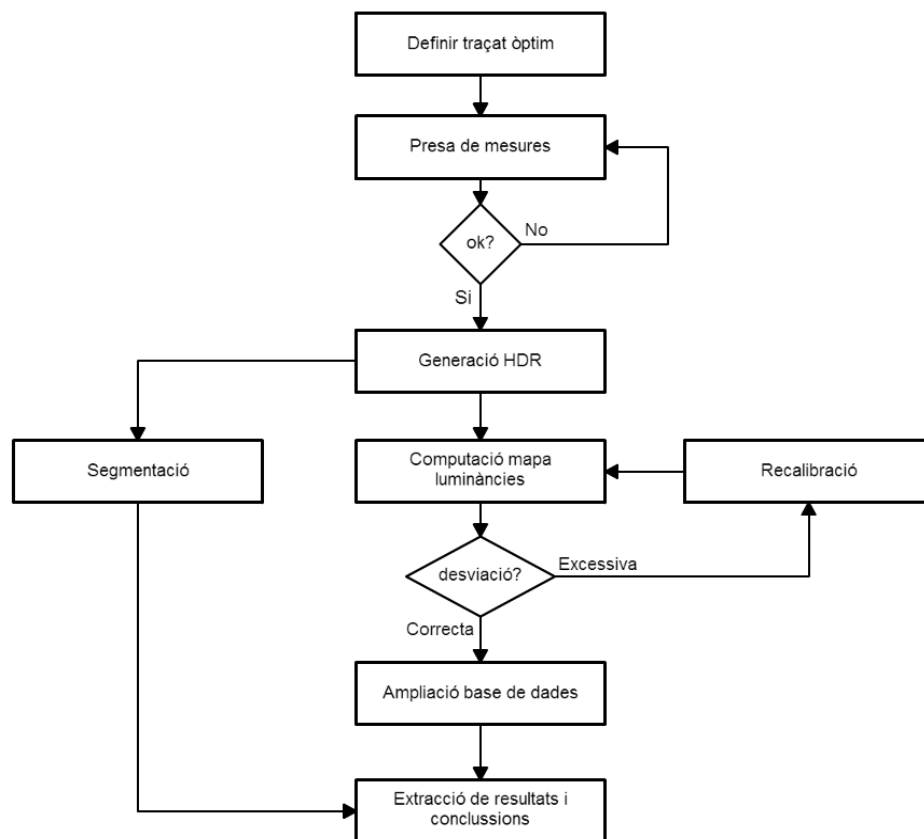


Fig. 9.1. Esquema de flux del procés d'aplicació a l'enllumenat públic

El corresponent operari ha de recórrer els punts d'interès per a l'estudi, a priori es recomana fer servir com a retícula la que presenta de manera natural el traçat dels carrers on les cantonades es correspondrien amb els nodes, afegint-hi almenys un node extra al punt mig de cada carrer comprès entre dues cantonades. També, en aquest aspecte, és recomanable dur a terme un estudi previ del recorregut òptim a realitzar per l'operari. En general el recorregut òptim, en la mesura que el traçat dels carrers ho permetin s'aproxima per l'esquema de la següent figura:

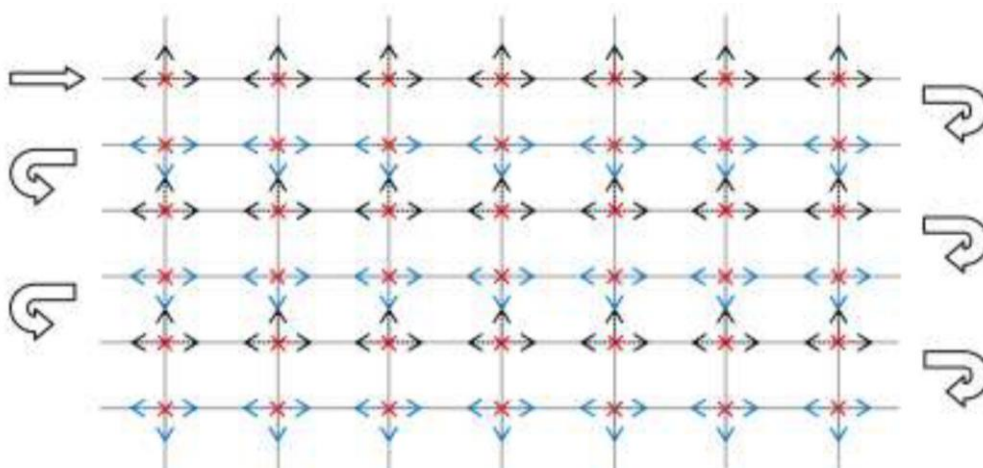


Fig. 9.2. Exemple de recorregut òptim

Resulta prou evident que els municipis que presenten un carrers disposats en un quadrícula perfecte són pocs per no dir cap. S'haurà, doncs, d'adaptar aquest traçat ideal a la disposició dels carrers de cada municipi en la mesura del que la geometria ens permeti. A continuació, es pot observar un exemple d'adaptació del traçat ideal a un municipi que no presenta una distribució en forma de quadrícula perfecta:



Fig. 9.3. Exemple d'adaptació del recorregut òptim al traçat real d'un municipi

Com es pot observar en aquesta adaptació sobre el terreny real per preparar el treball de camp, no és necessari recórrer el total d'interseccions del municipi. El motiu és que, un cop dutes a terme les mesures corresponents a les interseccions que s'hagin inclòs al recorregut, els valors de la resta es poden obtenir mitjançant interpolació dels valors de les interseccions colindants.

És de vital importància cerciorar-se que l'operari disposi de la formació adient per prendre les mesures corresponents a cadascun dels nodes del traçat o recorregut marcat. Això és un domini de la càmera suficient per tal d'imposar els paràmetres descrits per a la presa de mesures prèviament descrits, la capacitat de fusionar les imatges amb diferents exposicions en una única imatge HDR i per fer servir el software desenvolupat in situ per extreure'n els corresponents mapes de luminàncies i les imatges degudament segmentades.

A continuació, es requereix el corresponent treball de despatx o oficina que consisteix a sotmetre les imatges al processos computacionals adients. Amb els jocs d'imatges obtingudes es generen les imatges HDR, i són aquestes últimes, a partir de les quals es computen tant els mapes de luminàncies com les imatges segmentades.

Aquest procediment s'ha de repetir regularment per tal de fer un seguiment rigorós de l'estat de conservació del servei d'il·luminació de la zona urbana sotmesa a estudi. Així mateix, és recomanable que periòdicament es comprovi la desviació de la calibració tornant

a comparar les mesures extretes mitjançant el software amb les obtingudes amb el luminancímetre fent servir les cartolines.

Aquesta comprovació de la calibració és recomanable fer-la com a mínim un cop cada dos anys, parant especial atenció a la desviació de les noves mostres respecte de les acumulades amb anterioritat. En cas que la desviació no sigui representativa, les mesures obtingudes es poden fer servir per ampliar la base de dades i augmentar la precisió de la calibració ja existent. En cas contrari, és necessari recalibrar el sistema sense tenir en compte les dades obtingudes prèviament, és a dir, fent servir només les obtingudes amb la darrera comprovació.

En cas de fer-se necessària alguna modificació al programari es requereix de l'actuació d'algun programador amb nocions de visió computacional i que conegui el llenguatge de programació matlab. Atès que el codi està comentat amb detall, el seu seguiment no es fa difícil. Tanmateix és una bona praxis fer una còpia de seguretat de l'estat original del programa abans de procedir a modificar-lo. També convé comentar les modificacions que es duguin a terme amb el motiu que les ha originat, el nom del programador i la data per a futures consultes.

9.2. Avantatges i inconvenients

L'avantatge principal de la implantació del present projecte rau en el nivell de detall de la informació adquirida. Malgrat que, com s'ha fet palès, és indispensable l'ús del luminancímetre, el sistema desenvolupat permet no haver-ne de disposar permanentment. De fet, fora del procés de calibració el luminancímetre es fa dispensable. Per tant, es podria dir que el motor computacional desenvolupat permet replicar la funcionalitat d'un luminancímetre fent que només sigui necessari el lloguer puntual del mateix o bé reduir molt notablement (a la unitat) el nombre d'aquests aparells necessaris.

Un altre avantatge del projecte és que permet reduir costos d'oportunitat donat que una interfície gràfica prou intuïtiva permet que sigui un operari amb un nivell de coneixements bàsic, després de la corresponent formació, qui s'encarregui de la presa de mesures deixant lliures als tècnics d'alt perfil per a la interpretació de les mateixes i la realització dels estudis i propostes tècniques corresponents.

La contrapartida més òbvia és que, com a qualsevol projecte, s'ha de realitzar una inversió inicial i, en aquests cas específic, es dona a diversos nivells: econòmic, de temps i de formació, per exemple. Tot i això, si no es realitza la inversió econòmica corresponent al projecte l'alternativa és invertir en un luminancímetre, bastant més car. En qualsevol cas la inversió inicial no és crítica i l'horitzó del payback no és gens llunyà gràcies als estalvis que se'n suposen.

Un mínuscul desavantatge més és la pèrdua de precisió a l'hora de fer les mesures, però, tal com s'ha observat, la pèrdua és insignificant als nivells als que s'està treballant. La calibració no es pot considerar ni un avantatge ni un inconvenient, ja que en un luminancímetre comú també és necessari dur a terme un procés de calibració periòdicament (l'aparell també es troba sotmès a desgast).

9.3. Aplicació econòmica

En aquest apartat es desenvolupa l'estudi d'aplicabilitat econòmica. Ja s'ha explicat a l'apartat anterior que els municipis estan obligats pel RD1890/2008 a fer les mesures de nivells lumínics sobre els sistemes d'enllumenat públic corresponentment, es plantegen les següents opcions: fer servir un luxímetre mòbil, o bé, realitzar les mesures mitjançant l'ús de càmera fotogràfica junt amb el software desenvolupat.

La primera opció comporta certes implicacions: l'adquisició del sistema a l'efecte, que inclou no només el propi luxímetre mòbil sinó a més el vehicle adient on instal·lar-lo i fer-ne les calibracions corresponents. La segona opció suposa l'atribució d'un vehicle pels desplaçaments, les mateixes calibracions. Es considera que les xifres no difereixen prou com per ser contemplades.

A l'hora de tenir en compte les figures econòmiques, cal parar esment a la natura de les dades que en resultaran de cadascun dels processos. Mentre que en ambdós casos s'obtindrà un plànol del municipi que descriurà els nivells lumínics dels carrers, mitjançant la interpolació de les mesures dutes a terme, si l'ajuntament opta per la segona opció existirà un resultat més: els mapes de luminàncies de cadascuna de les escenes on s'hagi produït la presa de dades. Encara que a priori no sembli un valor afegit, a l'hora de determinar els motius de desviació respecte els nivells lumínics acceptables en cada escenari pot ser de

gran utilitat. Per tant, la diferència substancial rau en la fiabilitat de les dades i el cost econòmic.

En endavant, es procedeix a comparar quantitativament el cost d'ambdues opcions. Primerament, es calculen els costos dels recursos personals que s'hi dediquen. En primer lloc es planteja un cas tipus que és el de l'auditoria d'una ciutat petita. Els números aproximats són els següents:

MUNICIPI TIPUS	NÚMERO D'HABITANTS	PUNTS DE LLUM	EXTENSIÓ (km ²)
CIUTAT PETITA	20000-25000	6000-7000	16

Tau. 9.1. Dades municipi tipus corresponent a una ciutat petita

A aquestes dades s'hi afegeixen certes dades estimades de l'experiència de la presa de dades. Fan referència al cost que suposa la recollida de dades i el temps invertit en aquest treball de camp:

NITS	HORES/NIT	DESPLAÇAMENT	PRESA D'IMATGES	POSICIONAT CÁMERA	PARADES	TOTAL
14	6	20 hores	7,2 minuts	3,2 minuts	366	84 hores

Tau. 9.2. Dades quantitatives treball de camp

Les aproximacions de la taula anterior tenen en compte factors com el trànsit, semàfors, espera per evitar il·luminacions intruses, etc. No obstant, tant sols quantifica el treball de camp per a l'opció de generar el mapa lumínic amb la càmera fotogràfica. A aquest cost temporal cal afegir la inversió en hores que s'ha de dur a terme en forma de treball d'oficina:

TRANSFERÈNCIA IMATGE I GENERACIÓ HDR	CREAR MAPA LUMINÀNCIA I SEGMENTACIÓ	INTERPRETACIÓ I POLIT DETALLS	TOTAL
24 hores	60 hores	100hores	184 hores

Tau. 9.3. Dades quantitatives treball d'oficina

El resultat dels càlculs dels costos comparatius, sense incloure cap benefici ni costos generals ni cap tipus d'impost, entre les dues opcions pel transcurs d'una auditoria es presenten a la següent taula:

TREBALL	LUXÍMETRE MÒBIL		CÀMERA	
	HORES	COST [€]	HORES	COST [€]
CAMP	60	1740	84*2operaris	4872
OFICINA	90	2610	92*2operaris	5336
TOTAL	150	4350	352	10208

Tau. 9.4. Comparativa de resultats de les dues opcions plantejades

Resulta evident d'aquests resultats que, un cop feta la inversió inicial per crear el programa, la opció de fer servir la càmera resulta notablement més cara. El cost adicional s'estima en aproximadament 5860 euros per auditoria. Val a dir que no s'han tingut en compte factors de pes, tals com el preu del luxímetre ni del vehicle que l'integri.

També cal comentar que la inversió del desenvolupament del programa no s'amortitzaria. No obstant, les dades que en resulten d'aquest segon sistema és de major qualitat i aporta una informació més acurada i amb un nivell de profunditat molt més gran. Per últim, és necessari remarcar que els càlculs aquí reflectits fan referència sempre als costos i no pas als preus finals.

10. Pressupost

Aquest apartat quantifica la inversió necessària pel projecte que s'ha desenvolupat. El present pressupost parteix del supòsit que s'ha optat per fer servir una càmera fotogràfica com a luminancímetre, amb el posterior processat mitjançant el software desenvolupat.

Per avaluar el pressupost en primer lloc es calculen els costos dels recursos personals que s'hi dediquen. En aquesta part de l'estudi es tindran en consideració quatre treballadors: un cap de projecte, un enginyer júnior, un programador i un encarregat de mantenir el programa. Aquests dos darrers treballadors seran els encarregats de fer servir les dades compilades per desenvolupar un programa que generi un mapa de luminàncies i una segmentació de la imatge i mantenir-lo respectivament. El resultat dels càlculs econòmics pel transcurs del projecte es presenten a la següent taula:

TREBALLADOR	PERSONES	COST (€/h)	TEMPS (h)	COST (€)
DIRECTOR DE PROJECTE	1	80,00	40	3200,00
ENGINYER JÚNIOR	1	30,00	450	13500,00
PROGRAMADOR	1	30,00	200	6000,00
TÈCNIC MANTENIMENT	1	25,00	50	1250,00
TOTAL				23950,00

Tau. 10.1. Costos de personal

Per aquest mateix cas es calculen els costos indirectes. Es tindran en compte les despeses relacionades tant amb les llicències informàtiques com les derivades dels aparells de mesura o dels desplaçaments imputables al desenvolupament del programari:

CONCEPTE	CUANTITAT	COST (€/U)	VIDA ÚTIL (%)	COST TOTAL (€)
LLICÈNCIA WINDOWS	4	45,00	2,5	4,50
LLICÈNCIA OFFICE	2	60,00	5	6,00
LLICÈNCIA MATLAB	1	163,00	100	163,00
LLOGUER LUMINANCÍMETRE	1	50,00	100	50,00
DESPLAÇAMENTS	70 (km)	0,19 (€/km)	100	13,30
TOTAL				236,80

Tau. 10.2. Costos anuals de material i llicències

D'aquesta taula és important tenir en compte que el cost del lloguer del luminancímetres s'haurà de considerar bianualment i no tan sols com part de la inversió inicial.

Fins a aquest punts els càlculs només han tingut en compte els costos del projecte pròpiament. El següent que s'ha d'aplicar és el percentatge de benefici industrial que obtindrà el propietari de l'empresa auditora que oferta aquest estudi. Es considera aquest factor del vint per cent. Sobre el total acumulat dels costos i el benefici industrial s'aplicarà l'increment corresponent a l'impost sobre el valor afegit, en el cas del servei que ens ocupa li correspon el tram del vint-i-un per cent. A la taula a continuació es detallen aquestes quantitats:

CONCEPTE	PERCENTATGE (%)	TOTAL (€)
COSTOS PERSONAL	-	23950,00
COSTOS INDIRECTES	-	236,80
COSTOS TOTALS	-	24186,80
BENEFICI INDUSTRIAL	20	4837,36
ACUMULAT	-	29024,16
IVA	21	6095,07
TOTAL	-	35119,23

Tau. 10.3. Preus totals amb benefici i IVA

Cal fer esment a l'elevat cost de personal enfront de la minsa inversió en costos indirectes, propi d'un projecte de desenvolupament de software. En definitiva, s'observa que el preu per finalitzar el projecte és de poc més de 35000 euros. D'aquests, el benefici industrial supera àmpliament els 4500 euros mentre que els impostos ascendeixen a gairebé 6100 euros. Els costos aquí presentats es poden amortitzar mitjançant la comercialització del programari amb els estudis previs adients.

11. Impacte mediambiental

No només a qualsevol projecte, si no a cadascuna de les seves fases, ja sigui anterior o posterior a la implantació, és un requisit l'estudi dels possibles impactes mediambientals. En aquest sentit cal diferenciar dos tipologies d'impactes del projecte: els derivats del seu desenvolupament i els causats per la seva aplicació.

Val a dir que els impactes del primer tipus, per la tipologia de projecte que s'estudia, són menystenibles en comparació amb els pertanyents a la segona tipologia. Els motius són dos: en primer lloc no són comparables els consums energètics de l'auditoria duta a terme amb el potencial estalvi energètic de l'enllumenat urbà d'un ciutat.

El reduir els nivells lumínics als especificats per la corresponent normativa no només impactarà positivament sobre el consum, sinó que també tindrà un efecte positiu en els nivells de llum intrusa i de contaminació lumínica. D'aquesta manera, l'ecosistema dels municipis, tant la flora com la fauna, com els propis habitants milloraran la seva qualitat de vida.

D'altra banda, també es pot donar el cas que els nivells lumínics inicials del municipi es trobin per sota dels fixats per normativa. En aquest cas el consum es veurà incrementat deixant intacte l'ecosistema i els nivells de contaminació lumínica si les modificacions en duen a terme adientment. La repercussió positiva d'aquest increment en el consum es notarà en la seguretat tant vial com personal.

Això no és tot; el seguiment d'aquest estudi permetria una optimització del processos de manteniment relacionats directament amb l'enllumenat públic. Això es traduirà en una vida útil dels elements fungibles del sistema d'enllumenat municipal notablement més llarga i, en última instància, en un menor consum dels elements anteriorment esmentats. Si es redueix el consum d'aquests elements es redueix quantitativament la petjada de CO₂ atribuïble a la fabricació dels mateixos.

No obstant, la quantificació de l'estalvi energètic es fa impossible donat que depèn de l'estat inicial del sistema d'il·luminació a cada municipi. És per aquest motiu que es procedeix a quantificar la petjada de CO₂ corresponent al desenvolupament de l'auditoria

lumínica. A tal efecte es compararan els impactes ambientals de l'auditoria fent servir el luxímetre-GPS i fent servir la càmera fotogràfica i el software.

Els motius d'impacte ambiental són molt diversos, però pel cas específic que ens ocupa els dividirem en tres grans grups: les emissions derivades de la fabricació de l'instrumental fet servir, les emissions relacionades amb el mix energètic de generació elèctrica per alimentar els aparells electrònics i, en darrer lloc, les degudes als desplaçaments.

En referència al primer grup es té en compte que l'instrumental aplicat en ambdós casos és idèntic llevat dels sensors luxomètrics i la càmera fotogràfica. Les petjades d'aquest dos aparells electrònics s'han considerat equivalents, especialment en comparació amb la magnitud de les emissions de CO₂ atribuïbles a la fabricació de l'automòbil emprat. Així doncs, pel que fa a les emissions derivades de la fabricació de l'instrumental el canvi entre les dues modalitats d'auditoria no és apreciable.

Pel que fa a l'impacte que té l'alimentació dels aparells electrònics s'han pres com a supòsits els temps invertits en treball d'oficina de la taula 9.4, un consum aproximat de 100 watts per ordinador i unes emissions de 380 grams de CO₂ per kilowatt hora, que correspon a la mitja europea a la actualitat.

En quant a les emissions que es deuen als desplaçaments només contemplen els desplaçaments interns al municipi, ja que els desplaçament intermunicipals en el mateix vehicle es reflexaran en la mateixa quantitat d'emissions sigui quina sigui la tipologia de l'auditoria. El recorregut per l'interior del municipi és consistentment menor en el cas de l'auditoria que fa servir la càmera fotogràfica, de 24 quilometres en front dels 35 corresponents al cas del luxímetre-GPS. Es consideren unes emissions de 130 grams de CO₂ per quilòmetre recorregut en vehicle.

A la següent taula es troben representades les emissions de gasos anteriorment esmentades:

	Auditories	
	Luxímetre-GPS	Càmera
Hores de treball d'oficina	90	92
Número d'ordinadors	1	2
Potència elèctrica consumida per ordinador	100 W	
Energia elèctrica total consumida	9 kWh	18,4 kWh
Emissions per kWh elèctric	380 gr CO ₂	
Emissions per alimentació elèctrica	3,42 kg CO ₂	6,99 kg CO ₂
Desplaçaments intramunicipals	35 km	24 km
Emissions per km recorregut	130 gr CO ₂	
Emissions per desplaçaments	4,55 kg CO ₂	3,12 kg CO ₂
TOTAL EMISSIONS	7,97 kg CO ₂	10,11 kg CO ₂

Tau. 11.1. Càlcul de la petjada de CO₂

D'aquesta taula resum se'n pot concloure que, malgrat que les emissions per desplaçament són considerablement majors, les emissions atribuïbles a l'alimentació elèctrica per l'auditoria fent servir la càmera fotogràfica ascendeixen a més del doble que les de l'auditoria fent servir el luxímetre-GPS. En definitiva, l'opció de fer servir el luxímetre amb GPS incorporat suposa més de 20 punts percentuals d'estalvi en emissions de CO₂.

Val a recordar que, com ja s'ha esmentat amb anterioritat, l'estat inicial de l'enllumenat i la optimització del cicle de vida dels materials fungibles són dos factors claus a l'hora de prendre una decisió final. Malauradament, ambdós factors varien en dependència del municipi a estudiar i no es poden estimar a priori. És per aquest motiu que resulta recomanable una inspecció directa prèvia amb la corresponent avaluació qualitativa per tal d'assessorar en la presa d'aquesta decisió.

12. Futures vies d'actuació recomanades

Degut a l'abast en que s'emmarca el present projecte no s'han estudiat diversos factors que podrien ser interessants de cara a ampliar la seva funcionalitat. A continuació se'n detallen de manera genèrica possibles línies d'ampliació del programari desenvolupat, es divideixen en dos blocs.

12.1. Manteniment

Aquest bloc ja s'ha comentat en anteriors apartats. Consisteix, a grans trets, a continuar prenent les mesures amb el luminancímetre i la càmera fotogràfica de tal manera que es puguin afegir a la base de dades per tal d'ajustar cada vegada amb major precisió la corba resposta de la càmera en qüestió. Si en algun moment les dades estadístiques presenten una desviació tal que deixin de poder ser considerades part de la mateixa mostra es considerarà que el factor de deteriorament de la màquina ha assolit cotes crítiques. Arribats a aquesta situació, estadísticament la càmera s'ha degradat fins al punt que la desviació obliga a considerar que no es tracta de la mateixa càmera i el procediment a seguir és el de definir una nova corba de resposta sense tenir en compte cap de les dades obtingudes amb anterioritat.

12.2. Ampliació

Aquest segon bloc no s'ha esmentat amb anterioritat donat que l'abast del projecte no l'inclouïa. No obstant, pot resultar útil una breu visió dels possibles punts de desenvolupament del software per tal de facilitar-ne una continuïtat. A continuació, es detallen les possibles actuacions en aquest sentit:

- Ampliació de la base de dades de corbes resposta tenint en compte tots els factors que hi incideixen, és a dir l'aparell fotogràfic, els formats de les imatges capturades, els algoritmes fets servir per fusionar els jocs d'imatges en un format HDR, etcètera.
- Ús de les metadades de geolocalització (actualment incorporada de sèrie en moltes càmeres i d'altres aparells com smartphones capaços de capturar imatges) per tal de marcar sobre un plànol o mapa la localització, amb major o menor precisió, de

les mesures presses. D'aquesta manera l'eina permetrà donar una idea general de l'estat de les instal·lacions lumíniques d'un municipi mitjançant una única representació gràfica estàtica.

- Ús de les metadades de data i hora incloses en els principals formats d'imatge per tal de dotar els plànols o mapes esmentats al punt anterior de cert sentit temporal o cronològic. Així s'aconsegueix ampliar la funcionalitat del punt anterior amb cert dinamisme que pot resultar útil o interessant des del punt de vista del manteniment i l'estudi del consum i reposició dels elements fungibles de la instal·lació.
- Desenvolupament i incorporació dels algorismes d'interpolació que permetin estimar aproximadament els valors de luminància d'aquells punts d'interès a on no hagi estat possible prendre les dades pertinents. Amb aquesta incorporació es pretén donar una imatge més completa de l'estat lumínic de les instal·lacions dels municipis sotmesos a estudi sense haver d'incrementar substancialment el procés de presa de dades.
- Estudiar la possibilitat de migrar tot el sistema (inclosa la presa d'imatges) a una aplicació de telefonia mòbil que estigui disponible a les principals plataformes i que permeti fer un estudi preliminar qualitatiu ja sigui d'una sola escena o d'un municipi sencer eliminant la necessitat i molèstia de portar a sobre luminancímetres i/o càmeres fotogràfiques encara que representi un sacrifici pel que fa a l'exactitud de les mesures.
- Desenvolupar tot el programari per a que sigui accessible des del núvol. Aquesta darrera fase, malgrat que d'una complexitat tècnica superior, permetria un estalvi en les hores invertides per l'usuari considerable. També ampliaria la usabilitat i accessibilitat tant pel procés de càrrega i descàrrega dels fitxers com per fer consultes ràpides en línia.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] WEB HDR. Roll your own. Berlín, setembre de 2012.
[<http://www.jaloxa.eu/webhdr/upload.shtml>, 29 de setembre de 2012].
- [2] REAL DECRETO 1890/2008, de 14 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus Instrucciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07.
- [3] INSTRUCCIÓN TÉCNICA COMPLEMENTARIA EA-01 a EA-07 Eficiencia Energética.
- [4] WIKIPEDIA. Cámara fotográfica. Espanya, juny 2012.
[https://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%A1mara_fotogr%C3%A1fica, 3 novembre de 2012].
- [5] BONALS, L. A. Transmissió de calor : teoria, Barcelona: Edicions UPC, 1994.
- [6] DEBEVEC, P. E. AND MALIK, J. Recovering High Dynamic Range Radiance Maps From Photographs. In Proceedings of ACM SIGGRAPH (1997), pp. 130-135.
- [7] TOMPSETT, M. F., AMELIO, G. F., BERTRAM, W. J., BUCKLEY, R. R., MACNAMARA, W. J., MIKKELSEN, J. C. AND SEALER, D. A. Charge-coupled imaging devices: Experimental results. IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 18, No. 11 (1971), pp. 992–996.
- [8] WIKIPEDIA. Bayer filter. UK, juny 2012.
[https://en.wikipedia.org/wiki/Bayer_filter, 3 de desembre de 2012].
- [9] WIKIPEDIA. Dichroic prism. UK, juny 2012.
[https://en.wikipedia.org/wiki/Dichroic_prism, 7 de desembre de 2012].
- [10] WIKIPEDIA. Interference filter. UK, juny 2012.
[https://en.wikipedia.org/wiki/Interference_filter, 9 de desembre de 2012].

- [11] WAKERLY, J. F. Diseño digital: principios y prácticas, México: Pearson Educación, 2001.
- [12] KESTER, W. Understand SINAD, ENOB, SNR, THD, THD+N, and SFDR so you don't get lost in the noise floor, Montana, USA: Analog Devices, 2009.
- [13] MANN, S. AND PICARD, R. W. Being 'undigital' with digital cameras: Extending dynamic range by combining differently exposed pictures. In Proceedings of IS&T 46th annual conference (May 1995), pp. 422–428.
- [14] DEBEVEC, P. E. AND MALIK, J. Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs. In Proceedings of ACM SIGGRAPH (1997), pp. 369-378.
- [15] MITSUNAGA, T. AND NAYAR, S. Radiometric Self Calibration. In Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Vol. 1 (June 1999), pp. 374-380.
- [16] WIKIPEDIA. Image segmentation. UK, juny 2012.
[en.wikipedia.org/wiki/Image_segmentation, 12 d'abril de 2013].
- [17] LUESSI, M., EICHMANN, M., SCHUSTER, G. M. AND KATSAGGELOS, A. K. Framework for image thresholding. Journal of Electronic Imaging, Vol. 18 (2009), pp. 13004+.
- [18] OTSU, N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 9, No. 1 (1979), pp. 62-66.
- [19] BAILEY, K. Numerical Taxonomy and Cluster Analysis. Typologies and Taxonomies (1994), p. 34.
- [20] HARTIGAN, J. A., WONG, M. A. Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm. Journal of the Royal Statistical Society, Series C 28, Vol. 1 (1979), pp. 100–108.
- [21] MACQUEEN J. B. Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations. In Proceedings of 5-th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Berkeley, University of California Press (1967), pp. 281-297.
- [22] ZIOU, D. AND TABBONE, S. Edge detection techniques: An overview. International Journal of Pattern Recognition and Image Analysis, Vol. 8, No. 4 (1998) pp. 537–559.
- [23] CANNY, J. A Computational Approach To Edge Detection. IEEE Transactions, Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 8, No. 6 (1986), pp.679–698.

- [24]** SOBEL, I. AND FELDMAN, G. A 3x3 Isotropic Gradient Operator for Image Processing, presented at a talk at the Stanford Artificial Project (1968).
- [25]** WEB HDR. Camera Calibration. Berlín, setembre de 2012.
[<http://www.jaloxa.eu/webhdr/calibrate.shtml>, 1 de juliol de 2013].
- [26]** CANON ES. Canon EOS 300D. Espanya, 2012.
[http://www.canon.es/support/consumer_products/products/cameras/digital_slr/eos_300d.aspx?type=manuals, 20 de setembre de 2013].
- [27]** KONICA MINOLTA. Minolta LS 100. Singapur, 2012.
[<http://sensing.konicaminolta.asia/products/ls-100-luminance-meter/>, 25 de setembre de 2013].
- [28]** PRAT BARTÉS, A. Métodos estadísticos: control y mejora de la calidad, Barcelona: Edicions UPC, 2004.
- [29]** MATHWORKS. Texture Segmentation Using Texture Filters. USA, 2014.
[<http://es.mathworks.com/help/images/examples/texture-segmentation-using-texture-filters.html>, 3 de febrer de 2014].
- [30]** MATHWORKS. Region properties. USA, 2014.
[<http://es.mathworks.com/help/images/ref/regionprops.html>, 21 de setembre de 2014].
- [31]** PEÑA SÁNCHEZ DE RIVERA, D. Regresión y diseño de experimentos, Madrid: Alianza, 2002.