

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA**

*Departament d'Enginyeria de Sistemes Automàtica i Informàtica Industrial*

**APORTACIÓ A LA DESCRIPCIÓ I  
SEGUIMENT DE CAMINS  
NAVEGABLES EN ENTORNS  
NATURALS A PARTIR DE L'ANÀLISI  
DE REGIONS EN SEQÜÈNCIES  
D'IMATGES**

Autor: Josep Fernández Ruzafa

Director: Alícia Casals Gelpí

Barcelona, febrer del 1998

## 6. Avaluació i Resultats

Al llarg d'aquesta memòria s'ha proposat un disseny i una implementació de les diferents etapes a realitzar per descriure adequadament l'entorn amb l'objectiu de navegar autònomament en camins mal o feblement estructurats. Per a cada etapa, s'han discutit les diferents alternatives i s'ha justificat l'elecció de l'opció triada, que sempre ha estat orientada cap al nostre objectiu inicial: establir una metodologia utilitzant un sistema sensorial i computacional tant simple com sigui possible, sense oblidar els requeriments de fiabilitat del sistema i temps de procés/velocitat màxima desitjada del vehicle.

Com queda reflectit a les seccions 3.1 i 5.2, el resultat final que s'obté amb la metodologia proposada és una descripció de l'entorn mitjançant una matriu de travessabilitat de  $N \times M$  caselles, on en cada casella de la matriu s'indica si l'àrea de l'entorn associada a la casella (de mida Resolució\_X \* Resolució\_Y) és travessable (camí) o no travessable (marge, obstacle o desconegut). Els valors Resolució\_X i Resolució\_Y defineixen la resolució de la descripció, i la mida de l'àrea de l'entorn descrita queda afitada per  $N * \text{Resolució\_X}$  i  $M * \text{Resolució\_Y}$ . Per que la descripció de l'entorn sigui correcte cal:

1. Que s'hagi detectat el camí en la seqüència d'imatges i que s'hagi posicionat amb exactitud a la descripció de l'entorn.
2. Que s'hagi detectat els obstacles presents al camí i que s'hagin posicionat amb exactitud a la descripció de l'entorn.

La no detecció del camí és un error que no s'ha detectat en el conjunt de proves realitzades, algunes de les quals es presenten i es discuteixen a la secció 6.3. Un posicionament incorrecte del camí a la descripció, es tradueix en l'etiquetat com no travessable de caselles de la descripció de l'entorn que corresponen a àrees travessables de l'entorn o viceversa. Si bé el primer error no presenta normalment un perill per al vehicle, el segon pot resultar greu, ja que existeix la possibilitat que el sistema de planificació i control porti al mòbil fora del camí o a una col·lisió amb un obstacle.

Com ja s'ha discutit a la secció 5.1, per detectar un obstacle mitjançant la tècnica proposada cal que aquest defineixi una regió a la imatge. Per tant, la detecció d'obstacles està limitada a aquesta condició.

A la secció 5.1 ja s'ha avaluat l'error comès en l'estimació de l'alçada dels objectes i a la secció 5.2, l'error en el posicionament a la descripció de les regions presents a la imatge, en el cas d'imatges sintètiques i en situacions simples. En aquest capítol, es presenten les diferents fonts d'errors i el seu efecte en la descripció d'una forma global, sobre seqüències d'imatges sintètiques i seqüències captades en condicions reals d'operació.

Es pot classificar les fonts que produeixen un error en la descripció en dos tipus:

- Pròpies a la metodologia proposada
  - degudes a la resolució amb la que s'observa l'entorn
  - degudes a la resolució de la descripció
  - degudes a la generació de la descripció
  - degudes a la resolució utilitzada per a l'estimació de l'alçada dels objectes
  - degudes a la infracció de les assumpcions utilitzades per definir el model genèric de camí transitable
- Degudes a les condicions d'operació
  - degudes a la calibració del sistema de visió
  - degudes a les vibracions del sistema de visió
  - degudes a la segmentació de les imatges

A continuació s'analitzarà l'efecte que cada un d'aquests errors té sobre la descripció de l'entorn generada amb la metodologia proposada. Per això s'utilitza una escena patró sintètica. La figura 6.1 mostra una vista superior de l'escena analitzada on el camí té una amplada de 4.2 metres i està format per 4 trams de 10 metres de longitud. La posició de sortida del vehicle es troba a l'inici del primer tram i alineat amb la direcció definida pel camí. En el segon tram hi ha un canvi de direcció de  $10^\circ$  respecte el tram anterior, en el tercer un canvi de direcció de  $-20^\circ$  i en el quart un canvi de direcció, respecte el tram anterior, de  $10^\circ$ . Així mateix hi ha un obstacle de  $40 \times 40$  centímetres de base i 30 centímetres d'alçada, situat a 12 metres de la posició inicial del vehicle. D'aquest entorn ben conegut, s'ha determinat una descripció de l'entorn ideal que serà comparada amb les descripcions generades, en les diferents condicions de funcionament que es discuteixen a continuació.

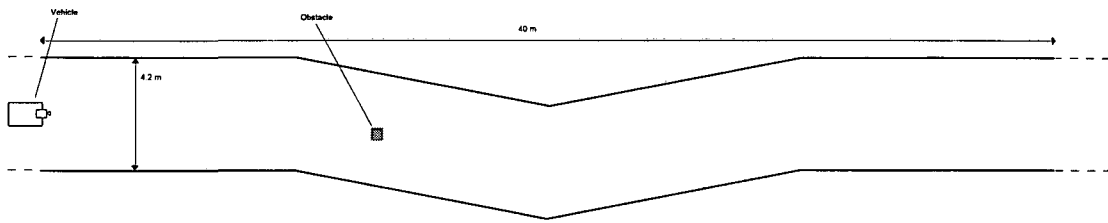


Figura 6.1. Entorn en el que s'obté la seqüència patró.

## 6.1. Errors propis de la Metodologia

Els errors propis deguts a la metodologia proposada corresponen a certes decisions de disseny. Si be aquests errors no es poden eliminar, si es poden reduir a condició de disposar d'un cert coneixement de les característiques de l'entorn, del vehicle, i/o d'incrementar el cost computacional dels algorismes.

### Resolució amb la que s'observa l'entorn

Tal com ja s'ha presentat a les seccions 3.1 i l'annex A, la resolució amb la que una càmera capta l'entorn depèn, bàsicament, de la resolució de la imatge digital i de la distància focal de la lent. La figura A.4 mostra l'error màxim i mig present en el procés de projecció inversa -determinació del punt (X,Y,Z) de l'entorn associat al pixel (x,y) de la imatge-. Fixada la distància focal, l'error és proporcional a la distància càmera-punt i a la resolució de la imatge. Si l'error és superior al valor de Resolució\_X o Resolució\_Y, hi haurà pixels de la imatge que no es projectaran a la casella de la descripció associada a la seva posició a l'entorn. Únicament si el nombre de pixels projectats en una casella de forma incorrecte és elevat, existeix una probabilitat elevada de que la classificació de la casella sigui errònia.

L'error que es comet al posicionar al món un pixel (x,y) de la imatge es pot calcular de la següent forma:

Sigui (X,Y,Z) un punt de l'entorn que es projecta al pixel (x,y) -tal com indiquen les equacions A.4, A.5, A.12 i A.13-. Si es coneix el valor de Z (assumint que el pendent del terra és constant i que el punt es troba al mateix nivell), utilitzant les equacions A.6 i A.7 s'obté el valor (X',Y',Z) -estimació de la posició al món del pixel (x,y) de la imatge-.

L'error en el posicionament és  $Error = \sqrt{(X - X')^2 + (Y - Y')^2}$

Si els valors  $(X,Y,Z)$  i  $(X',Y',Z)$  estan associats a una mateixa casella de la descripció, l'error comès en el posicionament del píxel  $(x,y)$  no tindrà cap influència a l'hora de generar la descripció.

Per una càmera de distància focal de 20 mil·límetres, la distància càmera-entorn a la que l'error mig en el posicionament és superior a 10 centímetres en imatges de 128x128, 256x256 i 512x512 píxels és, respectivament, de 8.5, 9.5 i 17 metres (figura A.4). Conforme augmenta la distància -o disminueix la resolució de la imatge-, disminueix la resolució amb la que s'observa l'entorn, i per tant augmenta l'error de posicionament i existeix una major possibilitat de classificar incorrectament les caselles.

En la figura 6.2.a es pot veure la seqüència d'imatges patró -resolució de 256x256 píxels- obtingudes en l'entorn de la figura 6.1. En la figura 6.2.c es mostra les descripcions de l'entorn obtingudes per l'anàlisi de la seqüència patró, fixant la resolució de la descripció a Resolució\_X= Resolució\_Y= 10 centímetres.

En les taules 6.1, 6.2 i 6.3 es mostra els errors presents en la descripció de l'entorn, si la resolució de les imatges analitzades és de 128x128, 256x256 o 512x512 píxels, respectivament. Aquests errors s'obtenen comparant la descripció ideal de l'entorn amb la generada, en cada una de les condicions de funcionament considerades. Per cada descripció de l'entorn (cada fila de les taules correspon a la descripció generada després de l'anàlisi d'una nova imatge), s'indiquen en les taules les següents dades: a) distància -en metres- a la que es troba del vehicle, la primera casella mal classificada, b) error -en caselles- en el posicionament de l'obstacle, c) distància -en metres- a la que es produeix un error superior a  $\pm 1$  casella, d) nombre de caselles que sense estar associades al camí han estat classificades com camí, e) nombre de caselles que estant associades al camí han estat classificades com marge, f) nombre de caselles que sense estar associades a un obstacle han estat classificades com obstacle, g) nombre de caselles que estant associades a un obstacle han estat classificades com camí, h) nombre total de caselles mal classificades, i) percentatge de caselles mal classificades sobre el total -la descripció està formada per  $164 \times 256 = 41984$  caselles-.

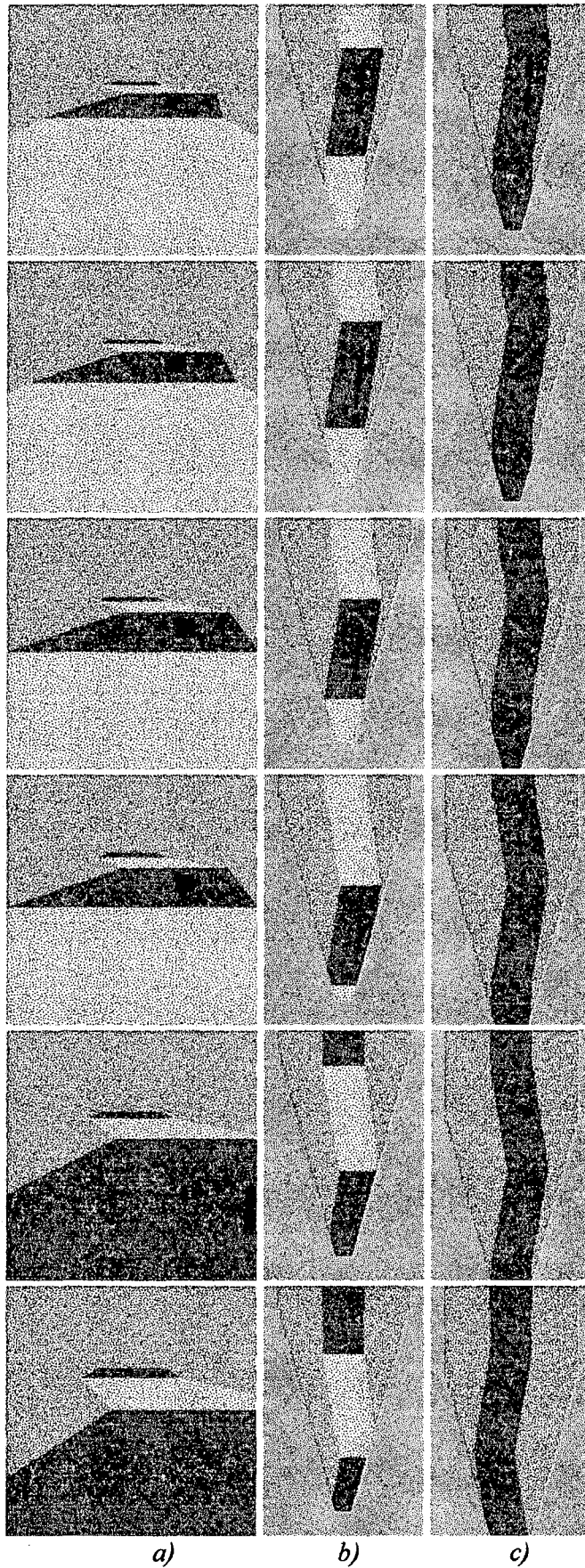


Figura 6.2. Imatges 1,2,3,5,7 i 9 de la seqüència captades en l'entorn de la figura 6.1.  
 a) Imatge classificada b) Descripció de la imatge c) Descripció de l'entorn.

Els errors màxims en el posicionament del camí són de 4 caselles (1 casella= 10 centímetres), 2 caselles i 1 casella per l'anàlisi d'imatges resolució de 128x128, 256x256 i 512x512 respectivament. Els percentatges mig de caselles mal classificades són de 0.75%, 0.34% i 0.14% respectivament. L'error més freqüent és la classificació com camí de la zona del marge més propera a l'entorn. Aquests errors són deguts bàsicament a la disminució de la resolució amb la que s'observa l'entorn a mida que augmenta la distància.

Com es pot veure, l'error mig i màxim decreix amb l'augment de la resolució de la imatge. Si bé l'error obtingut analitzant imatges de 128x128 píxels pot ser acceptable (els errors superiors a 20 centímetres es donen a distàncies superiors a 9 metres), existeix el problema de la no detecció d'obstacles petits quan es treballa amb imatge d'aquesta resolució (veure figura 3.8).

La petita disminució dels errors presents en la descripció de l'entorn quan s'analitzen imatges de resolució de 512x512 píxels respecte les de 256x256, no queda compensat per l'increment de la memòria necessària per a representar la informació i, el que és més important, un increment important del temps de procés (duplicar la resolució de la imatge implica, en els millors dels casos, incrementar per 4 el temps de procés o la potència de càlcul).

A la vista d'aquests resultats i analitzant la relació existent error de posicionament deguts a la discretització de la imatge i el temps de procés necessari per analitzar la imatge (figura 3.9), la resolució de la imatge de 256x256 píxels és la que millor satisfà aquest compromís (dintre de les imatges de format quadrat i dimensions estàndard).

	a	b	c	d	e	f	g	h	i
1	6.8	-2	21.1	166	22	0	0	188	0.44%
2	5.3	-2	17.9	236	9	0	0	245	0.58%
3	3.8	1	18.1	237	9	3	0	249	0.59%
4	2.3	-1	16.6	310	9	2	0	321	0.76%
5	0.8	-1	15.2	389	9	2	0	400	0.95%
6	0	-1	13.7	402	5	2	0	409	0.97%
7	1.2	-1	12.4	395	0	2	0	397	0.94%
8	1.0	-1	13.5	338	8	2	0	348	0.82%
9	0	0	9.1	304	24	3	0	331	0.79%
10	0		13.1	268	24	0	0	272	0.64%

Taula 6.1. Errors al descriure l'entorn mitjançant l'anàlisi d'imatges de 128x128 píxels.

	a	b	c	d	e	f	g	h	i
1	7.8	1	22.1	85	13	0	0	98	0.23%
2	6.3	0	20.2	150	2	2	0	154	0.36%
3	4.8	0	19.4	146	3	3	0	155	0.36%
4	3.3	-1	17.2	173	2	2	0	177	0.42%
5	1.8	-1	15.6	170	8	2	0	180	0.42%
6	0.3	-1	14.7	183	5	2	0	200	0.47%
7	1.2	-1	20.5	150	10	3	0	163	0.38%
8	0.3	-1	15.6	129	13	2	0	134	0.31%
9	0	0	9.1	127	21	3	0	151	0.35%
10	0		23.0	11	21	0	0	33	0.07%

Taula 6.2. Errors al descriure l'entorn mitjançant l'anàlisi d'imatges de 256x256 pixels.

	a	b	c	d	e	f	g	h	i
1	10.3	-1	*	18	14	0	0	32	0.07%
2	8.8	0		25	8	1	0	34	0.08%
3	6.8	-1		55	3	0	0	58	0.13%
4	5.3	0		52	9	1	0	62	0.14%
5	3.8	0		88	8	1	0	97	0.23%
6	2.3	0		81	12	1	0	94	0.22%
7	0.8	0		59	8	1	0	68	0.16%
8	0.4	0		41	7	1	0	49	0.11%
9	0	0		29	23	1	0	53	0.12%
10	0			19	23	0	0	42	0.10%

Taula 6.3. Errors al descriure l'entorn mitjançant l'anàlisi d'imatges de 512x512 pixels.

\*L'error és sempre menor o igual a  $\pm 1$  casella.

### Degudes a la resolució de la descripció

La descripció de l'entorn proposada és una representació discreta de l'entorn. Amb un únic valor, s'indica per a cada casella si l'àrea de l'entorn associada, de mida Resolució\_X\*Resolució\_Y, és travessable o no. Una resolució de la descripció elevada permet indicar amb més precisió les característiques de l'entorn -com més elevada sigui la resolució de la descripció més petit serà l'error que es comet en el posicionament dels elements degut a l'efecte de la discretització de l'espai que es dona-. Per contra, també implica un augmenta del cost computacional. Les taules 6.4, 6.5 i 6.7 mostren els errors presents en la descripció de l'entorn de resolució de 5x5, 10x10 i 15x15 centímetres, respectivament, obtingudes amb l'anàlisi d'una seqüència d'imatges de resolució 256x256 pixels -figura 6.2-.

Per a cada descripció de l'entorn s'indiquen en les taules les següents dades: a) distància -en metres- a la que es troba del vehicle, la primera casella mal classificada, b) error -en centímetres- en el posicionament de l'obstacle, c) distància -en metres- a la que es produeix un error superior a  $\pm 1$  casella, d) nombre de caselles que sense estar



associades al camí han estat classificades com camí, e) nombre de caselles que estant associades al camí han estat classificades com marge, f) nombre de caselles que sense estar associades a un obstacle han estat classificades com obstacle, g) nombre de caselles que estant associades a un obstacle han estat classificades com camí, h) nombre total de caselles mal classificades, i) percentatge de caselles mal classificades sobre el total.

El nombre de caselles de les tres descripcions és de 167936, 41984 i 18040 caselles respectivament, i els percentatges mig de caselles mal classificades són de 0.51%, 0.34% i 0.42% respectivament.

Com es pot observar a les taules 6.4 i 6.5, no existeix una diferència significativa entre les descripcions de resolució 5x5 i 10x10 centímetres. Això és degut a que l'entorn només és observat amb una resolució superior a 5 centímetres -en la configuració del sistema de visió utilitzat- a distàncies inferiors als 6 metres. Per tant, únicament té sentit treballar amb una resolució de 5x5 cm. per descriure la zona de l'entorn que es troba a una distància del vehicle d'entre 2.5 i 6 metres.

D'un altre banda, es pot veure a la taula 6.6 que en una descripció de resolució 15x15 cm, els errors màxim (30 cm.) comencen a ser significatius, i que es produeix un error de  $\pm 15$  cm. en la descripció de l'entorn més proper a la posició del vehicle (menys de 1 m).

Per tant la resolució de la descripció de l'entorn i la resolució amb la que s'observa l'entorn estan molt lligades, éssent inadequat descriure l'entorn amb més resolució de la que és observat. Per tant tenim dues opcions, treballar amb mapes de resolució variable (resolució petita per descriure l'entorn més proper al vehicle, resolució més gran per descriure l'entorn més llunyà) o triar una resolució de la descripció constant que sigui adequada per representar de forma prou acurada la zona de l'entorn més propera al vehicle. S'ha triat la segona opció ja que requereix d'un menor temps de procés. Tenint en compte el compromís error en vers el temps de procés, la resolució de 10 centímetres ha de resultar suficient per navegar al llarg del camí.

### **Deguts a la generació de la descripció**

Els paràmetres que són utilitzats per classificar una casella de les descripcions en funció del nombre de pixels de la imatge de cada categoria (camí, marge obstacle o desconegut) associats a la casella són (veure 5.2.2 i 5.2.3): a) els percentatges mínim

	a	b	c*	d	e	f	g	h	i
1	7.3	10	16.8/21.0	544	77	0	0	621	0.36%
2	5.7	5	14.2/17.2	817	31	13	0	861	0.51%
3	4.4	10	15.8/18.0	840	34	9	0	883	0.52%
4	3.0	0	13.8/16.7	921	33	7	0	961	0.57%
5	1.5	5	14.4/14.7	827	46	5	0	878	0.52%
6	0.05	5	8.3/13.7	991	40	4	1	1036	0.61%
7	0.05	10	11.5/15.7	884	17	4	6	911	0.54%
8	0.05	15	9.8/14.8	748	55	4	2	809	0.48%
9	0.05	10	8.4/9.3	748	50	4	4	806	0.47%
10	0.0		8.7/23.0	884	47	0	0	931	0.55%

Taula 6.4. Errors en la descripció de l'entorn de resolució de 5x5 centímetres.

\*Distàncies a les que es produeixen un error més gran de 5 cm./10 cm.

	a	b	c	d	e	f	g	h	i
1	7.8	10	22.1	85	13	0	0	98	0.23%
2	6.3	0	20.2	150	2	2	0	154	0.36%
3	4.8	0	19.4	146	3	3	0	155	0.36%
4	3.3	-10	17.2	173	2	2	0	177	0.42%
5	1.8	-10	15.6	170	8	2	0	180	0.42%
6	0.3	-10	14.7	183	5	2	0	200	0.47%
7	1.2	-10	20.5	150	10	3	0	163	0.38%
8	0.3	-10	15.6	129	13	2	0	134	0.31%
9	0	0	9.1	127	21	3	0	151	0.35%
10	0		23.0	11	21	0	0	33	0.07%

Taula 6.5. Errors en la descripció de l'entorn de resolució de 10x10 centímetres.

	a	b	c*	d	e	f	g	h	i
1	10.2	0	10.2	48	10	0	0	58	0.32%
2	9.9	0	9.9†	82	3	0	0	85	0.47%
3	7.2	15	7.2	68	2	0	0	67	0.37%
4	5.9	15	5.9	60	1	0	0	61	0.33%
5	4.5	15	4.5	66	8	0	0	74	0.41%
6	3.1	30	3.1	97	2	0	0	99	0.54%
7	1.8	15	1.8	80	7	0	0	87	0.48%
8	1.35	15	1.35	58	13	0	0	71	0.39%
9	0	0	0	61	10	0	0	71	0.39%
10	0		0	77	11	0	0	88	0.48%

Taula 6.6. Errors en la descripció de l'entorn de resolució de 15x15 centímetres.

\*Distància a la que apareix un error de 15 cm. (1ª casella mal classificada).

†Error de 30 centímetres a 21.0 metres. En la resta de descripcions l'error sempre ha estat inferior a 30 cm.

de pixels per a que una casella sigui classificada com marge o obstacle ( $V_1$  i  $V_2$ ),  $b$ ) el nombre d'imatges de la seqüència utilitzades per generar la descripció de l'entorn (M.S, memòria del sistema), i  $c$ ) la ponderació de les descripcions de les imatges utilitzades a l'hora de generar la descripció de l'entorn (els valors  $P_k$ , on  $0 \leq k < M.S$ ).

En una seqüència sintètica, com la que s'analitza, on no hi ha errors generats per la segmentació i on els límits del camí són clars, el valor de  $M.S$  i  $P_k$  tenen poca influència en el procés de descripció de l'entorn. Els paràmetres  $M.S$  i  $P_k$  tenen importància en aquelles situacions on la segmentació de l'escena no és idèntica al llarg de la seqüència d'imatges.

En canvi, els valors  $V_1$  i  $V_2$  sí que tenen una influència clara en com es classifiquen aquelles caselles que estan associades a una àrea de l'entorn on part és camí i l'altre part és marge o obstacle.

En les taules 6.7, 6.8, 6.9 i 6.10 es recull el nombre de caselles mal classificades en funció del valor de  $V_1$  i  $V_2$  (5%, 15%, 30% o 45%). Per a cada descripció de l'entorn generada s'indica, a) distància -en metres- a la que es troba del vehicle, la primera casella mal classificada, b) distància -en metres- a la que es troba del vehicle, el primer error en el posicionament major de 1 casella, c) Error màxim -en centímetres- en el posicionament del camí o de l'obstacle, d) nombre de caselles que sense estar associades al camí han estat classificades com camí, e) nombre de caselles que estant associades al camí han estat classificades com marge, f) nombre de caselles que sense estar associades a un obstacle han estat classificades com obstacle, g) nombre de caselles que estant associades a un obstacle han estat classificades com camí, h) nombre total de caselles mal classificades, i) percentatge de caselles mal classificades sobre el total.

Com s'ha vist en les anteriors taules, l'error més freqüent és la classificació com camí de les caselles associades a la frontera del camí (part de l'àrea associada a la casella és camí i l'altre no). És per aquesta raó que com més gran sigui el percentatge de píxels necessaris per classificar una casella com marge, més caselles, de les que estan associades a una zona de l'entorn on part és camí i l'altre part no, són classificades de forma errònia ( els errors mig són de 0.902%, 0.903%, 0.960% i 1.191% per  $V_i=5%$ , 15%, 30% i 45%, respectivament).

La mida de l'objecte més petit que és inclòs en la descripció de l'entorn és de Resolució\_X \* Resolució\_Y. Si la posició d'aquest objecte està alineada amb l'àrea definida per una casella de la descripció, la totalitat dels píxels associats a l'objecte es projecten en la mateixa casella. Normalment, la posició de l'objecte a l'entorn no coincidirà amb l'àrea definida per una casella, i en el pitjor cas, cada quarta part de l'objecte estarà associada a quatre caselles veïnes diferents. Si es vol que en aquest pitjor cas, l'objecte apareixi a la descripció de l'entorn (i en aquest cas ho farà ocupant

4 caselles), cal que  $V_1$  i  $V_2 \leq 25\%$ . Així mateix, cal tenir present que com a conseqüència de utilitzar  $V_1=V_2=25\%$ , un objecte de dimensions  $0.25 * \text{Resolució}_X * \text{Resolució}_Y$  serà inclòs a la descripció si tot l'objecte es projecta en una mateixa casella.

Encara que aquest paràmetre no té una gran efecte en la descripció (només és rellevant en caselles associades a zones de l'entorn on part és travessable i part no ho és), és preferible ser prudent i classificar com no travessable aquelles caselles que tenen associades un nombre significatiu de pixels classificats com marge o obstacle. És per aquesta raó que creiem aconsellable utilitzar un valor per  $V_1$  i  $V_2 \leq 30\%$ .

	a	b	c	d	e	f	g	h	i
1	6.9	21.1	10	302	0	0	0	302	0.71%
2	5.5	16.6	30	450	0	4	0	454	1.08%
3	4.1	18	20	416	0	0	0	416	0.99%
4	2.7	16.6	10	439	0	0	0	439	1.04%
5	1.3	15.2	20	411	1	0	0	412	0.98%
6	1.2	15.9	20	407	1	2	0	410	0.97%
7	1.2	14.2	10	375	3	2	0	380	0.90%
8	0	15.2	10	336	5	2	0	343	0.81%
9	0	9	10	309	7	2	0	318	0.75%
10	0	7.5	10	327	7	1	0	335	0.79%

Taula 6.7. Errors en la descripció de l'entorn generada amb  $V_1 = V_2=5\%$ .

	a	b	c	d	e	f	g	h	i
1	6.9	21.1	10	302	0	0	0	302	0.71%
2	5.5	16.6	30	450	0	4	0	454	1.08%
3	4.1	18	20	418	0	0	0	418	0.99%
4	2.7	16.6	10	441	0	0	0	441	1.05%
5	1.3	15.2	20	414	0	0	0	414	0.98%
6	1.2	15.9	20	410	0	1	0	411	0.97%
7	1.2	14.2	10	379	2	1	0	382	0.90%
8	0	15.2	10	341	2	1	0	344	0.81%
9	0	9	10	310	6	1	0	317	0.75%
10	0	7.5	10	327	7	0	0	334	0.79%

Taula 6.8. Errors en la descripció de l'entorn generada amb  $V_1 = V_2=15\%$ .

	a	b	c	d	e	f	g	h	i
1	6.9	21.1	10	324	0	0	0	324	0.71%
2	5.5	14.7	30	490	0	2	0	454	1.08%
3	4.1	15.1	20	448	0	0	0	448	1.06%
4	2.7	11.9	20	480	0	0	0	480	1.14%
5	1.3	15.2	20	448	0	0	0	448	1.06%
6	0	15.9	20	444	0	1	0	445	1.05%
7	0.1	14.2	10	423	0	1	0	424	1.00%
8	0.1	10.4	10	378	0	1	0	379	0.90%
9	0	8.9	10	329	3	1	0	331	0.78%
10	0	7.4	10	343	2	0	0	345	0.82%

Taula 6.9. Errors en la descripció de l'entorn generada amb  $V_1 = V_2=30\%$ .

	a	b	c	d	e	f	g	h	i
1	7.0	18.0	20	383	0	0	0	383	0.91%
2	5.6	13.1	30	546	0	0	0	546	1.30%
3	4.2	7.2	20	503	0	0	0	503	1.19%
4	2.8	5.8	20	551	0	0	0	551	1.31%
5	1.4	4.4	20	568	0	0	0	568	1.35%
6	0	3.0	20	534	0	0	0	534	1.27%
7	0	1.6	20	529	0	0	0	529	1.26%
8	0.1	0.2	20	473	0	0	0	473	1.12%
9	0.1	8.9	10	455	3	0	0	458	1.09%
10	0	7.4	10	467	2	0	0	469	1.11%

Taula 6.10. Errors en la descripció de l'entorn generada amb  $V_1 = V_2 = 45\%$ .

### Deguts a la resolució utilitzada per a l'estimació de l'alçada

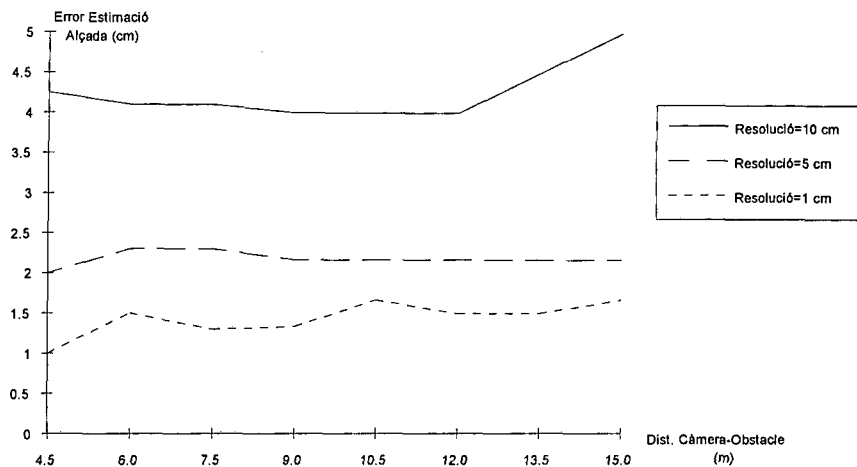
Com s'ha presentat en la secció 5.1, l'estimació de l'alçada dels objectes que s'utilitza per a la detecció d'obstacles es basa en la definició d'unes hipòtesis sobre l'alçada de l'objecte. La resolució amb la que es defineix el conjunt d'hipòtesis té una influència directa en l'error comès en el procés d'estimació de l'alçada.

L'error en l'estimació de l'alçada dels objectes es pot expressar de la següent forma:

$\text{Error}_{\text{estimació alçada}} = H - H_{\text{estimada}}$ , on  $H$  és l'alçada de l'objecte i  $H_{\text{estimada}}$  és l'alçada estimada per la tècnica de detecció d'obstacles proposada, que necessàriament ha de coincidir amb una de les hipòtesis ( $h_k$ ) sobre l'alçada formulades.

La figura 6.3 mostra l'error mig en l'estimació de l'alçada dels 6 objectes -amb alçades de 3.5, 6.5, 16.5, 36.5, 56.5 i 76.5 centímetres respectivament (seqüència d'imatges de 256x256 pixels, similar a la de la figura 5.4)- en funció de la resolució utilitzada per generar el conjunt d'hipòtesis. Si la resolució és de 10 centímetres (hipòtesis d'alçades  $h_k = k \cdot 10$  cm, on  $k=0$  a  $n$ ) l'error mig és de 4.22 centímetres i l'error màxim és de 6.5 centímetres, amb resolució de 5 centímetres ( $h_k = k \cdot 5$  cm), els errors mig i màxim són de 2.21 i 3.5 centímetres, i per la resolució de 1 centímetres en la definició de les hipòtesis d'alçades ( $h_k = k \cdot 1$  cm), els errors mig i màxim són de 1.48 i 2.5 centímetres.

Com es pot veure, la disminució de la resolució utilitzada per definir el conjunt d'hipòtesis d'alçades implica una disminució de l'error en l'estimació de l'alçada, així com un increment en el temps de procés ja que cal definir i verificar un nombre major d'hipòtesis. La màxima resolució a utilitzar per estimar l'alçada dels objectes ve determinada per quina és l'alçada màxima de l'objecte (obstacle) que pot superar el vehicle sense que això suposi un risc.



*Figura 6.3. Error mig en l'estimació de l'alçada dels objectes en funció de la distància càmera-objecte i de la resolució amb la que s'ha definit el conjunt d'hipòtesis.*

### **Deguts al no compliment de les restriccions que formen el model genèric de camí**

La metodologia presentada per a la descripció de camins mal o feblement estructurats fa servir cert coneixement a priori de l'entorn. Aquest coneixement es recull en forma de restriccions que ha de satisfer un camí transitable (veure secció 3.2) en el model genèric de camí feblement estructurat. Aquestes restriccions són: el nombre de matèries presents en la superfície d'un camí -en una zona donada- és petit, i l'amplada, la direcció i el pendent del camí són localment constant.

Si bé aquestes restriccions són les condicions més freqüents en aquest tipus d'entorn, i en són molt útils a l'hora de resoldre possibles ambigüitats, s'analitzarà igualment els errors que es cometen a l'hora de descriure un camí que no satisfà les restriccions del model genèric de camí transitable.

La primera restricció (nombre de matèries que formen el camí) s'utilitza per detectar, a partir del color de les regions, els possibles obstacles -si una regió que es troba a l'interior del camí té un color diferent als colors-camí, es classifica com obstacle potencial-. Per tant, si es consideren un màxim de  $N$  colors-camí, i en una zona del camí la seva superfície esta formada per  $M$  matèries de colors diferents ( $M > N$ ), les regions que tenen com color un dels  $M - N$  colors que no han estat seleccionats com color-camí, malgrat que són regions associades al camí, són classificades com obstacle potencial. És en la posterior etapa de detecció d'obstacles que finalment es deduirà l'alçada de l'objecte associat a aquestes regions i seran etiquetades finalment com camí.

Així doncs, l'única conseqüència de la infracció d'aquesta restricció és la classificació d'un major nombre de regions com obstacle potencial, la qual cosa repercuteix en un increment del temps de procés necessari per estimar l'alçada de totes aquestes regions. Si es té en compte que l'augment del nombre de colors-camí incrementa el temps de procés de les etapes de segmentació i classificació de regions, i el petit temps de procés de l'etapa de detecció d'obstacles, es recomanable treballar amb un nombre petit de colors-camí (en totes les experiències realitzades, tenint en compte les característiques del tipus de camí considerats, s'utilitzen 2 colors-camí).

Les restriccions d'amplada i direcció localment constant s'utilitzen en l'etapa de descripció de l'entorn (secció 5.2.2), per eliminar, quan apareixen, les ambigüitats degudes a la similitud entre el camí i els seus marges. En aquests casos, la segmentació de la imatge no permet determinar quina és l'àrea que ocupa el camí en l'entorn (veure figura 4.21), fet que es tradueix en una variació brusca (augment o reducció) de l'amplada del camí, o fins i tot, de la seva desaparició parcial en la descripció de la imatge. Quan es detecta aquesta situació, es determina l'àrea que ocupa el camí a l'entorn imposant que l'amplada i direcció del camí han de ser constants en aquelles zones on no ho són.

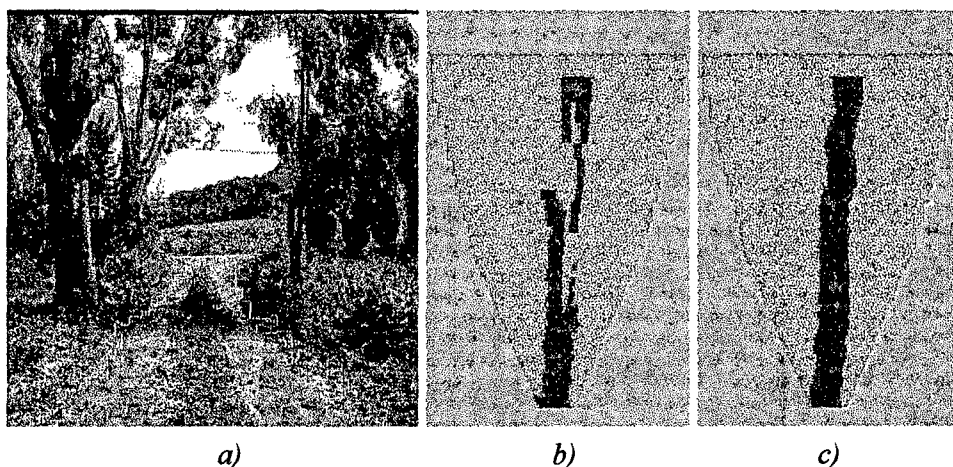
Per contra, si l'amplada o la direcció reals del camí varien bruscament, la metodologia proposada suavitza en la descripció de l'entorn aquestes variacions. Les figures 6.4 i 6.5 mostren les dues situacions descrites. En la figura 6.4 apareixen la imatge color inicial (a), el resultat una vegada que la imatge ha estat segmentada i les seves regions classificades (b), la descripció de l'entorn que s'obté si no s'imposa la restricció d'amplada i direcció localment constant (c) i la descripció de l'entorn obtinguda en el cas d'imposar la restricció (d). Les caselles de la descripció de l'entorn de color violeta, són les que al realitzar la ponderació s'havien classificat com marge, però al imposar les restriccions s'han reclassificat com camí. La figura 6.5 mostra una imatge sintètica on l'amplada del camí varia bruscament de 1 metre(a), i les descripcions de l'entorn en el cas que no (b) i si s'imposi la restricció (c).

L'última restricció, el pendent del camí és localment constant, s'utilitza per determinar la posició al món d'un pixel de la imatge mitjançant les equacions A.6 i A.7, ja que permet assumir que el valor de la coordenada Z del vehicle i dels elements que formen el camí són iguals -el vehicle, la zona del camí analitzada i els obstacles es troben sobre un mateix pla-, i el valor Z màxim -alçada- dels obstacles és el valor estimat per l'etapa de detecció d'obstacles. Si el pendent del camí varia, el vehicle, el camí i els obstacles ja no es troben sobre el mateix pla i per tant al mantenir aquestes

assumpcions es comet un error a l'hora de posicionar les regions de la imatge en la descripció de la imatge. L'error en el posicionament dels pixels de la imatge quan el pendent del terra no és constant es pot representar de la següent forma:

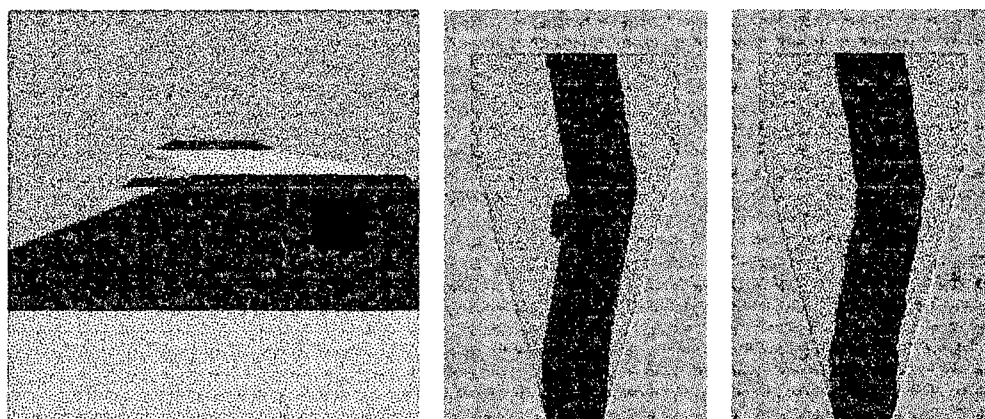
Sigui  $(X, Y, Z)$  un punt de l'entorn que es projecta al pixel  $(x, y)$  -tal com indiquen les equacions A.4, A.5, A.12 i A.13-. Si s'utilitza el valor de  $Z' \neq Z$  a l'hora d'estimar la posició al món del pixel  $(x, y)$  de la imatge -equacions A.6 i A.7- s'obté el valor  $(X', Y', Z')$ .

L'error en el posicionament és  $Error = \sqrt{(X - X')^2 + (Y - Y')^2}$



*Figura 6.4. Resultat de la imposició de les restriccions de direcció i amplada localment constants en la descripció del camí quan part del camí és classifica com marge o si hi ha una disminució de l'amplada del camí.*

*a) Imatge RGB amb els límits de la classificació b) Descripció de l'entorn sense imposar les restriccions c) Descripció de l'entorn imposant les restriccions.*



*Figura 6.5. Resultat de la imposició de les restriccions de direcció i amplada localment constants en la descripció del camí quan part del marge es classifica com camí o si hi ha una augment de l'amplada del camí..*

*a) Imatge classificada b) Descripció de l'entorn sense imposar les restriccions c) Descripció de l'entorn imposant les restriccions.*



La figura 6.6 mostra l'error comès en el posicionament en el sistema de coordenades del vehicle d'un pixel en funció de la distància càmera-empremta del pixel i de la variació de pendent (el punt on canvia el pendent està situat a 2 metres del vehicle i es consideren 6 variacions de pendent, 1%, 5%, 10%, -1%, -5% i -10%). Quan l'error supera el valor Resolució\_Y -la mida d'una casella de la descripció-, llavors es comet un error en el posicionament.

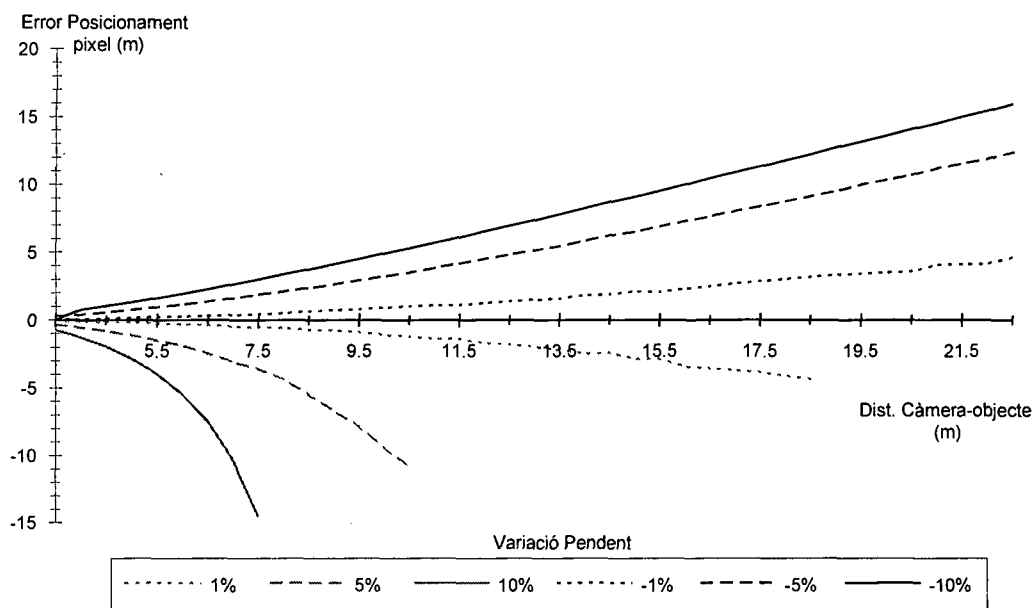


Figura 6.6. Error comès en el posicionament dels elements en l'entorn a partir de la seva posició a la imatge, en funció de la variació del pendent del camí i la distància.

Si la variació del pendent del camí és positiva -el pendent s'incrementa-, els elements de la imatge són posicionats més lluny al assumir que es troben sobre el mateix pla que el vehicle. Si la variació del pendent del camí és negativa -el pendent es decrementa-, els objectes de l'entorn que es troben darrera del punt on es produeix el canvi de pendent o bé no apareixen a la imatge -per que són ocultats per la part del camí més propera al vehicle- o bé, si apareixen de forma parcial, són posicionats més a prop al assumir que es troben sobre el mateix pla que el vehicle.

Malgrat que la variació del pendent genera errors de posicionament força importants, l'error de posicionament disminueix conforme la distància decreix, la qual cosa fa que els errors presents en la descripció de la zona més propera al vehicle siguin acceptables. Els errors generats per la variació del pendent del camí no es mantenen al llarg de l'anàlisi de la seqüència d'imatges sinó que desapareixen quan el vehicle arriba al punt on s'ha produït el canvi de pendent.

A les taules 6.11, 6.12 i 6.13 es mostren els errors presents en la descripció de l'entorn del camí de la figura 6.1 en el que s'introdueix un variació del pendent del +1%, +10% o -1%, respectivament, a 10 metres de la posició inicial del vehicle (el cas -10% no ha estat considerat ja que la zona del camí posterior al canvi de pendent no apareix en la imatge). Per a cada descripció de l'entorn generada -de resolució 10x10 cm.- s'indica, a) distància -en metres- a la que es troba del vehicle, la primera casella mal classificada, b) Error en centímetres en el posicionament de l'obstacle, c) distància -en metres- a la que es troba del vehicle, el primer error en el posicionament major de 1 casella, d) distància -en metres- a la que es troba del vehicle, el primer error en el posicionament major de 2 casella, e) distància -en metres- a la que es troba del vehicle, el primer error en el posicionament major de 3 casella, f) nombre de caselles que sense estar associades al camí han estat classificades com camí, g) nombre de caselles que estant associades al camí han estat classificades com marge, h) nombre de caselles que sense estar associades a un obstacle han estat classificades com obstacle, i) nombre de caselles que estant associades a un obstacle han estat classificades com camí, j) nombre total de caselles mal classificades, k) percentatge de caselles mal classificades sobre el total. L'error relatiu mig de caselles mal classificades en la descripció de l'entorn si el pendent ha variat +1%, +10% o -1%, és de 2.05%, 5.625 i 1.46% respectivament. L'error superior o igual a 20 centímetres (2 o més caselles) apareix a una distància mínima de 7.4, 1.2 i 6.4 metres respectivament. Com es pot veure una variació del pendent del camí del 10% genera errors prou significatius en la descripció de l'entorn més proper al vehicle.

El fet que apareixin un nombre significatius de caselles mal classificades a la descripció de l'entorn, no implica necessàriament que s'hagi de cometre un error a l'hora de determinar una trajectòria segura per guiar el vehicle.

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
1	7.4	10	14.0	22.1		332	19	0	0	351	0.83
2	6.0	0	11.2	14.7	22.2	561	9	8	0	578	1.37
3	4.4	10	11.0	13.1	20.4	692	10	4	0	706	1.68
4	3.0	0	9.0	13.0	22.1	700	9	7	0	716	1.70
5	1.9	0	8.0	12.0	15.0	996	15	5	0	1016	2.42
6	0.4	0	7.0	12.0	14.5	1085	9	3	0	1097	2.61
7	0.5	10	5.5	10.5	13.1	1299	0	2	0	1301	3.09
8	1.2	10	4.1	9.0	11.5	1229	1	2	0	1232	2.93
9	0.2	0	5.5	8.6	9.5	1165	3	2	0	1170	2.78
10	0	0	6.9	7.4	8.1	447	6	3	0	456	1.08

Taula 6.11. Errors presents en la descripció de l'entorn si el pendent del camí varia en 1%.

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
1	7.4	10	11.0	12.1	12.4	1119	15	0	0	1134	2.70
2	6.0	0	9.6	22.2	22.2	643	9	8	0	660	1.57
3	4.4	10	7.5	8.6	9.4	2242	10	4	0	2256	5.37
4	3.0	0	6.1	7.5	7.9	2266	9	6	0	2281	5.43
5	1.9	0	5.0	6.0	6.4	2634	15	4	0	2653	6.31
6	0.4	0	3.5	4.5	4.9	3295	9	3	0	3307	7.87
7	0.5	10	2.0	3.0	3.9	4229	0	2	0	4231	10.07
8	1.2	20	1.2	1.6	2.4	4488	0	2	0	4490	10.69
9	0.3	10	2.7	2.7	2.7	1867	15	2	0	1884	4.48
10	0		1.2	1.2	7.2	574	177	3	0	754	1.79

Taula 6.12. Errors presents en la descripció de l'entorn si el pendent del camí varia en 10%.

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
1	7.4	10	15.9			6	303	0	0	309	0.736
2	6.0	0	14.1	22.0		26	320	8	0	354	0.843
3	4.4	10	10.5	18.8		22	432	4	0	458	1.091
4	3.0	0	11.5	17.4	21.5	18	564	6	0	588	1.401
5	1.9	0	8.5	16.9	19.4	10	690	5	0	705	1.679
6	0.4	0	6.0	12.8	18.6	16	876	3	0	895	2.132
7	0.5	10	5.4	11.1	17.3	17	994	2	0	1013	2.413
8	0.5	10	3.9	9.8	12.8	0	1023	2	0	1025	2.441
9	0.2	0	2.0	7.4		52	275	2	0	329	0.784
10	0	0	3.9	6.4	7.0	197	270	3	0	470	1.119

Taula 6.13. Errors presents en la descripció de l'entorn si el pendent del camí varia en -1%.

## 6.2. Errors Causats per les Condicions d'Operació

A més dels errors que són propis a la metodologia proposada, també hi han altres fonts d'errors que són inherents al sensor utilitzat (la visió per ordinador) i de les característiques de l'entorn que s'analitza.

### Degut a la calibració del sistema de visió

En la metodologia proposada, les etapes d'estimació de l'alçada dels objectes i de descripció de l'entorn utilitzen les equacions A.4 a A.13 que modelitzen el procés de formació de les imatges (relació punt de l'espai 3D amb el pixel, veure annex A). L'ús d'aquestes equacions requereix conèixer els paràmetres intrínsecs i extrínsecs del sistema d'adquisició d'imatges. Per determinar de forma precisa la distància focal de l'òptica ( $\lambda$ ), i el desplaçament i orientació relatiu entre el sistema de referència del món i el de la càmera ( $X_0, Y_0, Z_0, \theta, \phi$ ), és necessari calibrar el sistema d'adquisició d'imatges.

Si els valors obtinguts en la calibració d'aquests paràmetres són erronis o durant el funcionament del sistema de navegació autònom hi ha un desajust del sistema d'adquisició d'imatges -moviment de la càmera-, la diferència existent entre la configuració (posició, orientació i distància focal) esperada de la càmera i la real genera un error en el posicionament dels objectes, i en el càlcul de la seva alçada.

L'error de posicionament dels pixels de la imatge degut a l'error de calibració és pot representar de la següent forma:

Siguin  $(X_0, Y_0, Z_0, \theta, \phi, \lambda)$  el valor dels paràmetres del sistema de visió que es consideren correctes. Sigui  $(X'_0, Y'_0, Z'_0, \theta', \phi', \lambda')$  el valor real dels paràmetres del sistema de visió donada la configuració actual de la càmera.

Donat un pixel  $(x, y)$  de la imatge l'error en el posicionament generat per la calibració del sistema de visió és  $Error = \sqrt{(X - X')^2 + (Y - Y')^2}$ , on

$$X = X_0 + \frac{Z - Z_0}{y \cos \phi - \lambda \sin \phi} (x \cos \theta + y \sin \phi \sin \theta + \lambda \cos \phi \sin \theta)$$

$$Y = Y_0 + \frac{Z - Z_0}{y \cos \phi - \lambda \sin \phi} (-x \sin \theta + y \sin \phi \cos \theta + \lambda \cos \phi \cos \theta)$$

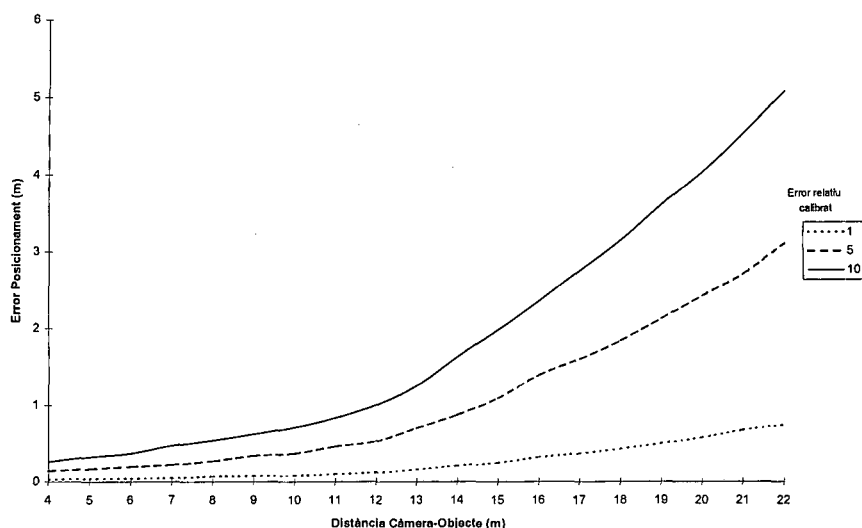
$$X' = X'_0 + \frac{Z - Z'_0}{y \cos \phi' - \lambda' \sin \phi'} (x \cos \theta' + y \sin \phi' \sin \theta' + \lambda' \cos \phi' \sin \theta')$$

$$Y' = Y'_0 + \frac{Z - Z'_0}{y \cos \phi' - \lambda' \sin \phi'} (-x \sin \theta' + y \sin \phi' \cos \theta' + \lambda' \cos \phi' \cos \theta')$$

i  $Z$  és el valor de l'alçada -respecte el sistema de coordenades del vehicle- que s'assumeix per al pixel  $(x, y)$ .

Si la càmera ha girat en sentit antihorari (horari) al voltant de l'eix  $x$  -augmenta (disminueix) la inclinació de la càmera respecte el terra, veure figura A.3-, hi ha un desplaçament dels objectes de l'escena cap a la zona superior (inferior) de la imatge. Per tant, a l'hora de calcular la distància en l'eix  $Y$  a la que es troben els objectes -mitjançant l'equació A.7- es deduirà que estan més lluny (a prop) de la seva distància real a la càmera. L'efecte és similar si la càmera ha girat en sentit antihorari (horari) al voltant de l'eix  $y$ . En aquest cas, els objectes de l'escena es desplacen cap a l'esquerra (dreta) en la imatge. Per tant, a l'hora de calcular la posició en l'eix  $X$  a la que es troben els objectes -mitjançant l'equació A.6- es deduirà que estan més a l'esquerra (dreta) de la seva posició real en l'entorn.

La figura 6.7 mostra l'error comès en el posicionament en l'entorn d'un objecte en funció de la distància a la que es troba de la càmera i de l'error relatiu (diferència entre la configuració esperada i real de la càmera) dels paràmetres del sistema de calibració, per un error relatiu de 1%, 5% i 10%.



*Figura 6.7. Error en el posicionament a l'entorn dels elements presents a la imatge, en funció de l'error relatiu comès en el procés de calibració.*

En les taules 6.14, 6.15 i 6.16 es mostren els errors presents a la descripció de l'entorn pels 3 casos considerats (1%, 5% i 10% d'error relatiu en el valor dels paràmetres del sistema de visió quan s'analitza la seqüència patró). Les dades que es recullen en les taules són: a) distància -en metres- a la que es troba del vehicle, la primera casella mal classificada, b) error -en centímetres- en el posicionament de l'obstacle, c) nombre de caselles que sense estar associades al camí han estat classificades com camí, d) nombre de caselles que estant associades al camí han estat classificades com marge, e) nombre de caselles que sense estar associades a un obstacle han estat classificades com obstacle, f) nombre de caselles que estant associades a un obstacle han estat classificades com camí, g) nombre total de caselles mal classificades, h) percentatge de caselles mal classificades sobre el total.

Com es pot veure, un error relatiu del 1% en la calibració de la càmera, genera un error en la descripció de l'entorn que és acceptable. En el cas de l'error relatiu del 5% i del 10%, malgrat que els errors màxims de posicionament es produeixen quan es descriu l'àrea de l'entorn més llunyana al vehicle -veure figura 6.7-, l'error present en la descripció de l'àrea més propera al vehicle (errors superior a 30 cm. a distància de 7.7 m. si l'error de calibrat és del 5% i a distància de 1 m si l'error de calibrat és del 10%) resulta inacceptable per la tasca que s'ha de realitzar.

	a	b	c	d	e	f	g	h
1	7.3	10	586	0	0	0	586	1.39%
2	5.9	0	789	0	4	0	793	1.88%
3	4.5	10	803	0	4	0	807	1.92%
4	3.1	0	892	0	4	0	896	2.13%
5	1.7	0	959	0	4	0	963	2.29%
6	0.3	0	1026	0	3	0	1029	2.45%
7	0.2	10	1001	0	3	0	1004	2.39%
8	0.6	20	891	0	3	0	894	2.12%
9	0.3	30	833	0	3	0	836	1.99%
10	0		781	0	0	0	781	1.87%

Taula 6.14. Errors en la descripció de l'entorn si l'error relatiu del calibrat és 1%.

	a	b	c	d	e	f	g	h
1	7.5	70	1485	0	0	0	1485	3.53%
2	6.1	20	1770	0	8	0	1778	4.23%
3	4.7	30	1839	0	8	0	1847	4.39%
4	3.3	20	2073	0	6	0	2079	4.95%
5	1.9	0	2212	0	6	0	2218	5.28%
6	0.5	-10	2303	0	0	0	2308	5.49%
7	0.5	0	2245	0	3	0	2248	5.35%
8	1.5	10	2125	0	3	0	2128	5.06%
9	0.4	20	2069	0	3	0	2072	4.93%
10	0		1998	0	0	0	1998	4.76%

Taula 6.15. Errors en la descripció de l'entorn si l'error relatiu del calibrat és 5%.

	a	b	c	d	e	f	g	h
1	8.0	140	2531	0	0	0	2531	6.00%
2	6.6	70	2973	0	8	0	2981	7.10%
3	5.2	80	3141	0	8	0	3149	7.50%
4	3.8	40	3455	0	6	0	3461	8.24%
5	2.4	0	3481	0	5	0	3486	8.30%
6	1.0	-30	3625	0	2	0	3627	8.63%
7	0.5	0	2245	0	3	0	2248	5.35%
8	1.5	10	2145	0	3	0	2148	5.06%
9	0.4	20	2069	0	3	0	2072	4.93%
10	0		1998	0	0	0	1998	4.76%

Taula 6.16. Errors en la descripció de l'entorn si l'error relatiu del calibrat és 10%.

### Degut a les vibracions del sistema de visió

Com la superfície dels camins mal o feblement estructurats sovint resulta ser irregular (presenta desnivells, sots, etc.), això provoca un sotrac o bots del vehicle no previst que fa variar la posició i orientació de la càmera que està fixada sobre el vehicle. Aquesta modificació de la configuració de la càmera es pot assimilar a un error de calibració, a diferència que en aquest cas l'error no és fix sinó que evoluciona amb el temps (en funció de les irregularitats de la superfície del camí).

En la taula 6.14 es mostra els errors presents a la descripció de l'entorn si el moviment de la càmera és aleatori i genera un error relatiu màxim del 10% en la posició i orientació de la càmera ( $X_0, Y_0, Z_0, \theta, \phi$ ). En aquest cas s'ha mantingut la distància focal fixa (ja que el moviment del vehicle no la fa variar). Les dades que es recullen en la taula són: a) distància -en metres- a la que es troba del vehicle, la primera casella mal classificada, b) error -en centímetres- en el posicionament de l'obstacle, c) nombre de caselles que sense estar associades al camí han estat classificades com camí, d) nombre de caselles que estant associades al camí han estat classificades com marge, e) nombre de caselles que sense estar associades a un obstacle han estat classificades com obstacle, f) nombre de caselles que estant associades a un obstacle han estat classificades com camí, g) nombre total de caselles mal classificades, h) percentatge de caselles mal classificades sobre el total.

Com es pot veure comparant les taules 6.11 i 6.14, l'efecte d'un error relatiu aleatori, de valor màxim 10%, conseqüència de les vibracions del vehicle, és inferior a l'efecte d'un error relatiu constant del 1%. Això es deu, bàsicament, al fet que per generar la descripció de l'entorn es tenen en compte les 6 últimes descripcions de la imatge obtingudes, fent que els errors variables presents deguts al moviment del vehicle, siguin en part compensats al realitzar la mitja ponderada.

	a	b	c	d	e	f	g	h
1	7.2	10	487	0	0	0	487	1.16%
2	5.8	0	611	0	8	0	619	1.97%
3	4.4	10	640	0	4	0	644	1.53%
4	3.0	0	659	0	4	0	663	1.57%
5	1.66	0	644	0	2	0	646	1.53%
6	0.2	0	641	0	2	0	643	1.52%
7	0.2	10	619	0	2	0	621	1.47%
8	0.4	20	530	0	2	0	532	1.26%
9	0.3	30	533	0	2	0	535	1.27%
10	0		536	0	0	0	536	1.34%

Taula 6.17. Errors en la descripció de l'entorn si l'error relatiu aleatori del calibrat és 10%

### Deguts a la segmentació de la imatge

La detecció del camí en la metodologia presentada es basa en el fet que el camí defineix un conjunt de regions de color conegut a la imatge segmentada. Com ja s'ha discutit a les secció 4.2.2 i 6.1, quan el color dels marges i del camí són semblants, o quan apareix una ombra molt pronunciada en el camí, la segmentació de la imatge que s'obté no indica correctament quina és l'àrea del camí.

Per una imatge donada, en funció si es dona o no aquest fet i de la seva importància, la segmentació i classificació de les regions definiran amb més o menys exactitud l'àrea definida pel camí a la imatge. Per minimitzar aquests errors, cal aplicar les restriccions recollides al model genèric de camí. Com es pot veure, no és possible quantificar aquest error, ja que depèn de les característiques de l'escena analitzada.

### **6.3. Resultats. Anàlisi de Seqüències Reals.**

En les seccions anteriors s'han identificat les causes que generen errors en la descripció de l'entorn, i s'ha avaluat la seva influència, per a diferents condicions d'operació, en l'anàlisi d'una seqüència d'imatges sintètiques. Si bé l'anàlisi d'imatges sintètiques resulta molt útil com eina per desenvolupar i avaluar les diferents etapes que formen la metodologia proposada ja que es coneix en detall les característiques de l'escena que s'analitza, cal igualment verificar que aquest procediment genera els resultats desitjats quan analitza seqüències d'imatges captades en situacions de funcionament real, és a dir, quan es realitza el seguiment d'un camí mal o feblement estructurat en un entorn natural.

D'entre les diferents proves realitzades, a continuació es presenten 3 d'elles que resulten representatives de les situacions que es poden trobar. Aquestes seqüències corresponen a camins de diferents situació geogràfica i característiques. Les imatges han estat captades en diferents èpoques de l'any i hora del dia.

En cada una de les seqüències es mostra, en la primera columna la imatge RGB sobre la que es marca amb punts blancs els límits de la segmentació i classificació de regions, en la segona columna la descripció de la imatge, en la tercera columna la descripció de l'entorn i en la quarta columna s'indica sobre la imatge RGB amb punts blancs la posició dels límits de camí, amb punts vermells la posició dels obstacles (si n'hi ha) i amb punts negres la trajectòria central<sup>1</sup>, a partir de la informació de la descripció de l'entorn.

Els colors en la descripció de la imatge indiquen verd, groc, blau cel i blau marí (camí, els diferents colors estan associats a la relació entre el color de la regió i els colors-camí -veure secció 4.3.2-), taronja (marge), vermell (obstacle potencial) i gris

---

<sup>1</sup> La trajectòria central és aquella que passa pel centre de la zona travessable, i per tant es troba a distància màxima de les àrees no travessables (marge i obstacles).



(desconegut). Els colors en la descripció de l'entorn indiquen verd (camí), taronja (marge), vermell (obstacle), violeta (caselles que són classificades com marge quan es ponderen les M.S. descripcions de la imatge però finalment s'associen al camí al imposar les restriccions d'amplada i direcció localment constants) i gris (desconegut).

## **Seqüència 1**

### Característiques del camí

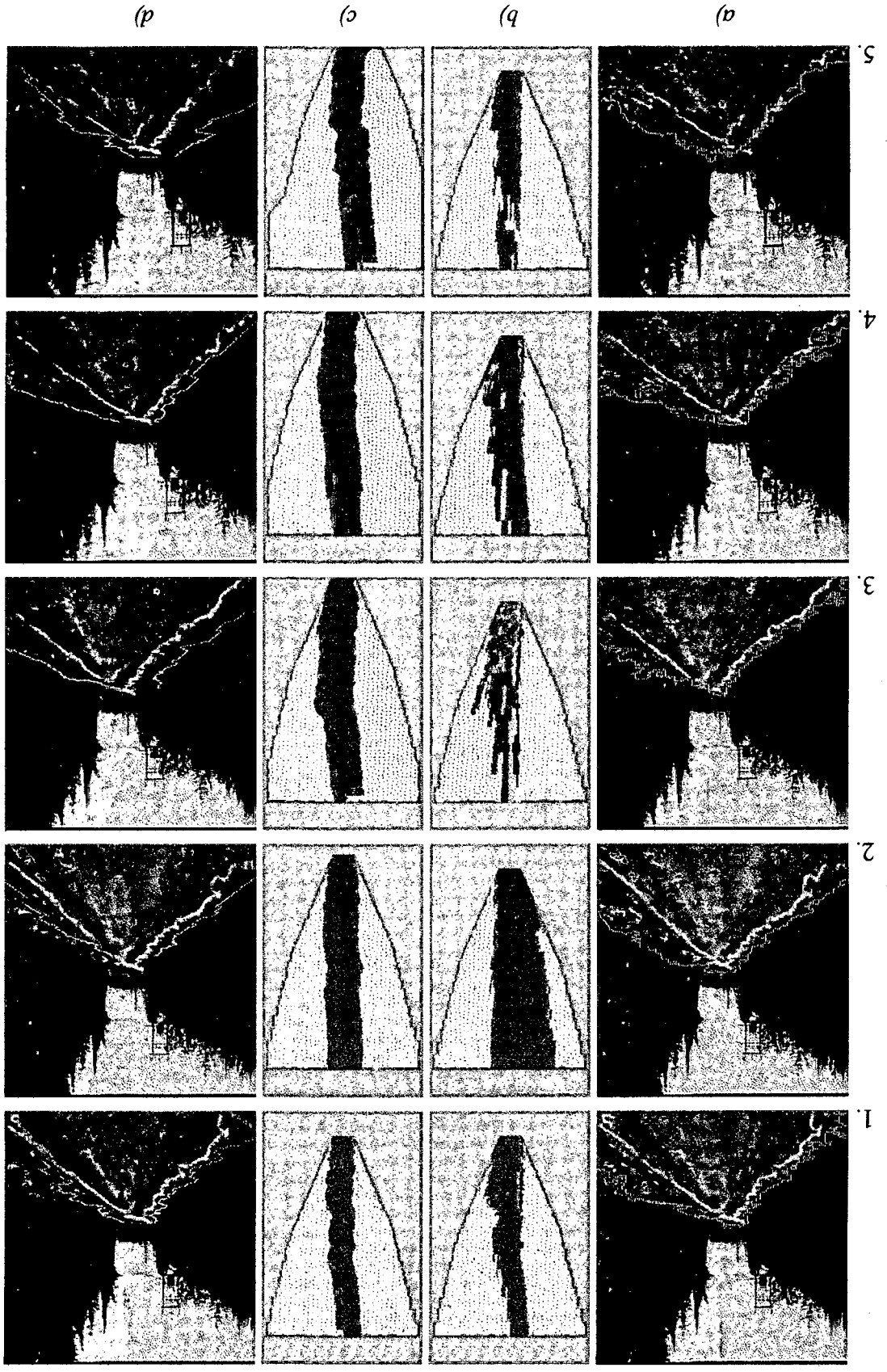
Es tracta d'un camí veïnal d'amplada entre 3.5 i 4.10 metres, utilitzat habitualment per vehicles. La seva superfície està formada únicament per terra. La secció del camí que es mostra a la seqüència presenta una variació de direcció cap a l'esquerra i una superfície força regular. El límit dret del camí és indefinit ja que la part del marge limítrofa amb el camí també està formada per terra, abans de la presència d'arbres i matolls. El límit esquerre del camí no és apreciable a la imatge RGB ja que està amagat per l'ombra que projecten els arbres que hi ha al marge esquerre del camí.

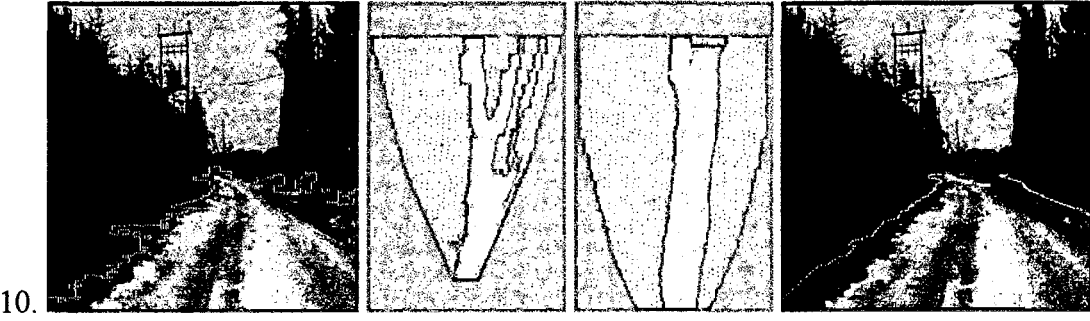
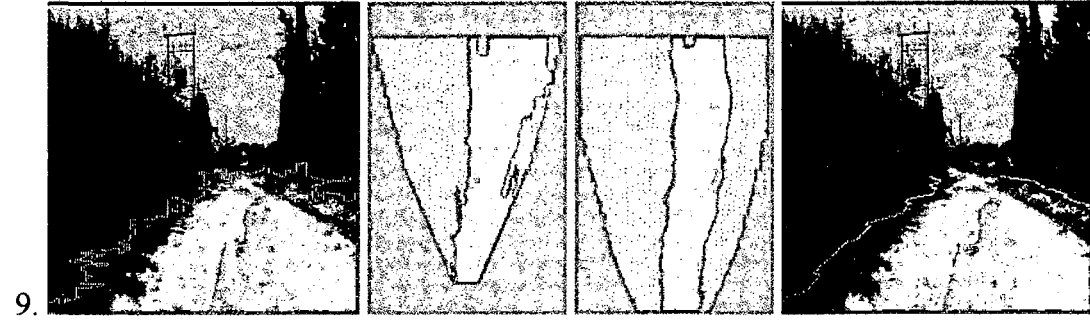
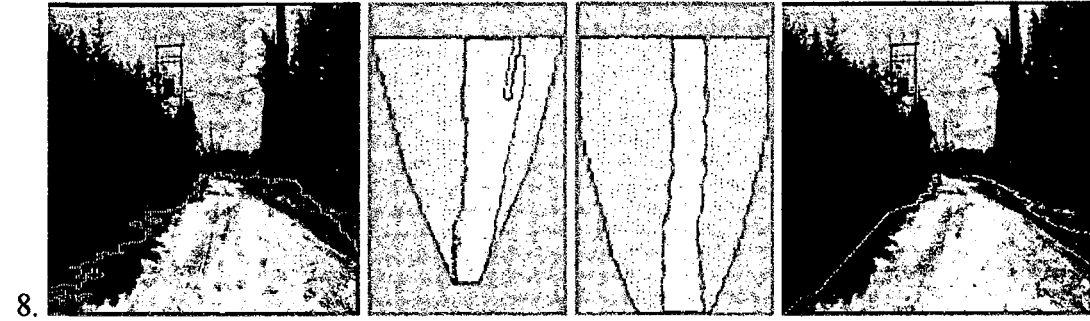
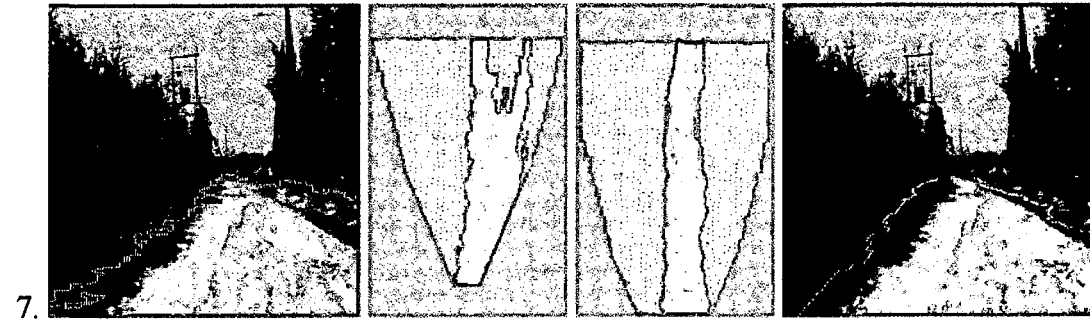
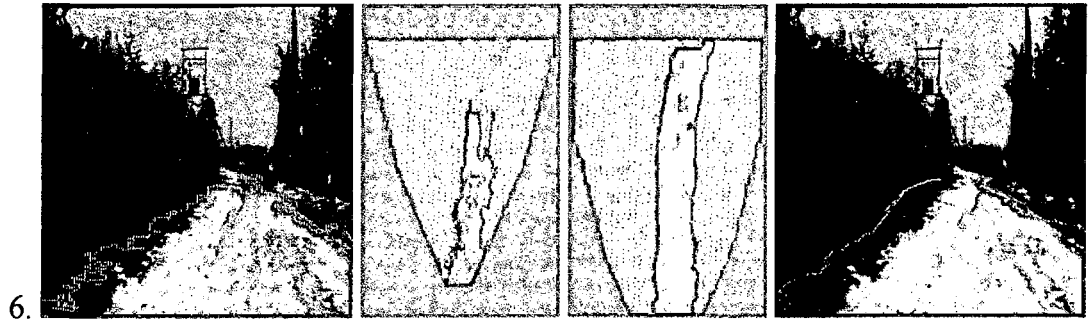
La figura 6.8 mostra 20 imatges d'una seqüència amb la descripció de la imatge associada i la descripció de l'entorn generada mitjançant l'anàlisi de la seqüència. La distància entre els punts on s'han capturat les imatges és de 1.5 metres, seguint aproximadament l'eix del camí. En la primera columna s'indica en traç blanc sobre la imatge RGB, el límit de les regions que han estat classificades com camí. En la quarta columna, el traç blanc sobre la imatge RGB indica quina és l'àrea de l'entorn que ha estat associada en la descripció de l'entorn al camí.

### Resultat

La utilització del color permet detectar on es troba el límit esquerre del camí malgrat la presència de l'ombra (el límit de la segmentació -línia blanca en la 1<sup>a</sup> columna de la figura 6.8- no coincideix amb l'ombra). Així mateix, podem veure com la debilitada ombra produïda per la torre elèctrica sobre el camí, en les imatges 15 a 19, no té cap efecte sobre la imatge segmentada ni sobre la descripció.

El fet que una franja limítrofa del límit dret del camí sigui també terra, fa que a l'hora de segmentar la imatge, aquesta àrea sigui inclosa dintre de la regió camí. Com aquesta franja apareix al llarg de tota la secció del camí observada, i té una amplada gairebé constant, aquest error no és eliminat al imposar les restriccions d'amplada i direcció del camí localment constants.





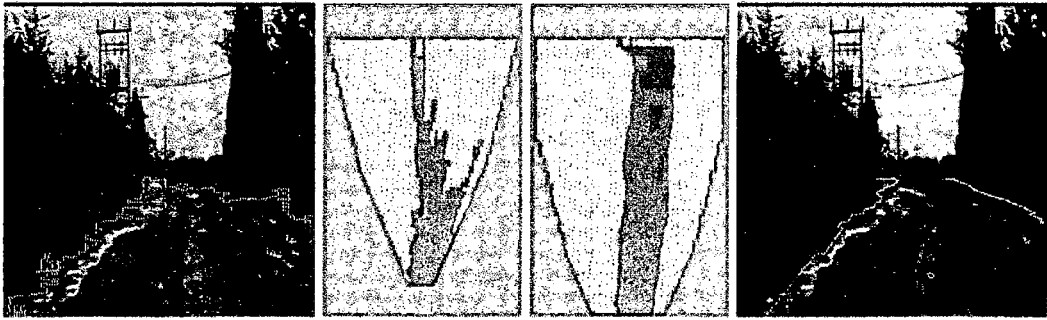
*a)*

*b)*

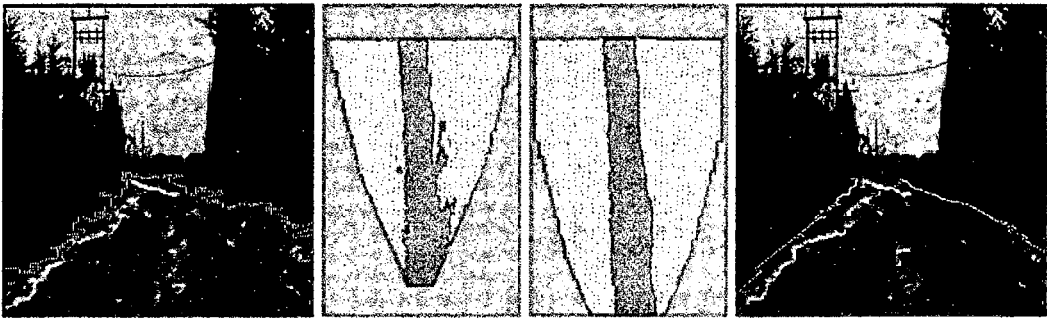
*c)*

*d)*

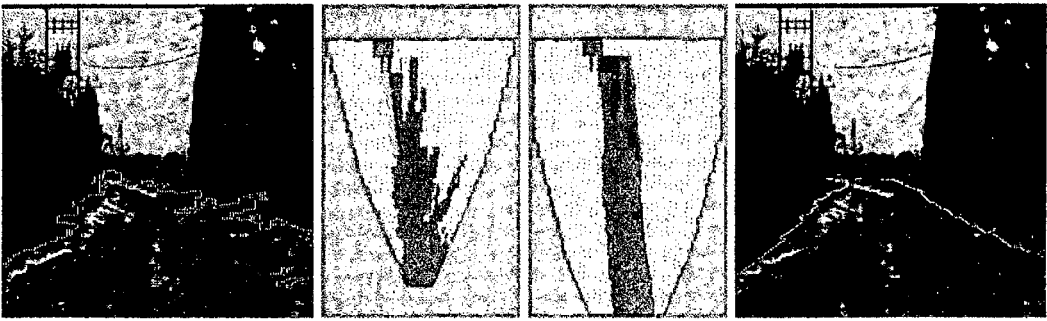
11.



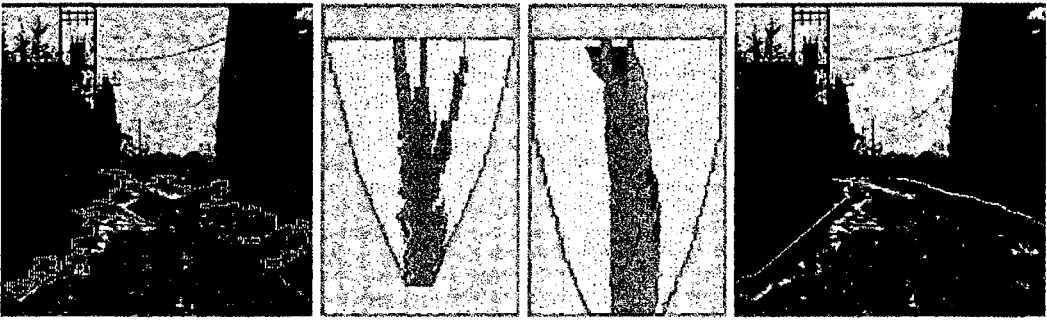
12.



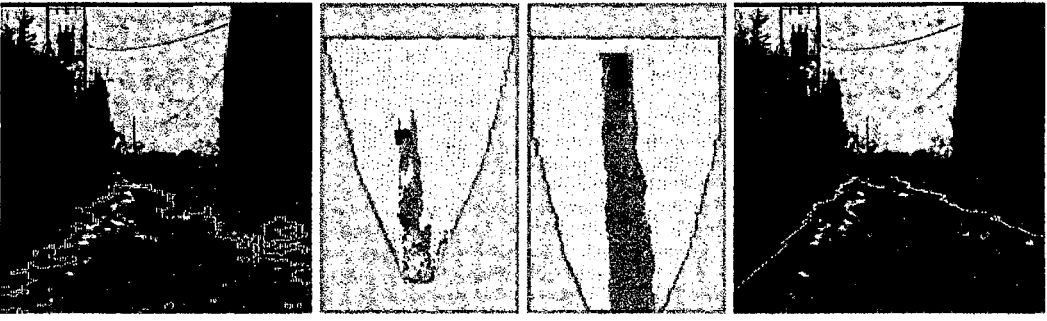
13.



14.



15.

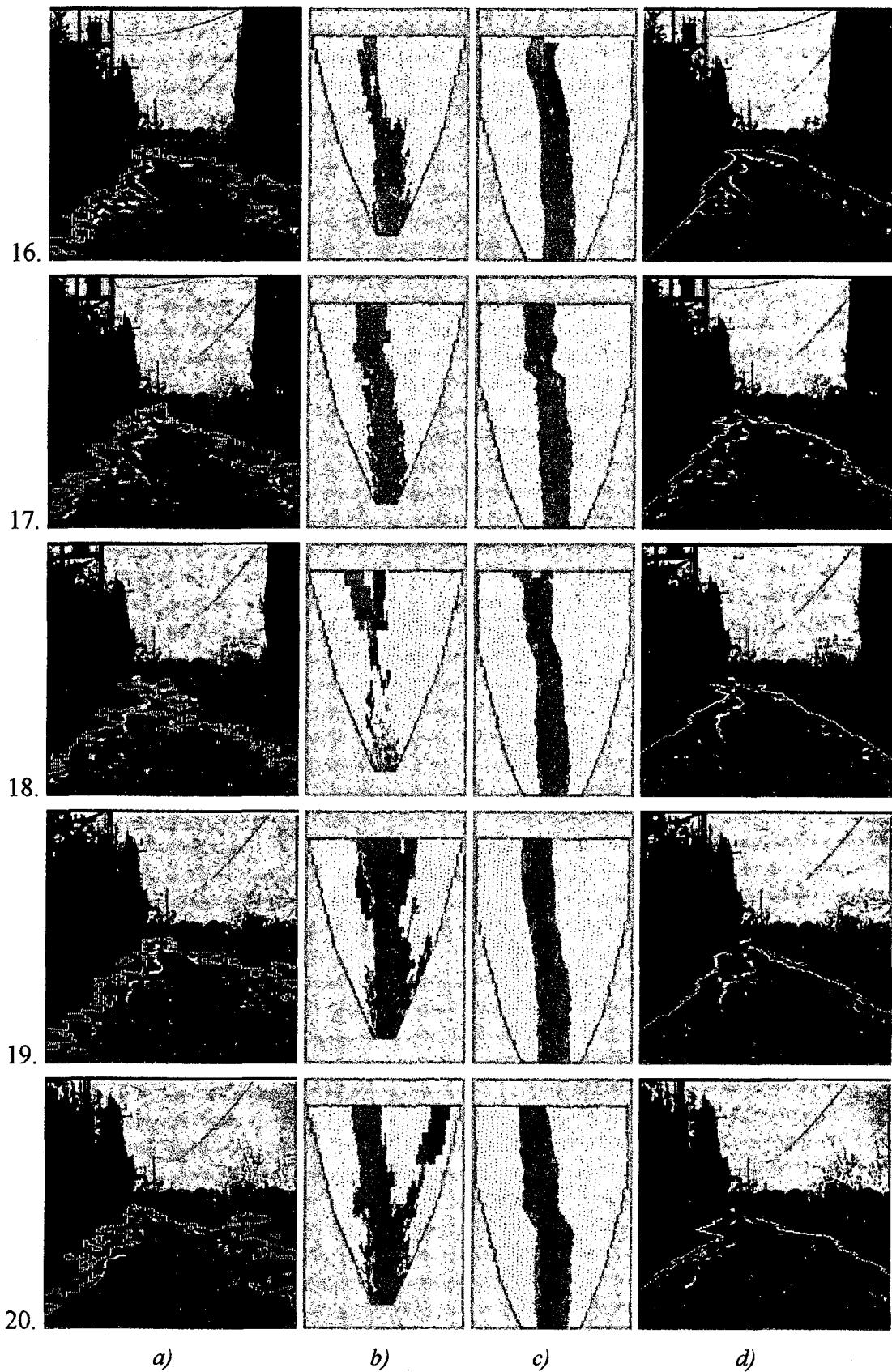


*a)*

*b)*

*c)*

*d)*



*Figura 6.8. Imatges de la Seqüència 1.*

*a) Imatge RGB amb els límits de la segmentació b) Descripció de la imatge  
c) Descripció de l'entorn d) Imatge RGB sobre la que es superposa els límits  
del camí que s'indiquen en la descripció de l'entorn.*

## Seqüència 2

### Característiques del camí

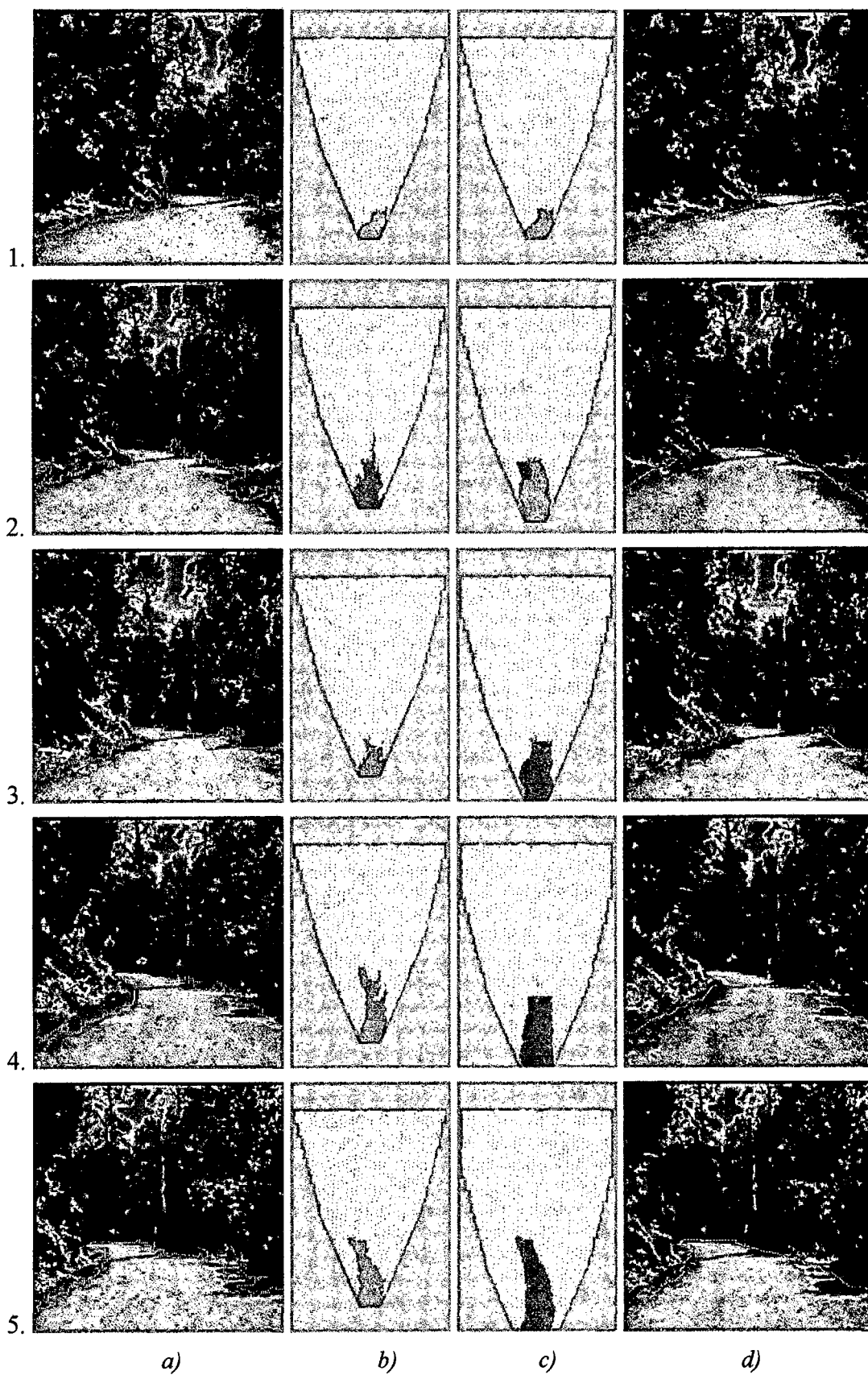
Es tracta d'un camí de muntanya d'amplada entre 3.10 i 4.25 metres, poc utilitzat per vehicles. La seva superfície està formada per terra i alguna pedra de petites dimensions. La secció del camí que es mostra a la seqüència correspon a una corba a la dreta seguida d'una recta d'aproximadament trenta metres. El marge dret del camí està format bàsicament per arbres i l'esquerra per roques, matolls i arbres. La posició del sol fa que els arbres del marge projectin diferents ombres en la part dreta del camí.

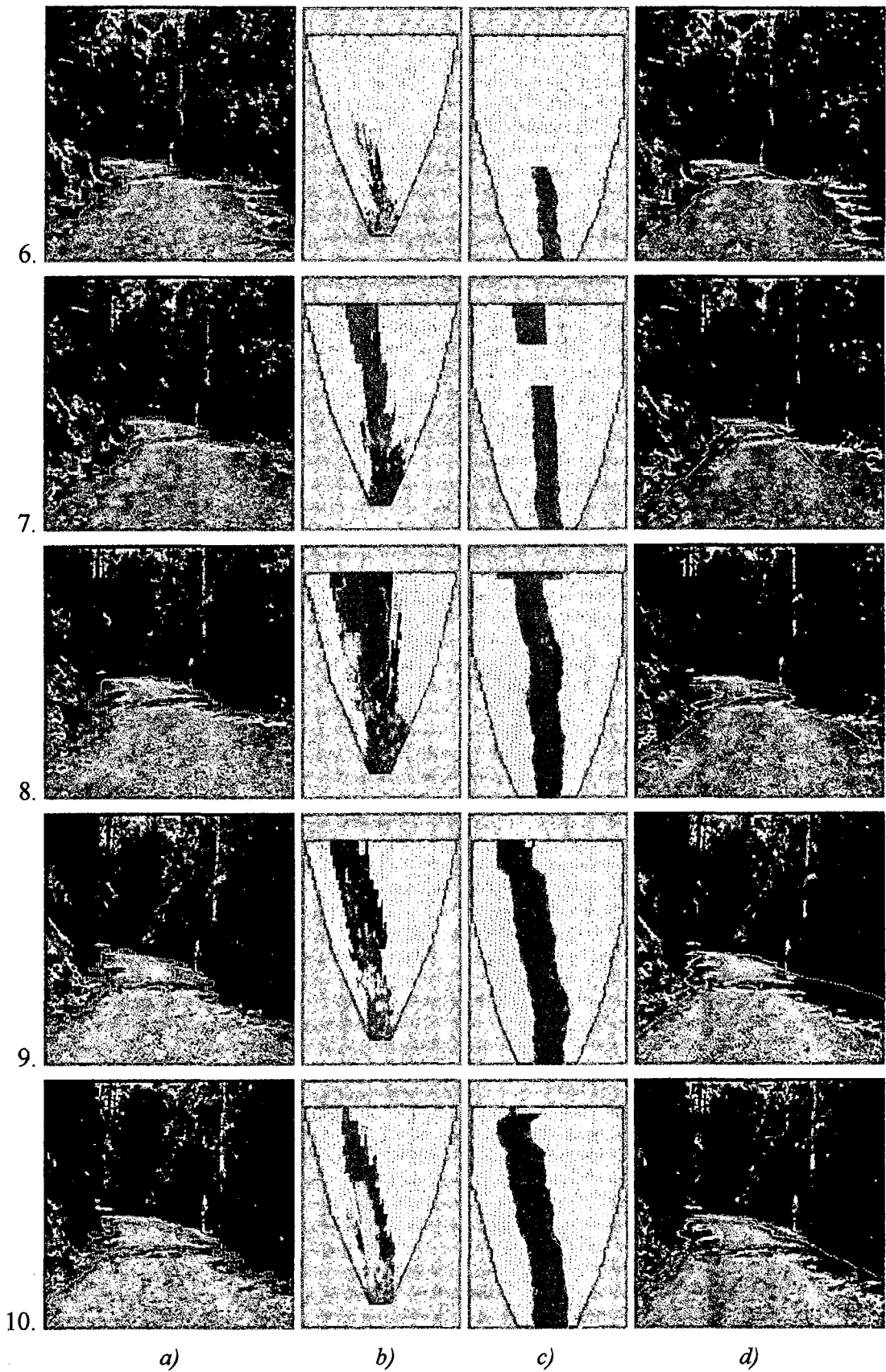
En la figura 6.9 apareixen 10 imatges de la seqüència amb la descripció de la imatge associada i la descripció de l'entorn generada mitjançant l'anàlisi de la seqüència. La distància entre els punts on s'ha capturat les imatges és de 1.5 metres, seguint aproximadament l'eix del camí.

### Resultat

En les imatges inicials de la seqüència només és visible un petit tram de la corba degut a que la continuació del camí queda amagada pels elements que formen el marge. No és fins que el vehicle arriba a la corba que es veu la continuació del traçat del camí (a partir de la imatge 6).

Com es pot apreciar a les imatges 6 i 7 de la seqüència, no tota l'àrea del camí que és visible a la imatge s'incorpora immediatament a la descripció de l'entorn, ja que per que la ponderació de les últimes descripcions de la imatge faci que la característica amb major valor sigui camí, cal analitzar dues imatges en que el camí sigui visible. És per aquesta raó que fins la descripció de l'entorn de la imatge 8, no es recull a la descripció en quina posició es troba el camí a l'entorn.





*Figura 6.9. Imatges de la Seqüència 2.*

- a) Imatge RGB amb els límits de la segmentació*
- b) Descripció de la imatge*
- c) Descripció de l'entorn*
- d) Imatge RGB sobre la que es superposa els límits del camí que s'indiquen en la descripció de l'entorn.*



### Seqüència 3

#### Característiques del camí

Es tracta d'un camí de muntanya d'amplada entre 2.20 i 2.60 metres, per on només passen cotxes de forma ocasional. Aquest fet fa que en la zona central del camí creixi vegetació i que en la zona del camí limítrofa amb el marge apareixin fulles d'arbres o altres petits elements de l'entorn. Així doncs, la superfície del camí està formada bàsicament per dos matèries, la terra i la gespa.

A una distància de 20 metres (a la imatge inicial de la seqüència) es troba un obstacle de color negre de 33 centímetres d'alçada . D'una altre banda, el camí que es segueix finalitza , ja que arriba a un incorporació amb un altre camí, que es troba a 28 metres (en la imatge inicial de la seqüència).

El límit esquerra del camí és indefinit, ja que el marge està format per les mateixes matèries que el camí (terra, gespa, fulles d'arbres, etc.), a més de matolls i arbres . El límit dret del camí és més distingible, ja que la zona del marge limítrofa amb el camí està formada bàsicament per gespa i matolls.

Donada la falta de manteniment del camí, i l'efecte de l'erosió, la superfície del camí d'aquesta seqüència és força irregular. El moviment de la càmera degut als bots i sotracs que pateix el vehicle es poden apreciar especialment a les imatges 4, 7 i 9 de la seqüència.

En les figures 6.10 apareixen 10 imatges de la seqüència amb la descripció de la imatge associada i la descripció de l'entorn generada mitjançant l'anàlisi de la seqüència. La distància entre els punts on s'ha capturat les imatges és de 1.5 metres, seguint aproximadament l'eix del camí.

#### Resultat

Com es pot veure en aquesta seqüència, la segmentació de les primeres imatges (1, 2, 3 i 4) no correspon a la zona definida pel camí a la imatge. Això és degut a la similitud entre el camí i aquella zona del marge. És gràcies a les restriccions d'amplada i direcció localment constants que es pot obtenir una descripció de l'entorn (quarta columna) coherent.

Així mateix, el moviment no previst de la càmera degut a les irregularitats de la superfície del camí, genera un error en la descripció de l'entorn, encara que aquest és acceptable quan es descriu la zona de l'entorn més propera al vehicle.

La taula 6.18 mostra els valors de la posició i l'alçada estimada de l'obstacle. Com és pot apreciar, en aquest cas l'error de posicionament és més important, especialment quan l'obstacle es troba a una major distància de la càmera.

Finalment, es pot observar com la metodologia proposada permet en aquest cas detectar el fet que el camí finalitza.

Imatge	Distància	Alçada Estimada
1	21.50	
2	18.30	20
3	16.80	20
4	15.10	25
5	13.40	25
6	12.05	25
7	9.90	25
8	8.60	25
9	7.10	30
10	5.40	30

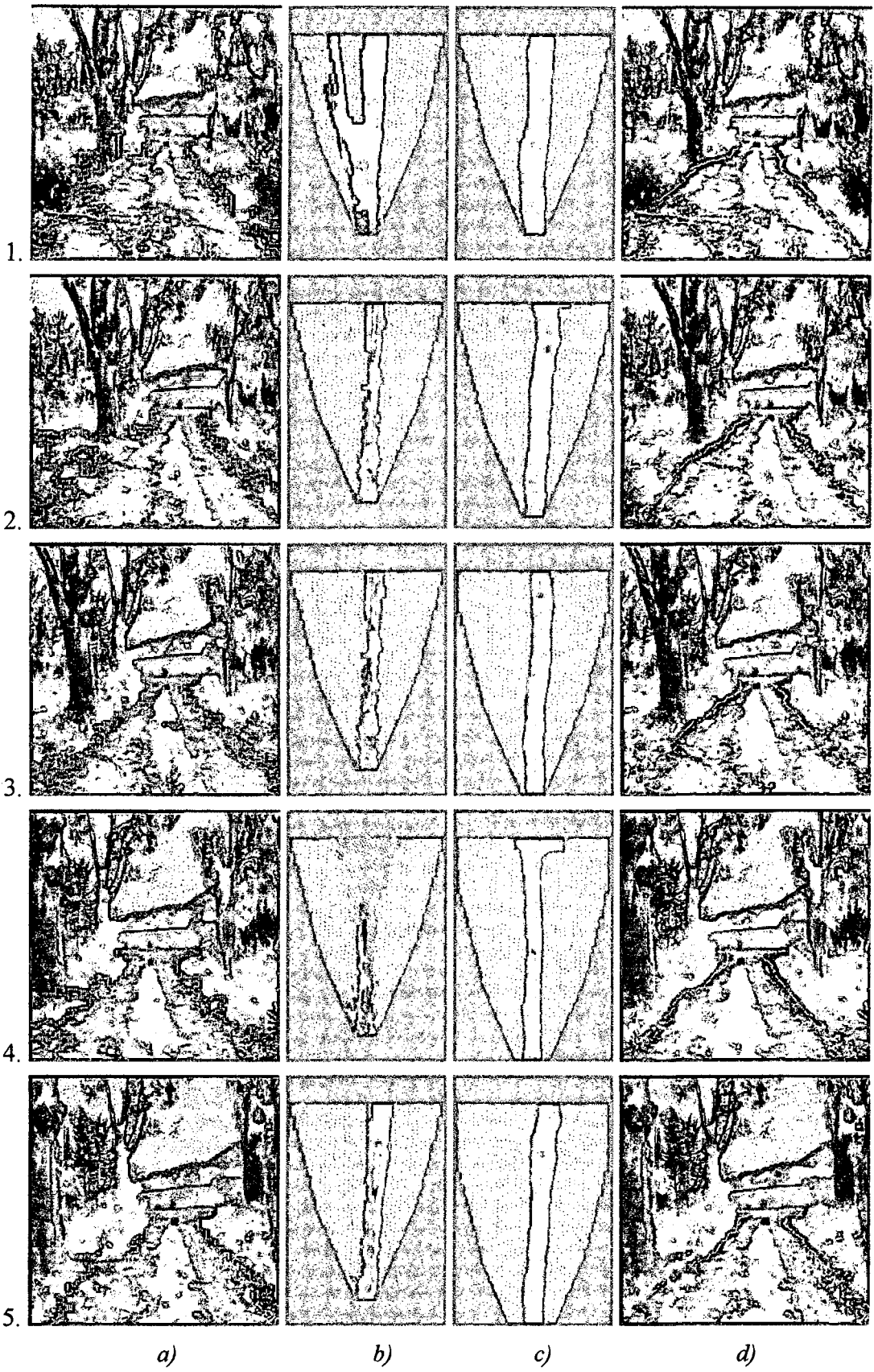
*Taula 6-18. Estimació de la posició i l'alçada de l'obstacle detectat a la seqüència 3.*

#### **6.4. Conclusions**

Com es pot veure en les diferents proves realitzades al llarg de les secció 6.1 i 6.2, les fonts d'errors que tenen una influència més important en la descripció de l'entorn són las que estan associades al procés de posicionament dels elements de la imatge en el món tridimensional.

En la metodologia proposada, el procés de posicionament es veu afectat si hi ha una variació de la disposició (posició i orientació) real de la càmera respecte la que s'assumeix com correcta, o per una variació del pendent del camí en la zona captada per la imatge.

Si bé aquestes causes generen errors en la descripció força importants, també és cert que els errors presents en la descripció de l'àrea més pròxima al vehicle són acceptables per la tasca que es vol realitzar.



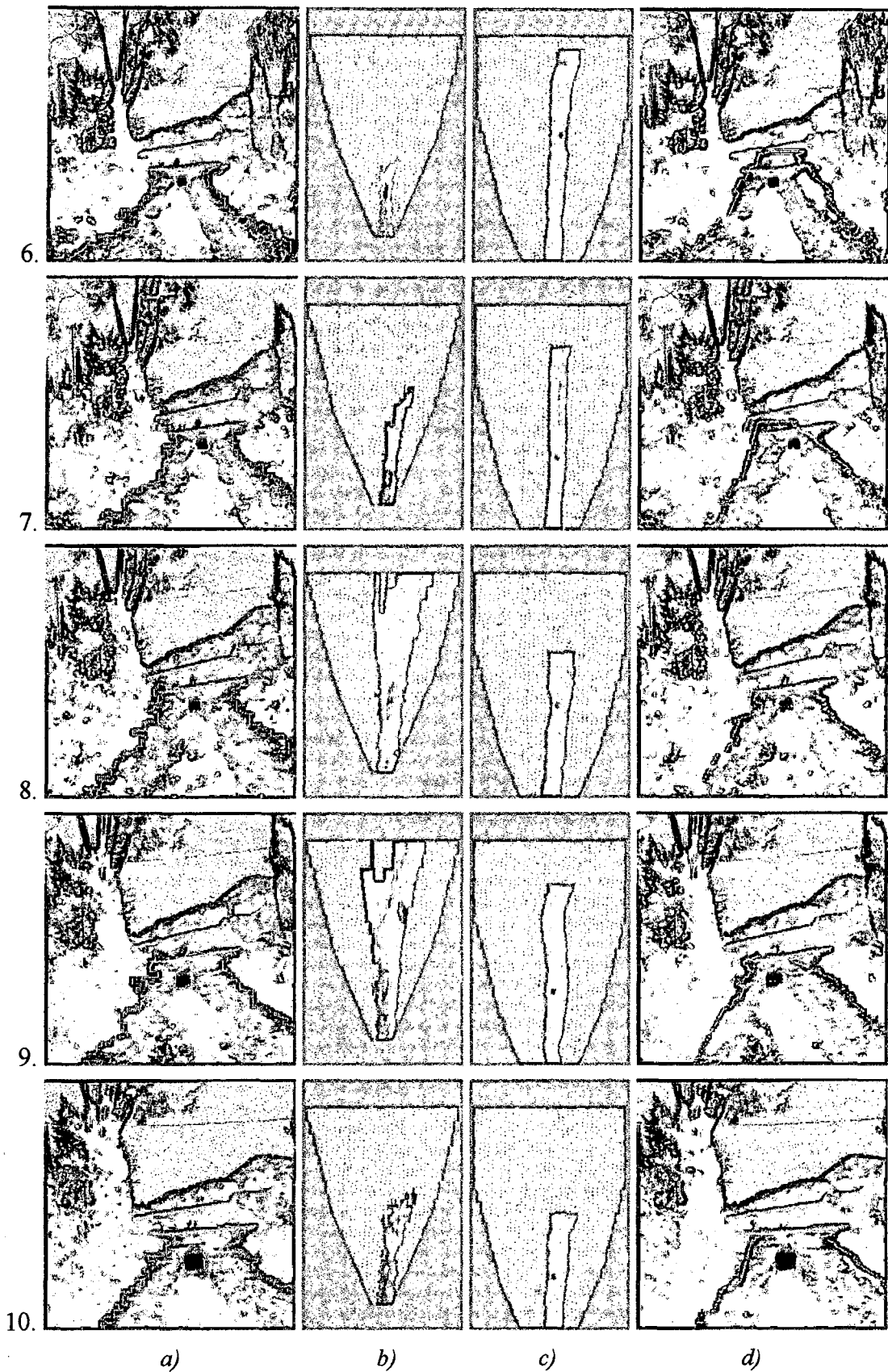


Figura 6.10. Imatges de la Seqüència 2.

a) Imatge RGB amb els límits de la segmentació b) Descripció de la imatge  
 c) Descripció de l'entorn d) Imatge RGB sobre la que es superposa els límits  
 del camí que s'indiquen en la descripció de l'entorn.

Aquestes conclusions queden ratificades amb les proves realitzades sobre seqüències d'imatges captades en condicions reals d'operació en camins mal o feblement estructurats. Algunes d'aquestes proves han estat presentades i comentades en la secció 6.3.

Com es pot veure, les descripcions de l'entorn generades per la metodologia proposada, contenen tota la informació necessària per navegar de forma autònoma en aquest tipus d'entorn, i en particular permeten calcular en poc temps quina és la trajectòria central de l'espai travessable de l'entorn.